

INTERREG VI-A ITALIJA SLOVENIJA 2021-2027

BeBlue Beyond Bluegrass:

Strengthening sustainable agribusiness through aquaponics Krepitev
trajnostne agroživilske proizvodnje z akvaponiko

D1.4.2 Digitalni dvojček za akvaponiko: načela in aplikacije. /

INTERREG VI-A ITALIJA SLOVENIJA 2021-2027

Obvestilo o kapitalizaciji/ Poziv za kapitalizacijo N. 01/2022R

Šifra projekta: ITA-SI0100069 BeBlue

Datum začetka: 1. september 2023 – Trajanje 24 mesecev

Projektni partnerji/ Projektni partnerji:

Projekt BeBlue sofinancira Evropska unija v okviru programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.

Projekt BeBlue sofinancira Evropsko unijo v okviru Programa Interreg VI-A Italija-Slovenija.



Università
Ca' Foscari
Venezia



UNIVERZA V LJUBLJANI
University of Ljubljana



Projekt/ Projekt:	Interreg Italija – Slovenija BeBlue – Onkraj modre trave
Št. projekta / Številka projekta:	ITA-SI0100069
WP	WP1 - Beyond Bluegrass: digitalization and diversification of products / Nadaljevanje Bluegrass: digitalizacija in diverzifikacija proizvodov
dejavnost	A1.4 Digitalni dvojni prototip
Dostavljivo	D1.4.2 / Digitalni dvojček za akvaponiko: principi in aplikacije
Različica / posodobljeno:	1
Datum objave / datum odpreme:	
Odgovorni partner / Odgovorni partner:	ZDRUŽENI
Avtorji/svetovalci:	Joseph Safi, Ana Slatnar, Vid Žitko, Roberto Pastres

Vrsta dobavljivega izdelka / Vrsta končnega izdelka		
R	Dokument, poročilo / Dokument, poročilo	X
DEM	Demonstrator, pilot, prototip - Demo, pilotni projekt, prototip	
DEC	Spletne strani, videi itd. / Spletne strange, videoposnetki itd.	
DRUGO		

Stopnja razširjanja / Stopnja razširjanja		
Lahko	Javni – Javni	X
CO	Zaupno, samo za projektne partnerje, tehnično sekretarko in komisijo of program management / zaupno, samo za projektne partnerje, tehnični sekretariat v odboru za upravljanje programa	

Odobritev končnega izdelka / Odobritev izročka		
Interno odobreno		
Odobreno notranjost		
Odobril WP Leader		
Odobril WP Vodja		
Potrjen s strani koordinatorskega	Roberto Pastres (UNIVE)	
Odobril koordinator		

Kontakti koordinatorskega / Kontakti koordinatorskega	
Ime koordinatorskega projekta	Roberto Pastres
Organizacija koordinatorskega projekta	Univerza Ca' Foscari v Benetkah
Naslov	Via Torino 155, 30172, Mestre (VE) - Italija
E-pošta	pastres@unive.it
Spletna stran projekta	https://www.ita-slo.eu/it/beblue

BEBLUE POVZETEK	5
SEZNAM KRATIC - SEZNAM AKRONIMOV	6
KAZALO SLIK	7
KAZALO TABEL	8
POVZETEK	9
1. UVOD	10
1.1 Namen dokumenta	10
1.2 Razčlenitev rezultatov	10
2. KONCEPTUALNI MODEL	11
3. STRUKTURA DINAMIČNEGA MODELA	15
4. UPORABA MODELA NA PILOTNIH OBRATIH	20
4.1 Modeliranje IP-UNIVE	20
4.2 Modeliranje IP-UNILJU	27
5. REZULTATI	32
5.1 IP-UNIVE: Orada in kozarček	32
5.2 IP-UNIVE: Orada in solata	36
5.3 IP-UNILJU: Šarenka in solata	39
6. SKLEPI	44
7. Bibliografija	45

BeBlue Beyond Bluegrass

Krepitev trajnostnega agrobiznisa z akvaponiko

D1.4.2 Digitalni dvojček za akvaponiko: načela in aplikacije

(Slovenska verzija)

BEBLUE POVZETEK

BeBlue - Beyond Bluegrass, prispeva k uresničevanju specifičnega cilja SO2.6 programa čezmejnega sodelovanja Italija-Slovenija: »Spodbujanje prehoda v krožno in z viri gospodarno gospodarstvo«. Namen projekta je olajšati širjenje akvaponike. Ta trajnostna, krožna tehnologija omogoča soproizvodnjo rib in rastlinskih vrst v reciklacijskih sistemih. BeBlue izkorišča rezultate, dosežene s projektom čezmejnega sodelovanja BLUEGRASS, (<https://2014-2020.ita-slo.eu/bluegrass>), ki je v programsko območje uvedel akvaponiko,

V ta namen bo BeBlue zagotovil orodja za:

1. optimizirati upravljanje akvaponičnih sistemov z njihovo digitalizacijo in razvojem prototipa »Digital Twin«;
2. prikazati potencialno uporabo akvaponičnih sistemov za pridobivanje inovativnih izdelkov z visoko dodano vrednostjo, kot so: i) makroalge; ii) kozarček; iii) mikrozelenje.
3. oceniti okoljsko trajnost izdelkov z razvojem kalkulatorja, ki lahko zagotovi okoljski odtis izdelka (Product Environmental Footprint).
4. Ovrednotiti ekonomsko vzdržnost tovrstnih produkcij, s pomočjo tržne analize, katere cilj je oceniti sprejemljivost uporabe akvaponične tehnologije s strani proizvajalcev in potrošnikov, razvoj orodja za oceno donosnosti investicije akvaponskih sistemov.
5. Povečati ozaveščenost in prepoznavnost akvaponike med akterji v industriji in potencialnimi vlagatelji

Delovni načrt BeBlue je razdeljen na 3 pakete ali delovne pakete, katerih posebni cilji so povzeti spodaj. Poleg dejavnosti prenosa tehnologije ali mreženja vključujejo tudi komunikacijske in diseminacijske dejavnosti, namenjene različnim vrstam potencialnih uporabnikov.

WP1: Beyond Bluegrass: Digitalizacija in diverzifikacija izdelkov

Cilji: Izboljšati pilotne naprave, razvite v BLUEGRASS, ter razviti, preizkusiti in razširjati digitalna orodja za podporo upravljanja in optimizacije akvaponičnega obrata.

WP2: Orodja za oceno okoljske in ekonomske trajnosti.

Cilji: Razviti orodja za podporo investitorjem in operaterjem pri načrtovanju in upravljanju akvaponičnih sistemov, zagotavljanje smernic za izbiro izdelkov in spletnih orodij za vrednotenje ekonomske in okoljske trajnosti.

WP3: Mreženje in valorizacija

Cilji: spodbujati razvoj in vrednotenje znanja, pridobljenega s prejšnjim projektom Bluegrass in z novimi dejavnostmi, krepitev nadslovesnega povezovanja v mreže s procesi participacije in razširjanjem rezultatov.

SEZNAM KRATIC - SEZNAM AKRONIMOV

ALK	Alkalnost
BQC	Programska oprema za nadzor kakovosti podatkov – nadzor kakovosti BeBlue
DO	Raztopljeni kisik
DIN	Raztopljen anorganski dušik – Raztopljen anorganski dušik
DT	Digital Twin -Digitalni dvojček
DW	suha teža - suha teža
DWC	Globokovodna kultura
FW	Sveža teža - Sveža teža
IP-UNIVE	Aquaponic pilotni obrat , ki ga upravlja Univerza Ca' Foscari v Benetkah
IP-UNILJU	Aquaponic pilotna naprava, ki jo upravlja Univerza v Ljubljani
MFB	medijske napolnjene postelje
NFT	Tehnika hranilnega filma
NO3	nitrat
NO2	nitrit
RAS	Recirkulacijski ribogojni sistem
TAN	Skupni amonijev dušik - Skupni amonijev dušik
RP	reaktivni fosfor - reaktivni fosfor
TSS	Skupne suspendirane trdne snovi

KAZALO SLIK

Slika 2 _1: Shema sklopljenega akvaponičnega sistema, vložek, in glavnih tokov materiala navzven in od zunaj.	12
Slika 4 _1: Shema IP-UNIVE, ki poudarja vodne tokove med komponentami sistema.	23
Slika 4 _2: Prikaz matrik V in Q za simulacijo transportnih procesov v akvaponskem sistemu	24
Slika 4 _3: Uporaba matrične enačbe 3.1 za IP-UNIVE.	26
Slika 4 _4: Shema IP-UNILJU, ki poudarja vodne tokove med komponentami sistema.	29
Slika 5 _1: Razvoj prisilnih funkcij in biotskih spremenljivk v štirimesečnem obdobju, simuliranem z digitalnim dvojčkom	33
Slika 5 _2: Razvoj koncentracij TAN, nitrata, pretoka dušika, ki ga izločajo ribe in ga asimilira salicornia, raztopljenega kisika v 4 komponentah akvaponičnega sistema IP-UNIVE.	35
Slika 5 _3: Razvoj koncentracij alkalnosti, raztopljenega anorganskega ogljika in vrednosti pH v 4 komponentah akvaponičnega sistema IP-UNIVE.	36
Slika 5 _4: Razvoj krmnega obroka, temperature vode in gostote biomase morske solate. ...	38
Slika 5 _5: Razvoj krmnega obroka, temperature vode, povprečne teže postrvi, povprečne posamezne teže rastline solate, gojene v DWC, in pretoka dušika od rib do raztopine in od raztopine do rastlin, ob predpostavki enake produktivnosti treh sistemov.	40
Slika 5 _6: Razvoj koncentracije TAN, nitrata in raztopljenega kisika v 5 komponentah akvaponičnega sistema IP-UNILJU.	42
Slika 5 _7: Razvoj koncentracij alkalnosti, raztopljenega anorganskega ogljika in vrednosti pH v 5 komponentah akvaponičnega sistema IP-UNILJU.	43

KAZALO TABEL

Tabela 2 _1: Glavni procesi, povezani s tokovi v in iz vodne raztopine, shematizirani na sliki 2 _1.	13
Tabela 3 _1: Biotske in abiotske spremenljivke stanja	15
Tabela 4 _1: Funkcije prisile in njihova stopnja nadzora.	20
Tabela 4 _2: Spremenljivke biotskega stanja, upoštevane v sistemu IP-UNIVE.	21
Tabela 4 _3: Interakcije med spremenljivkami abiotskega stanja.	24
Tabela 4 _4: Tokovi snovi med organizmi in raztopino ter med raztopino in notranjim zrakom.	25
Tabela 4 _5: Odzivne spremenljivke, uporabljene za preverjanje delovanja dinamičnega modela.	26
Tabela 4 _6: Funkcije prisile, spremljane v IP-UNILJU, in njihova stopnja nadzora.	27
Tabela 4 _7: Spremenljivke biotskega stanja, upoštevane v IP-UNILJU.	28
Tabela 4 _8: Interakcije med spremenljivkami abiotskega stanja.	30
Tabela 4 _9: Tokovi snovi med organizmi in raztopino ter med raztopino in notranjim zrakom.	31
Tabela 5 _1: Začetni pogoji, uporabljeni za simulacijo delovanja linije salicornia.	32

POVZETEK

Ta članek opisuje metodologijo, uporabljeno za razvoj prototipa digitalnega dvojčka ali »Digitalnega dvojčka«, DT, akvaponičnega sistema in predstavlja tri primere uporabe. Prototip je bil razvit v okviru aktivnosti A1.4 "Prototip " Digitalnega dvojčka " projekta BeBlue. V skladu z najnovejšo literaturo je DT mogoče definirati kot **"digitalno predstavitev sistema, ki zagotavlja indikacije glede razvoja njegovega stanja s kombiniranjem: i) apriornega znanja o procesih, ki se v njem dogajajo prek matematičnih modelov ii) informacij, postopno pridobljenih z odkrivanjem eksperimentalnih podatkov."**

Ta definicija poudarja **osrednjo vlogo dinamičnega modela, ki simulira razvoj spremenljivk, ki označujejo akvaponski sistem**, v povezavi z zunanjimi spremenljivkami, ki jih ni mogoče nadzorovati, kot je zunanja temperatura zraka, ki jih je mogoče delno nadzorovati, kot je temperatura vode, ali popolnoma nadzorovati, kot je krmni obrok, zagotovljen ribam. Te spremenljivke se skupaj imenujejo "prisilivne" sistema.

Dejavnost A1.4 se je osredotočila **na opredelitev in kodifikacijo splošnega dinamičnega modela akvaponičnega sistema, razvitega z razširitvijo načel natančnega gojenja rib (PFF)**, uvedenih v gojenje lososa in nedavno prilagojenih gojenju postrvi, na akvaponiko. Uporaba PFF v akvaponskem sistemu je zahtevala uvedbo drugačne terminologije, saj **v tem sistemu soobstajajo organizmi, ki pripadajo trem trofčnim nivojem** : ribe (**konzumenti**), rastlinske vrste, kopenske ali vodne (**primarni proizvajalci**), bakterije (**razkrojevalci**). Z njimi so povezane spremenljivke stanja, ki jih skupaj imenujemo "biotične". Dinamični model je sposoben predvideti fiziološke odzive organizmov glede na sile: na tej podlagi predlaga nadzorne ukrepe, ki so sposobni vzdrževati optimalne pogoje "abiotičnih spremenljivk", ki označujejo stanje vodne raztopine/suspenzije, ki kroži v akvaponskem sistemu, kot so na primer koncentracija raztopljenega kisika, koncentracija nitrata, pH. Takšna dejanja lahko v celoti ali delno izvajajo avtomatski sistemi, npr. avtomatski podajalniki, modulacija prezračevanja, dodajanje kemičnih spojin, ki lahko uravnavajo kislost raztopine.

Prototip je bil uporabljen v dveh pilotnih sistemih, ki ju upravlja vodilni partner, Univerza Ca' Foscari iz Benetk, oziroma Univerza v Ljubljani, PP2. Prvi, skrajšano IP-UNIVE, soprodeluje orade, salikornije in makroalge, drugi, skrajšano IP-UNILIJ, soprodeluje šarenke, zanimivo sorto solate, salanovo in mikrozelenje.

Rezultati kažejo, da je struktura prototipa Digital Twin robustna in sposobna z zadostno natančnostjo simulirati tako dinamiko že konsolidiranih akvaponičnih sistemov, v katerih se uporablja sladka voda, kot dinamiko bolj inovativnih sistemov, v katerih se uporablja brakična ali morska voda.

Zlasti dinamična simulacija koncentracij dveh anorganskih dušikovih spojin, skupnega amonijevega dušika in nitrata, omogoča natančnejšo oceno razmerja med biomaso gojenih rib in obdelovalno površino v primerjavi z empiričnimi razmerji, ki se trenutno uporabljajo. Poleg tega DT omogoča kratkoročno napovedovanje ribjih potreb po hrani in kisiku glede na temperaturo vode, kar omogoča ustrezno modulacijo dajanja krme in uporabo sistemov za prezračevanje in oksigenacijo, kar pomembno vpliva na operativne stroške.

1. UVOD

Akvaponični sistemi so bolj zapleteni kot recirkulacijski sistemi akvakulture (RAS) in hidroponični sistemi brez zemlje. Pravzaprav mora njihovo upravljanje zagotoviti optimalne pogoje za dobro počutje in rast rib in rastlin ter vzdrževati temperaturo vode v mejah, ki omogočajo učinkovito biološko pretvorbo amonijevega dušika v nitrat s pomočjo bakterijske komponente. To zahteva tako agronomsko kot ribogojno znanje, ki je toliko bolj nujno, kolikor večji je obseg proizvodnje in s tem tveganje izgube proizvoda zaradi neustreznega ali nepravočasnega upravljanja. Poleg tega je v fazi načrtovanja pomembno pravilno dimenzionirati komponente sistema in zlasti biomaso in gostoto razmnoževanja glede na površino, dodeljeno za gojenje rastlinskih vrst. Trenutno ni prosto dostopnih orodij, ki bi olajšala načrtovanje in upravljanje akvaponičnih sistemov ob upoštevanju časovnega razvoja biomase, ki naj bi bila soproizvedena.

Zaradi tega je ena glavnih dejavnosti projekta BeBlue razvoj in uporaba »digitalnega dvojčka« ali »Digitalnega dvojčka« akvaponičnega sistema, v nadaljevanju DT. DT je mogoče opredeliti kot **digitalno predstavitev sistema, ki zagotavlja informacije o razvoju njegovega stanja s kombiniranjem: i) apriornega znanja o procesih, ki se v njem odvijajo prek matematičnih modelov ii) informacij, postopno pridobljenih z odkrivanjem eksperimentalnih podatkov**. (Fore&al., 2024). Prototip Digital Twin, razvit v BeBlue, **ki mora biti robusten in posplošljiv, vključuje predvsem prvi element, to je matematični model, ki je sposoben dinamično simulirati fizikalne, kemične, mikrobiološke in biološke procese, ki se pojavljajo v akvaponskem sistemu.**

1.1 Namen dokumenta

Namen tega prispevka je predstaviti konceptualni okvir, v katerem je bil razvit DT, matematično strukturo dinamičnega modela in njegovo uporabo na dveh pilotnih napravah, ki se upravljata v projektu BeBlue. Prvi obrat razširi uporabo akvaponskih sistemov na proizvodnjo ribjih vrst, značilnih za morske ali brakične vode, kar omogoča znatno razširitev ponudbe ribjih izdelkov iz akvaponike. Uporaba somornice ali slane vode znatno zmanjša vodni odtis izdelkov na nič, vendar omeji obseg rastlinskih vrst, ki jih je mogoče soobdelovati, na rastline, ki lahko prenesejo visoko slanost ter mikro in makroalge. V IP-UNIVE so se odločili, da bodo prvič na programskem območju soproizvajali orado, halofitne rastline, kot je salicornia, in morsko solato, užitno makroalgo. V drugem obratu smo pridelavo šarenke združili s proizvodnjo manjše količine mikro zelenja in zanimive sorte solate Salanova.

1.2 Dobavljiva razčlenitev

V skladu s ciljem tega poročila je dokument razdeljen na ta uvod in pet drugih poglavij. V drugem poglavju je opisan konceptualni model, na katerem je temeljil razvoj prototipa DT. V nadaljevanju je predstavljena matematična struktura dinamičnega modela, ki simulira delovanje akvaponičnega sistema, in podane so nekatere podrobnosti v zvezi s strukturo kode, ki omogoča numerično reševanje konstitutivnih enačb modela. V četrtem poglavju je predstavljena aplikacija modela na pilotne naprave, različne po velikosti, strukturi in koproizvodnih vrstah. Rezultati so predstavljeni ločeno za tri kombinacije izdelkov v 5. poglavju. Končno so v sklepnem poglavju predstavljeni nekateri premisleki v zvezi z možnostmi uporabe prototipa pri načrtovanju in upravljanju akvaponičnih sistemov.

2. KONCEPTUALNI MODEL

Konceptualni model prototipa »digitalnega dvojčka« sklopljenega akvaponičnega sistema je bil razvit na podlagi definicije, ki je bila nedavno predlagana v (Fore&al., 2024):

»digitalna predstavitev sistema, ki zagotavlja informacije o razvoju njegovega stanja s kombiniranjem: i) apriornega znanja o procesih, ki se v njem dogajajo prek matematičnih modelov ii) informacij, postopno pridobljenih z odkrivanjem eksperimentalnih podatkov.«

Ta pristop vključuje: 1) izvajanje sistema spremljanja, ki lahko zagotovi podatke v realnem času o razvoju glavnih spremenljivk, ki vplivajo na rast in dobro počutje soproizvedenih vrst; 2) **razvoj dinamičnega modela, ki simulira njegovo delovanje in s tem omogoča analizo in interpretacijo podatkov, oblikovanje kratkoročnih napovedi, uporabnih za nakazovanje ustreznih upravljavskih odločitev**. Uporaba definicije zahteva uporabo algoritmov za asimilacijo podatkov, ki omogočajo integracijo njihove informacijske vsebine v parametrizacijo modela, kar izboljša njegovo napovedno zmogljivost (Royer&Pastres, 2023). V skladu s cilji projekta in ob upoštevanju obstoječe literature **DT, razvit v BeBlue, vključuje predvsem dinamični model, ki simulira časovni razvoj številnih spremenljivk, ki označujejo akvaponski sistem**. Model je bil razvit ob upoštevanju pristopa k inteligentnemu upravljanju ribogojnih sistemov, imenovanega »Precision Fish Farming« ali »PFF« (Fore&al., 2018). Ta pristop se je doslej uporabljal za gojenje lososa v mrežastih kletkah, gojenje postrvi (Royer&al., 2023) in gojenje rib na kopnem, vključno z gojenjem morskih rib (Lima&al., 2023). V okviru aktivnosti A1.4 projekta BeBlue **je bil PFF razširjen na recirkulacijske akvaponične sisteme, ki so bolj zapletene** od zgoraj omenjenih vrst ribogojstva, saj vključujejo **organizme, ki pripadajo tri različne trofične ravni**:

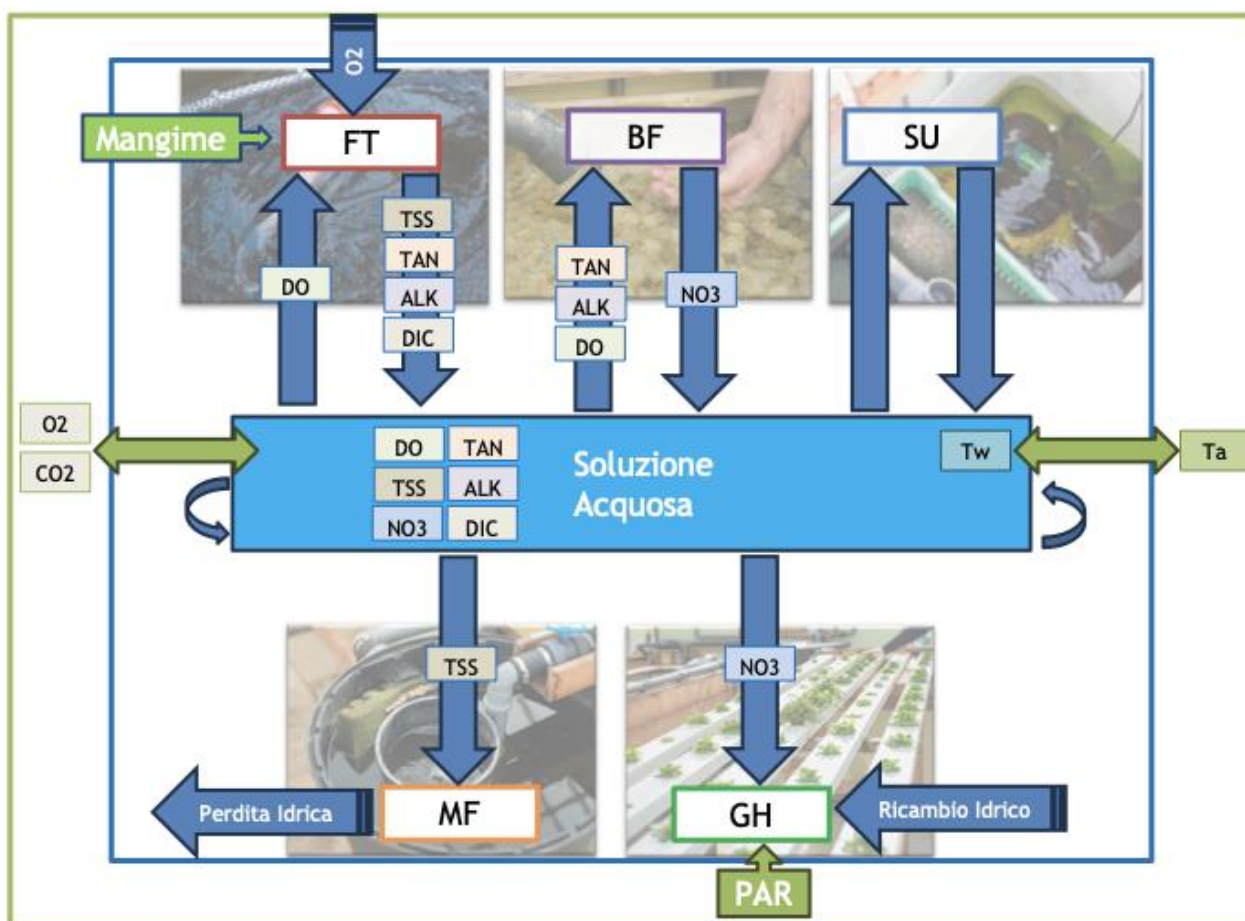
- **potrošniki: ribe;**
- **primarni proizvajalci: rastline ali alge;**
- **razkrojevalci: bakterije**

Ukrepi upravljanja/nadzora morajo zato zagotoviti pogoje kakovosti vode, ki zagotavljajo dobro počutje in optimalno ali skoraj optimalno rast rib in primarnih proizvajalcev ter učinkovito biološko pretvorbo amonijevega dušika v nitrat z bakterijsko komponento.

Sklopljen akvaponski sistem vključuje pet bistvenih komponent, prikazanih na Slika 2-1:

- 1) Komplet rezervoarjev za ribogojstvo (FT);
- 2) Rastlinjak za brezzemeljsko pridelavo zelenjave (GH);
- 3) Biofilter, v katerem bakterijske skupnosti pretvorijo amonijski dušik v dušikov (BF)
- 4) Enota, v kateri se odstranijo suspendirane trdne snovi, npr. peščeni filter, sobni filter, usedalnik (MF).

5) Zbirni rezervoar ali zbiralnik (SU).



Slika 2-1: Shema sklopljenega akvaponičnega sistema, vložek, in glavnih tokov materiala navzven in od zunaj.

Tem je treba dodati še naprave za razkuževanje, npr. UV žarnice, svetilne naprave, npr. LED svetilke in, če je sistem ločen in je ribja biomasa visoka, komponenta, v kateri pride do odstranitve ogljikovega dioksida, in komponenta, v kateri se nitrat reducira v molekularni dušik, s postopkom denitrifikacije.

Dinamični model, razvit v BeBlue, upošteva pet bistvenih komponent sklopljenega sistema, v katerem gostota biomase ne presega 20 kg/m³. Poleg tega so bili rezervoarji za gojenje rib in primarnih proizvajalcev združeni v dve reprezentativni komponenti, da bi poenostavili prototip in omogočili dostop uporabniku prek vmesnika, opisanega v izsledku D.4.1. Glede na Slika 2-1 komponente poimenovane: FT (Fish Tank), BF (Biofilter), GH (Green House), MF (Mechanical Filter) in SU (Sump). Organizmi, ki jih sistem gosti, vzdržujejo optimalne pogoje z neprekinjenim pretokom snovi in energije. Prvič, proces fotosinteze zajema ogljikov dioksid iz zraka in vanj sprošča kisik; dihanje rastlin deluje obratno. Glede na nizko rastlinsko biomaso se predpostavlja, da so koncentracije teh plinov konstantne in enake atmosferskim. vodna raztopina/suspenzija zagotavlja anorganske kemične spojine, bistvene za njihov

metabolizem, in sprejema snovi, ki se izločajo po presnovnih procesih. Proces, povezani s pretokom snovi iz organizmov v raztopino in obratno, so opisani v Tabela 2-1.

Tabela 2-1: Glavni procesi, povezani s tokovi v in iz vodne raztopine, shematizirani na Slika 2-1.

Proces	Tok snovi
Ribe: dihanje	- Kisik iz raztopine v ribe Ogljikov dioksid iz rib v raztopino
Ribe: presnova beljakovin	- Amonijev dušik in sečnina iz rib v raztopino
Bakterije: nitrifikacija	- Amonijev dušik in kisik iz raztopine v bakterijsko biomaso - Nitrat iz bakterijske biomase v raztopino
Alge: dihanje	- Kisik iz raztopine alg - Ogljikov dioksid iz alg v raztopino
Alge: fotosinteza	- Ogljikov dioksid ali bikarbonatni ioni iz raztopine alg - Kisik iz alg v raztopino
Rastline: dihanje korenin	- Kisik iz raztopine do korenin - Ogljikov dioksid iz korenin v raztopino
Rastline: asimilacija dušika	- DIN, predvsem nitrat, od raztopine do korenin

Izmenjave teh spojin **spremenijo kemično sestavo vodne raztopine** : zlasti:

- **izločanje amoniaka s strani rib poveča tako koncentracijo TAN, skupni amonijev dušik, kot tudi alkalnost**, tj. sposobnost raztopine, da puferi dodatke kisline;
- biološka **pretvorba TAN v nitrat, ki jo predstavlja kemijska enačba** :

$$\text{NH}_3 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} \quad (2.1)$$

zmanjša se tudi alkalnost, v skladu z enačbo 2.2c.
- dioksid **poveča koncentracijo raztopljenega anorganskega ogljika ali DIC**.

Alkalnost in DIC pomembno vplivata na kislost raztopine, kvantificirano s pH: zato je **bistveno upoštevati kemijska ravnotežja, ki povezujejo te spremenljivke, da lahko predvidimo in nadzorujemo pH**. Po drugi strani pa pH vpliva na specifikacijo TAN. Te spremenljivke so opredeljene z naslednjimi enačbami masne bilance:

$$[\text{TAN}] = [\text{NH}_3] + [\text{NH}_4^+] \quad (2.2a)$$

$$[\text{DIC}] = [\text{CO}_2] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{CO}_3^{2-}] \quad (2.2b)$$

$$[\text{Alk}] = [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}^+] + [\text{NH}_3] \quad (2.2c)$$

Kjer oglati oklepaji označujejo molske koncentracije. Ker so zaradi delovanja biofiltra koncentracije TAN, $[\text{H}^+]$, $[\text{OH}^-]$ vsaj dva reda velikosti nižje od koncentracije DIC, smo alkalnost aproksimirali na podlagi enačbe

$$[\text{Alk}] \sim [\text{HCO}_3^-] + 2[\text{CO}_3^{2-}] \quad (2.2d)$$

Raztopina tudi izmenjuje snov z atmosfero: izmenjujeta se predvsem **kisik in ogljikov dioksid**.

Opis **sistema poudarja** njegovo kompleksnost in predvsem **njegovo dinamičnost** : vnosi toplotne energije in izmenjave toplote z zunanostjo vplivajo na temperaturo zraka in vode, tokovi snovi med vodnim medijem in komponentami sistema nenehno spreminjajo svojo sestavo. Upravljanje sistema mora zato vključevati nabor **nadzornih ukrepov, namenjenih vzdrževanju temperature in sestave raztopine v mejah, ki :**

- zagotavljajo dobro počutje in optimalno rast rib;
- zagotoviti visoko učinkovitost biopretvorbe TAN v nitrat;
- zagotavljajo dobro počutje in optimalno rast primarnih proizvajalcev, rastlin ali alg.

Poleg črpanja vode za ohranjanje njenega kroženja glavni nadzorni/regulacijski ukrepi vključujejo:

- Modulacija ribjega obroka hrane glede na temperaturo vode in doseženo velikost rib;
- Umetno prezračevanje ali oksigenacija;
- Prilagoditev kislosti raztopine z dodajanjem alkalnosti;
- Izmenjava vode za nadomestitev izgub zaradi izhlapevanja in po potrebi znižanje koncentracije odvečnega nitrata;
- Kondicioniranje temperature vode;
- Umetna razsvetljava za povečanje stopnje primarne proizvodnje;
- V obratih za proizvodnjo velikih količin ribje biomase je treba dodajati komponente za odstranjevanje odvečnega nitrata in ogljikovega dioksida.

Nadzorni ukrepi se materializirajo v izmenjavah snovi/energije med akvaponskim sistemom in zunanostjo, ki vplivajo na njegovo delovanje: skupaj so spremenljivke, povezane s takšnimi izmenjavami, označene kot "funkcije prisile":

- **neobvladljivo** , oglas. npr. temperatura zunanjega zraka,
- **delno nadzorovana** , na primer temperatura vode,
- **popolnoma obvladljiv** , npr. obrok hrane.

3. STRUKTURA DINAMIČNEGA MODELA

Dinamični model, ki opisuje razvoj akvaponičnega sistema v povezavi z materialnimi tokovi, opisanimi v prejšnjem poglavju, mora biti zmožen simulirati:

- 1) glavni presnovni procesi rib, primarnih proizvajalcev in bakterij;
- 2) vodna bilanca in transportni procesi raztopljenih metabolitov in suspendiranih trdnih snovi;
- 3) kemična ravnovesja, ki uravnavajo kislost raztopine.

so bile definirane **spremenljivke stanja, navedene** v tabeli 3.1, razdeljene na **biotske in abiotske**. Šest abiotskih spremenljivk je bilo definiranih na podlagi konceptualnega modela, v skladu z (Dos Santos&al., 2023): kot je razvidno, ne vključujejo bakterijske biomase, saj ta precej hitro doseže stacionarno vrednost. Postopek nitrifikacije smo nato parametrizirali ob predpostavki, da je učinkovitost biofiltra odvisna samo od temperature. Poleg tega se pH ne pojavlja med spremenljivkami stanja: pravzaprav se izračuna na podlagi alkalnosti in koncentracije DIC ob predpostavki, da je kemijsko ravnovesje vzpostavljeno v trenutku (Dos Santos&al., 2023): zato se lahko šteje za odzivno spremenljivko modela. Poleg tega je bilo predpostavljeno, da krmilni ukrepi omogočajo ohranjanje skupne prostornine vode in količine, povezane z vsako komponento, konstantno: te se torej ne pojavljajo med spremenljivkami stanja.

Tabela 3-1: Spremenljivke biotskega in abiotskega stanja

Spremenljivke biotskega stanja	Simbol
Povprečna posamezna živa teža rib [g]	X _{F1}
Število rib	X _{F2}
Povprečna posamezna sveža teža rastline [g]	X _{P1}
Število rastlin	X _{P2}
Gostota biomase alg [g/L]	X _A
Spremenljivke abiotskega stanja	
Skupna koncentracija amonijevega dušika [mmol/L]	C _{1,j}
Koncentracija nitratov [mmol]/L	C _{2,j}
Koncentracija raztopljenega kisika [mmol/L]	C _{3,j}
Koncentracija raztopljenega anorganskega ogljika [mmol/L]	C _{4,j}
Alkalnost [mmol/L]	C _{5,j}
Skupna koncentracija suspendiranih trdnih snovi [g/L]	C _{6,j}

Spremenljivke, navedene v Tabela 3-1so povezane z eno ali več sistemskimi komponentami, označenimi z "j", označenimi na sliki Slika 2-1. Zlasti:

- Spremenljivke, povezane z ribami, so povezane samo s komponento »FT«, ki združuje vzrejne rezervoarje;
- Spremenljivke, povezane s primarnimi proizvajalci, so povezane samo s komponento "GH", ki združuje obdelovalno površino;
- Abiotske spremenljivke so povezane z vsemi komponentami in se razvijajo tudi glede na kroženje vode, ki ga uravnava delovanje črpalk.

Cilj nadzornih ukrepov mora biti vzdrževanje optimalnih ali skoraj optimalnih pogojev za dobro počutje in rast organizmov: **zato se predpostavlja, da sestava vodne raztopine zanemarljivo vpliva na njihove stopnje rasti**.

Ta predpostavka omogoča **znatno poenostavitev strukture dinamičnega modela**, ki simulira presnovne procese in transport abiotskih spremenljivk, saj so **stopnje rasti rib in primarnih proizvajalcev odvisne samo od sil in ne od stanja raztopine**. To pomeni, da jih je mogoče reševati vzporedno:

- enačbe, ki simulirajo razvoj biotskih spremenljivk v komponentah FT in GH;
- enačbe, ki simulirajo transportne procese in kemijska ravnovesja, ki vključujejo abiotske spremenljivke.

Z drugimi besedami, glede na Slika 2-1, tokovi snovi od biotskih spremenljivk do raztopine so modelirani kot vhodi (viri) dinamičnega sistema, ki simulira razvoj stanja raztopine, medtem ko so tokovi od raztopine do organizmov odvisni od abiotskih spremenljivk, vendar ne vplivajo na razvoj biotskih. Od tod **bistvena vloga nadzornih ukrepov za uravnavanje tokov, tako da zagotavljajo dobro počutje in optimalno rast organizmov**. Konstitutivne enačbe modela logično izhajajo iz Slika 2-1.

Dinamika **biotskih spremenljivk** je simulirana z uporabo vrstno specifičnih modulov, **ki simulirajo energetske ravnovesje organizmov**. Za rastline in ribe je bil sprejet zelo prilagodljiv pristop, ki temelji na simulaciji rasti niza organizmov (Individual Based Population Model). V prototipu je upoštevan samo en posameznik, predstavnik povprečja, vendar nam ta pristop omogoča enostavno simulacijo porazdelitev količin, ki označujejo biomaso posameznega organizma. Za alge model simulira razvoj gostote biomase. Z matematičnega vidika moduli rešujejo dinamični sistem, ki simulira energetske bilanco vsake obravnavane vrste in iz tega izračuna stopnjo rasti.

Na splošno mora razvoj **spremenljivk abiotskega stanja** v vsaki komponenti upoštevati tokove snovi v organizme in iz njih ter transportne procese. V zvezi s tabelo 3.1 je torej **vektor stanja x** sestavljen iz $nv = 6$ segmentov " ", ki ustrezajo spremenljivkam c_i , definiranim v nc komponentah " ": skupno število spremenljivk stanja, ns , je torej enako " $ns = nc \times nv$ ": prve " nc " vrstice x so povezane z vrednostmi prve abiotske spremenljivke v " nc " komponentah, naslednje " nc " vrstice z vrednostmi drugih spremenljivk v " nc " komponentah in tako na. Časovni razvoj vektorja stanja je opisan z dinamičnim sistemom:

$$\frac{dx}{dt} = (T + R)x + g = Ax + g \quad (3.1)$$

$$A (ns \times ns) = T (ns \times ns) + R (ns \times ns) \quad (3,2)$$

T je blok diagonalna matrika, ki upošteva transportne procese med komponentami. Bloki »*nv*« so vsi enaki: odvisni so od volumnov, povezanih z vsako komponento, ter od dovodnih in izhodnih vodnih tokov, za konstantne hipoteze:

$$T_i(nc \times nc) = V^{-1}(nc \times nc) Q (nc \times nc) \quad (3,3)$$

kjer je: **T**_i i-ti blok, **V** je diagonalna matrika, katere diagonalni elementi so prostornine vsake komponente, **Q** pa je matrika, ki določa vodne tokove, ki vstopajo in izstopajo iz vsake komponente.

R matrika je redka matrika, ki upošteva interakcije med spremenljivkami stanja: na primer, v biofiltru se TAN pretvori v NO₃: zato je hitrost spremembe koncentracije NO₃ v komponenti BF odvisna od koncentracije TAN.

Enačba (3.1) je rešena numerično: linearnost sistema omogoča enostavno razvijanje kode in poleg tega omogoča takojšnjo določitev stanja sistema v stacionarnih pogojih s pomočjo:

$$A x = -g \quad (3,4)$$

Čeprav se vse spremenljivke sčasoma spreminjajo, lahko rešitev (3.4) poda koristne indikacije o stanju rešitve kratkoročno in poleg tega služi za preverjanje točnosti numerične metode, uporabljene za rešitev (3.1).

Da bi simulirali pH in speciacijo DIC in TAN, je treba (3.1) dodati niz algebrskih enačb, ki predstavljajo kemijska ravnovesja:

$$H_2CO_3 \rightleftharpoons^{K_1} H^+ + HCO_3^- \quad \frac{[H^+][HCO_3^-]}{[H_2CO_3]} = K_1 = 8.9e^{-07} \quad (3.5.a)$$

$$HCO_3^- \rightleftharpoons^{K_2} H^+ + CO_3^{2-} \quad \frac{[H^+][CO_3^{2-}]}{[HCO_3^-]} = K_2 = 4.3e^{-10} \quad (3.5b)$$

$$NH_4^+ \rightleftharpoons^{K_3} H^+ + NH_3 \quad \frac{[H^+][NH_3]}{[NH_4^+]} = K_3 = 9.1e^{-10} \quad (3.5.c)$$

$$H_2O \rightleftharpoons^{K_w} H^+ + OH^- \quad \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]} = K_w = 5.2e^{-15} \quad (3,6d)$$

Vrednosti konstant kemijskega ravnovesja so navedene v (dos Santos & al., 2023).

3.1 Ravnovesje dušika

Največja uporaba dušika v krmi za ribe je eden od razlogov za trajnost akvaponike, saj se uporablja tudi za proizvodnjo biomase primarnih proizvajalcev. Proces, ki vključuje dušik v akvaponskem sistemu, so zapleteni in NUE – Nitrogen Utilization Efficiency index je eden od pokazateljev ustrezne velikosti in učinkovitosti takšnega sistema. Dinamični model omogoča ovrednotenje časovnega razvoja TAN in NO₃, kot tudi dušika, ki ga vsebuje soproizvedena biomasa in izstopa iz sistema z suspendiranimi trdnimi snovmi, ki jih zajame mehanski filter.

Pretok dušika, ki se vnese v sistem iz ribjih izločkov v obliki TAN, se izračuna na naslednji način:

$$\frac{dTAN_{in}}{dt} = N_{feed} - N_{pesc} - N_{feci} \quad (3,7)$$

v katerem:

N_{krma} je količina dušika v dnevnem krmnem obroku, izračunana na podlagi vsebnosti beljakovin in ob predpostavki, da beljakovine vsebujejo 16 % dušika;

N_{pesc} je pretok dušika, ki ga ribe vključijo s prebavo krme;

N_{feces} je vsebnost dušika v ribjih iztrebkih.

Količina anorganskega dušika v sistemu je enaka:

$$[DIN] = [TAN] + [NO3] + [NO2] \quad (3,8)$$

Nitrit, ki je prisoten v koncentracijah vsaj za en red velikosti nižjih od TAN in NO₃, ni upoštevan v modelu.

DIN uporabljajo primarni proizvajalci v rastlinjaku:

$$\frac{dDIN}{dt} = -N_{ass} \quad (3,9)$$

kjer N_{ass} je pretok DIN od raztopine do primarnih proizvajalcev: ker je koncentracija NO₃ veliko večja od koncentracije TAN, **se predpostavlja, da ves anorganski dušik dobavlja nitrat.**

3.2 Glavne hipoteze in predpostavke

Modeliranje kompleksnega sistema, ne glede na to, ali je natančno, mora nujno vključevati nekaj poenostavljenih predpostavk, da se zagotovi robustnost modela in olajša njegova uporaba v resničnih primerih. Glavne hipoteze in predpostavke so povzete spodaj.

- Dinamika bakterijske populacije ni eksplicitno simulirana;
- Spremenljivke stanja, povezane z ribami in primarnimi proizvajalci, so povezane samo z dvema komponentama sistema, FT in GH.
- Abiotske spremenljivke, povezane z vodno raztopino, so povezane z vsemi komponentami sistema
- Krmni obrok je bil ocenjen na podlagi krmnih tabel, ki jih je zagotovilo krmno podjetje.
- Dušik vstopi v raztopino kot amoniak, ki ga izločijo ribe, in zapusti zaradi odstranitve suspendiranih trdnih snovi in asimilacije s strani primarnih proizvajalcev.
- Izmenjava vode zagotavlja konstanten volumen vode.

- Temperatura zraka in relativna vlažnost, temperatura vode in slanost se obravnavajo kot dejavniki, na katere materialni tokovi ne vplivajo: njihov časovni razvoj je ocenjen na podlagi eksperimentalnih podatkov.
- pH se izračuna ob predpostavki, da so kislinsko-bazična ravnovesja, ki ga določajo, v ravnovesju. Pri tem se lahko za sladke in brakične vode oceni z dobrim približkom iz alkalnosti, ob predpostavki, da je to mogoče približati s karbonatno alkalnostjo.

4. UPORABA MODELA NA PILOTNE NAPRAVE

Med fazo načrtovanja sta bili identificirani dve vrsti izdelkov: 1) morske ribe, halofitne rastline in makroalge; 2) sladkovodne ribe in mikrozelenje. V prvih mesecih projekta BeBlue so bile akvaponične pilotne naprave, postavljene v okviru projekta INTERREG Italija-Slovenija Bluegrass, prilagojene omenjenim koprodukcijam. Predvsem obrat, ki ga upravlja Oddelek za agronomijo Univerze v Ljubljani, IP-UNILJU, je bil izboljšán in pripravljen za presojo izvedljivosti pridelave šarenke, drugih rastlinskih vrst in mikrozelenja, medtem ko je bil obrat, ki ga vodi Znanstveni kampus Univerze v Benetkah, IP-UNIVE, prilagojen za soproizvodnjo orade, salicornije in makroalg. Kot je podrobno opisano v dokumentu BeBlue's Deliverable D1.1.1, so bili obrati opremljeni z naprednimi sistemi za samodejno spremljanje, ki lahko zagotavljajo podatke o kakovosti vode, kakovosti zraka in porabi energije v realnem času. Znatna količina dnevno zbranih podatkov je bila predhodno obdelana z uporabo platforme BQC za nadzor kakovosti, ki je v celoti delujoča in je opisana v dokumentu D1.1.2.

Splošni dinamični model, opisan v prejšnjem poglavju, je bil uporabljen za oba pilotna sistema ob upoštevanju njunih različnih značilnosti, tako glede proizvedenih vrst kot sistemov spremljanja, ki so bili izvedeni za zagotavljanje vhodnih podatkov in opazovanj, s katerimi je mogoče primerjati odzive modela.

4.1 Modeliranje IP-UNIVE

Sistem spremljanja obratovanja v obratu, ki ga upravlja vodilni partner, je podrobno opisan v izsledkih D1.1.1 in D1.2.1. Tabela 4-1 navaja glavne funkcije prisile, njihovo delovanje in stopnjo nadzora. Združeni so v vektor, imenovan " **u** ".

Tabela 4-1: Funkcije prisile in njihova stopnja nadzora.

	merska enota	Prizadete spremenljivke stanja	Stopnja nadzora
u_1 : dnevni obrok hrane	[g_{feed}/day]	Teža rib.	Obvladljiv
u_2 : izmenjava vode	[m^3/h]	Prostornina raztopine in koncentracija suspendiranih in raztopljenih snovi.	Obvladljiv
u_3 : črpanje zraka	[m^3/h]	Koncentracije raztopljenega kisika in ogljikovega dioksida.	Obvladljiv
u_4 : umetna razsvetljava z LED.	[W/m^2]	Intenzivnost fotosintetsko aktivnega sevanja, ki ga prejmejo primarni proizvajalci.	Delno nadzorovano, saj PAR izvira tudi iz sončnega sevanja.
u_6 : temperatura vode.	°C	Vse biotske spremenljivke.	Na podlagi hipotez, navedenih na koncu 3.

			poglavja, se šteje za neobvladljivo.
u_7 : Notranja temperatura zraka	[°C]	Rastlinska biomasa z modulacijo fotosinteze.	Na podlagi predpostavk, navedenih na koncu 3. poglavja, se šteje za neobvladljivo.
u_8 : notranja relativna vlažnost.	[%]	Prostornina vode, skozi stopnjo izhlapevanja vode,	Na podlagi predpostavk, navedenih na koncu 3. poglavja, se šteje za neobvladljivo.
u_9 : Intenzivnost sončnega obsevanja.	[W/m ²]	Biomasa rastlin in alg skozi proces fotosinteze.	Neobvladljivo.

4.1.1 Dinamika biotskih spremenljivk

Dinamika biotskih spremenljivk je odvisna od izbire vrste za soproizvodnjo: zato je za vsako vrsto potreben drugačen modul. V IP-UNIVE koprodukcija:

- Orada in salikornija
- Orada in morska solata

v dveh vzporednih linijah sistema. Podatki, zbrani od aprila 2024 do februarja 2025, so podrobno navedeni v izsledku D1.2.1. Spremenljivke biotskega stanja in spremenljivke odziva za obe liniji so navedene v Tabela 4-2.

Tabela 4-2: Spremenljivke biotskega stanja, upoštevane v sistemu IP-UNIVE.

Linija alg - AL	Salicornia Line - SA
x_{F1} : povprečna posamezna teža orade [g]	x_{F1} : povprečna posamezna teža orade [g]
x_{F2} : Število orad	x_{F2} : Število orad
x_{P1} : Gostota biomase morske solate [g]	x_{P1} : povprečna teža rastline [g]
x_{P2} : koncentracija N v biomasi morske solate. [gN/gDW]	x_{P2} : Število rastlin

Časovni razvoj povprečne teže orade je bil simuliran z uporabo dinamičnega modela, ki izračuna rast na podlagi energetske bilance. Enačbe so podrobno opisane v (Brigolin&al., 2010) in (Bolzonella&al, 2023). Poleg izračuna spremembe teže kot funkcije krmnega obroka in temperature vode model zagotavlja:

- potreba po kisiku in sproščanje ogljikovega dioksida, povezana z dihanjem rib
- izločanje amoniakovega dušika, povezano s presnovo beljakovin
- izločanje blata.

Ti snovni tokovi predstavljajo vhodne tokove za modul, ki simulira razvoj abiotskih spremenljivk.

Časovni razvoj gostote biomase morske solate je bil simuliran z uporabo dinamičnega modela, ki vključuje tudi notranjo koncentracijo dušika kot spremenljivko stanja, saj ga ta vrsta lahko kopiči v rezervnih organih. Enačbe so podrobno podane v (Solidoro&al., 1997) in (Zollman&al. 2023). Glavni dejavniki modela so PAR, temperatura vode in koncentracija DIN v raztopini. Na podlagi tega, poleg variacije v biomasi in notranji koncentraciji dušika, modul omogoča izračun pretoka anorganskega dušika, potrebnega za podporo rasti alge.

Kar zadeva salicornio, v literaturi ni bilo najdenih nobenih dinamičnih modelov za simulacijo njene rasti na podlagi glavnih dejavnikov prisile, kot so PAR, temperatura zraka/vode in koncentracije DIN. Zato je bilo odločeno, da simulirajo razvoj biomase z uporabo empirične Gompertzove funkcije, en. 4.1, ki se pogosto uporablja za napovedovanje rasti rastlin.

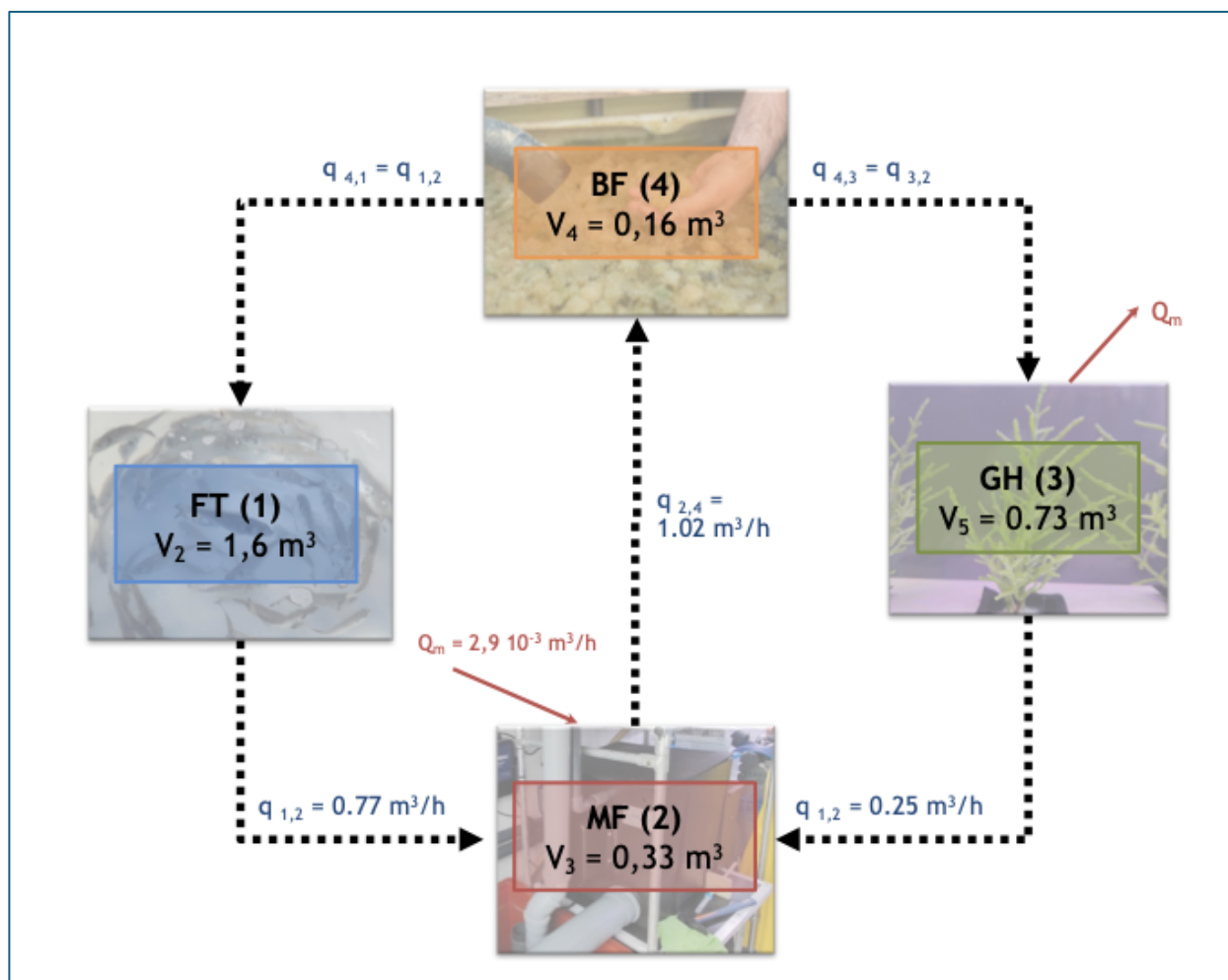
$$x_{P1} = a \exp[-b \exp(-ct)] \quad (4,1)$$

kjer je x_{P1} skupna teža rastline, »a«, »b« in »c« pa so trije parametri, ocenjeni z zmanjšanjem odstopanj med funkcijo in opazovanji, opisanimi v izsledku D1.2.1.

Biomase orad in primarnih proizvajalcev so bile ocenjene tako, da so bile povprečne posamezne teže pomnožene s številom orad in številom rastlin salicornia: slednje niso bile vključene v vektor stanja, ampak so bile izpeljane iz opazovanj, saj se pri redkih primerkih diskretno spreminjajo.

4.1.2 Definicija matrike T

Simulacija advektivnih transportnih procesov med komponentami IP-UNIVE je temeljila na shemi, predstavljeni na Slika 4-1. V primerjavi s splošno strukturo, opisano v prejšnjem poglavju, je bil zbirni rezervoar združen s prostornino rastlinjaka, GH, saj je bilo ugotovljeno, da je kakovost vode v obeh komponentah zelo podobna.



Slika 4-1: Shema IP-UNIVE, ki poudarja vodne tokove med komponentami sistema.

V tem primeru nc je " " enako 4: komponente so predstavljene kot toliko vozlišč, iz katerih vstopa in izstopa isti skupni tok vode, saj se predpostavlja, da so njihove prostornine konstantne. To je matematično izraženo z enačbo:

$$\sum_{k=1}^{nn} q_k = 0 \quad (4,2)$$

v katerem:

nn : je število povezav med komponento "j" in ostalimi.

q_k : volumetrični pretoki, ki vstopajo ali izstopajo iz komponente „j“ proti komponenti „k“. Dohodni tokovi imajo pozitiven predznak in so označeni z $q_{k,j}$. Odhodni so **negativni in označeni z $q_{j,k}$** .

Povprečne prostornine in srednje stopnje pretoka, za katere velja, da so konstantni, tvorijo elemente matrik $\mathbf{V}$ in $\mathbf{Q}$, opredeljenih v enačbi 3.4. Prikazani so na Slika 4-2: **bloki matrike $\mathbf{T}$** so podani s produktom $\mathbf{V}^{-1} \mathbf{Q}$ [$nc \times nc$], ki predstavlja pretoke vode med bloki. **Diagonalni elementi $\mathbf{Q}$ so enaki vsoti vseh izhodnih tokov in so zato negativni.** Imamo:

$$q_{11} = -q_{21}; \quad q_{22} = -q_{42} \quad q_{33} = -q_{23} \quad q_{44} = -(q_{14} + q_{34})$$

$1/V_{11} = 1/1,69$	0	0	0
0	$1/V_{22} = 1/0,33$	0	0
0	0	$1/V_{33} = 1/0,73$	0
0	0	0	$1/V_{44} = 1/0,16$

Slika 4-2: Predstavitev matrik V in Q za simulacijo transportnih procesov v akvaponskem sistemu

$q_{11} = -0,77$	0	0	$q_{14} = -11$ vprašanje
$q_{21} = -q_{11}$	$q_{22} = -1,02$	$q_{23} = -q_{33}$	0
0	0	$Q_{33} = -0,25$	$q_{34} = -q_{33}$
0	$q_{42} = -q_{22}$		$q_{44} = -(q_{14} + q_{34})$

4.1.3 Definicija matrike R

Matrika R upošteva interakcije med spremenljivkami abiotskega stanja: večina njenih elementov je nič, saj so takšne interakcije omejene na nekaj procesov. Elementi R , ki niso 0, so opisani v Tabela 4-3.

Tabela 4-3: Interakcije med spremenljivkami abiotskega stanja.

Spremenljivka	Proces	merska enota
TAN		
$R_{1,4} = -\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1}x_{2,1} + q_{3,1}x_{3,1}}{V_4} \right)$	Nitrifikacija amonijevega dušika v biofiltru	mol/h
ξ_{BF}	Učinkovitost pretvorbe biofiltra	-
NO₃		
$R_{2,4} = +\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1}x_{2,1} + q_{3,1}x_{3,1}}{V_4} \right)$	Nitrifikacija amonijevega dušika v biofiltru	mol/h
Alk		
$R_{3,4} = -2\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1}x_{2,1} + q_{3,1}x_{3,1}}{V_4} \right)$	Sprememba alkalnosti, povezana z nitrifikacijo TAN	mol/h
NAREDI		
$R_{5,4} = -2\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1}x_{2,1} + q_{3,1}x_{3,1}}{V_4} \right)$	Kisik, uporabljen pri nitrifikaciji amonijevega dušika v biofiltru	mol/h
TSS		
$R_{6,2} = -\xi_{MF} \left(\frac{q_{1,2} * x_{1,6} + q_{3,2} * x_{4,6}}{V_2} \right)$	Odstranjevanje suspendiranih trdnih snovi v mehanskem filtru.	g/h

ξ_{MF}	Učinkovitost mehanskega filtra	-
------------	--------------------------------	---

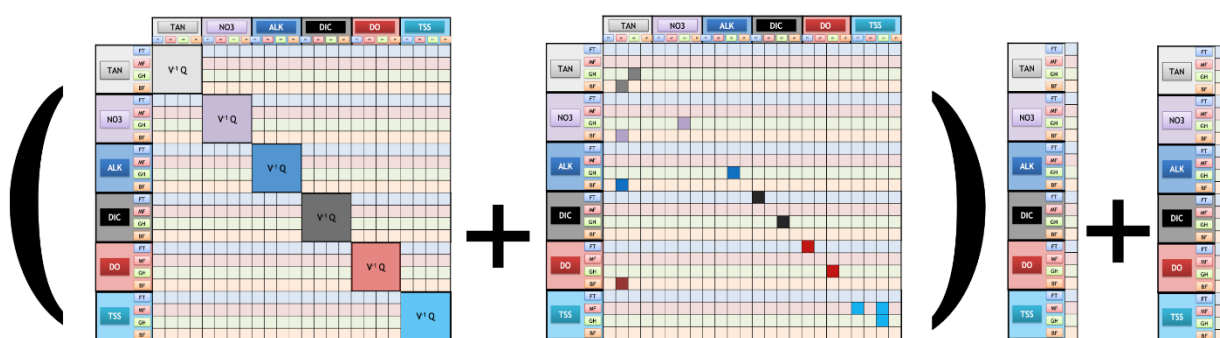
4.1. 4 Definicija vektorja g

Tokovi snovi, ki se izmenjujejo med organizmi in raztopino, so vključeni v vektor g , **saj niso odvisni od stanja raztopine, glede na hipoteze, povzete na koncu 3. poglavja**. Na podlagi njih definirani elementi g so predstavljeni v Tabela 4-4 za dve vrstici.

Tabela 4-4: Tokovi snovi med organizmi in raztopino ter med raztopino in notranjim zrakom.

Spremenljivka	Proces	merska enota
TAN		
$g_{1,1} = N_{exc} + N_{ric}$	Izločanje amonijevega dušika iz rib	$\left[\frac{mol_N}{L \cdot h} \right]$
NO3		
$g_{2,3} = N_{ass} + N_{ric}$	Asimilacija nitrata s primarnimi proizvajalci.	$\left[\frac{mol_N}{L \cdot h} \right]$
Alk		
$g_{3,1} = N_{exc} + N_{ric}$	Izločanje amonijevega dušika iz rib	$\left[\frac{mol_{eq}}{L \cdot h} \right]$
DEC		
$g_{4,1} = f_{resp} + DIC_{ric}$	Dihanje ribje biomase	$\left[\frac{mol_{DIC}}{L \cdot h} \right]$
NAREDI		
$g_{5,1} = f_{resp} + DO_{ric} + DO_{rear} + DO_{sup}$	Dihanje ribje biomase	$\left[\frac{mol_{DO}}{L \cdot h} \right]$
$g_{5,3} = -DO_{photo} + DO_{resp}$ $g_{5,3} = 0$	Morska solata: fotosinteza in dihanje Steklenica	$\left[\frac{mol_{DO}}{L \cdot h} \right]$
TSS		
$g_{6,1} = f_{fec}$	Proizvodnja ribjih iztrebkov	$\left[\frac{g_{TSS}}{L \cdot h} \right]$

Matrike, definirane v prejšnjih odstavkih, se končno uporabijo za numerično rešitev enačbe 3.1, kot je shematizirano na Slika 4-3.



Slika 4-3: Uporaba matrične enačbe 3.1 za IP-UNIVE.

4.1.5 Spremenljivke odziva

Model je bil primerjan s podatki, zbranimi s sistemom za spremljanje, ki je podrobno opisan v izsledku D1.2.1. Uporabljene spremenljivke odziva so povzete v Tabela 4-5.

Tabela 4-5: Odzivne spremenljivke, uporabljene za preverjanje delovanja dinamičnega modela.

Linija alg AL	Stopnja vzorčenja	Linija Salicornia SA	Stopnja vzorčenja
y_1 : povprečna teža posamezne orade	1/mesec	y_1 : povprečna teža posamezne orade	1/mesec
y_2 : Gostota biomase alg.	1/teden	y_2 : Gostota biomase alg.	1/mesec
y_3 : povprečna koncentracija TAN [mmol/L] v GH in BF	1/ teden	y_3 : povprečna koncentracija TAN [mmol/L] v GH in BF	1/ teden
y_4 : povprečna koncentracija NO3 [mmol/L] v GH in BF	1/ teden	y_4 : povprečna koncentracija NO3 [mmol/L] v GH in BF	1/ teden
y_5 : povprečna koncentracija DO [mmol/L] v vnosu in izhodu GH	1/15 minute	y_5 : povprečna koncentracija DO [mmol/L] v vnosu in izhodu GH	1/15 minute
y_6 : koncentracija DO [% nasičenosti] v vhodu in izhodu GH	1/15 minute	y_6 : koncentracija DO [% nasičenosti] v vhodu in izhodu GH	1/15 minute
y_7 : pH v in iz GH	1/15 minute	y_7 : pH v in iz GH	1/15 minute

4.2 IP-UNILJU modeliranje

Sistem obratovalnega nadzora v obratu, ki ga upravlja PP2, Univerza v Ljubljani, je podrobno opisan v dokumentih D1.1.1 in D1.1.2. V Tabela 4-6, podobno kot v Tabela 4-1, navedene glavne funkcije prisile.

Tabela 4-6: Funkcije prisile, spremljane v IP-UNILJU, in njihova stopnja nadzora.

	merska enota	Prizadete spremenljivke stanja	Stopnja nadzora
u_1 : dnevni obrok hrane	$g_{feed}/giorno$	Teža rib.	Obvladljiv
u_2 : izmenjava vode	m^3/h	Prostornina raztopine in koncentracija suspendiranih in raztopljenih snovi.	Obvladljiv
u_3 : črpanje zraka	m^3/h	Koncentracije raztopljenega kisika in ogljikovega dioksida.	Obvladljiv
u_4 : temperatura vode.	$^{\circ}C$	Vse biotske spremenljivke.	Na podlagi hipotez, navedenih na koncu 3. poglavja, se šteje za neobvladljivo.
u_5 : notranja temperatura zraka.	$^{\circ}C$	Rastlinska biomasa z modulacijo fotosinteze.	Na podlagi predpostavk, navedenih na koncu 3. poglavja, se šteje za neobvladljivo.
u_6 : notranja relativna vlažnost.	%	Prostornina vode, skozi stopnjo izhlapevanja vode,	Na podlagi predpostavk, navedenih na koncu 3. poglavja, se šteje za neobvladljivo.
u_7 : Intenzivnost sončnega obsevanja.	W/m^2	Biomasa rastlin in alg skozi proces fotosinteze.	Neobvladljivo.

4.2.1 Dinamika biotskih spremenljivk

V obratu IP-UNILJU, glej dokument D1.1.1, koprodukcija:

- Šarenka
- Solata, sorta Salanova

V obdobju marec 2024 – februar 2025 je bilo eksperimentiranje v zvezi s Salanovo izvedeno med 15. marcem in 18. majem 2025. Model je bil torej uporabljen v tem časovnem oknu. Spremenljivke biotskega stanja so navedene v Tabela 4-7.

Tabela 4-7: Spremenljivke biotskega stanja, obravnavane v IP-UNILJU.

Biotska spremenljivka stanja
x_{F1} : povprečna posamezna teža postrvi [g]
X_{F2} : Število postrvi
x_{P1} : povprečna teža rastline solate [g]
X_{P2} : število rastlin

Biomasi postrvi in solate smo ocenili z množenjem posameznih povprečnih uteži s številom orad oziroma številom rastlin solate: slednje niso bile vključene v vektor stanja, temveč izpeljane iz opazovanj, saj se pri redkih primerkih diskretno spreminjajo.

Časovni razvoj povprečne teže postrvi je bil simuliran z uporabo dinamičnega modela, ki izračunava rast na podlagi energetske bilance. Enačbe so podrobno opisane v (Bolzonella&al., 2024). Poleg izračuna spremembe teže kot funkcije krmnega obroka in temperature vode model zagotavlja:

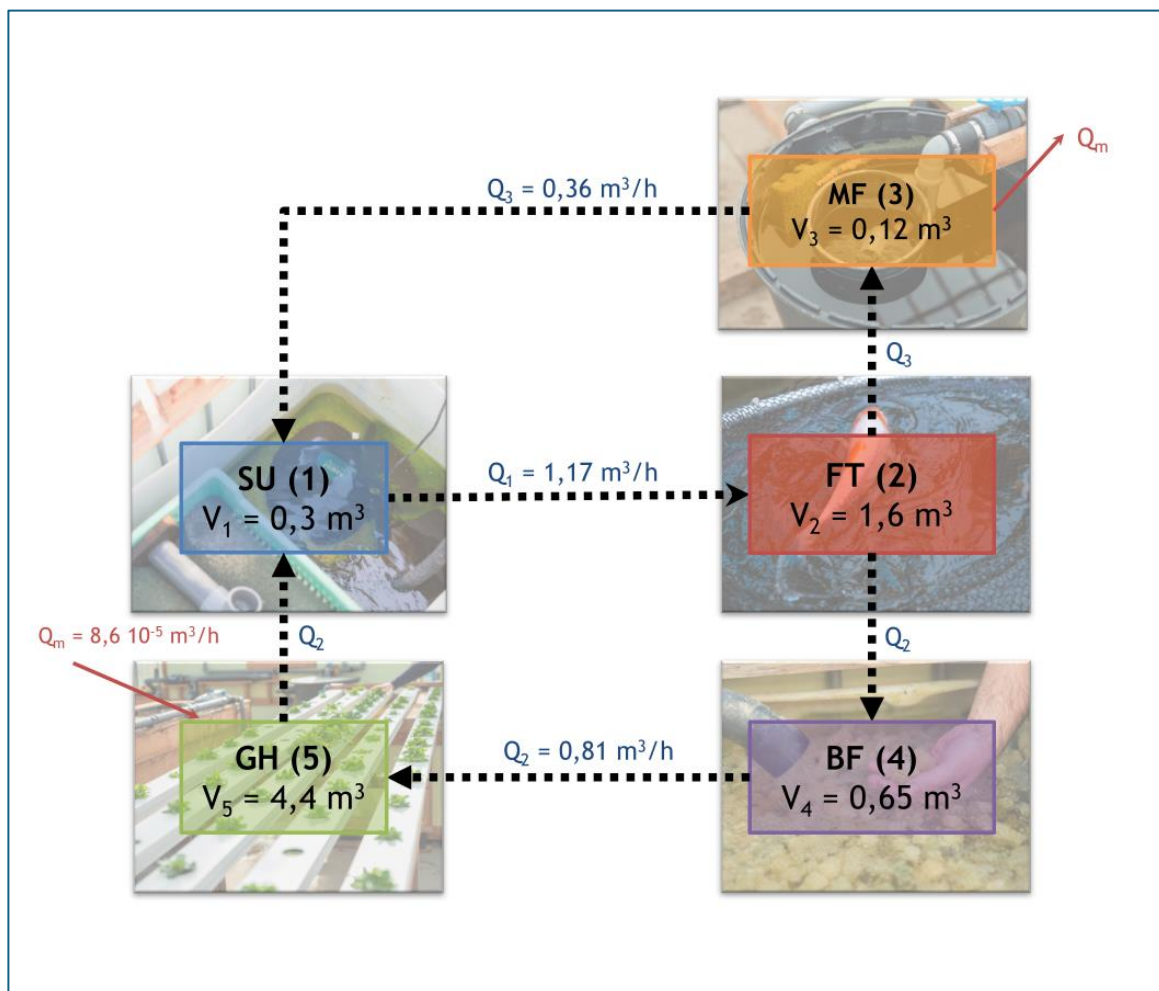
- potreba po kisiku in sproščanje ogljikovega dioksida, povezana z dihanjem rib
- izločanje amoniakovega dušika, povezano s presnovo beljakovin
- izločanje blata.

Ti materialni tokovi predstavljajo vhodne podatke za modul, ki simulira razvoj abiotskih spremenljivk.

Časovni razvoj sveže teže rastline solate je bil simuliran z uporabo dinamičnega modela, ki simulira razvoj organskega ogljika v listih in koreninskem sistemu (Ioslovich&al., 2002). Model izračuna stopnjo rasti glede na intenzivnost PAR in temperaturo zraka ob predpostavki, da je koncentracija DIN v raztopini vedno zadostna za zadovoljitev povpraševanja rastline, sorazmerno z ogljikom, fiksiranim s fotosintezo. Ta hipoteza je skladna s tem, kar je bilo predpostavljeno v 3. poglavju. Teža ogljika se nato pretvori v svežo težo ob upoštevanju povprečnega odstotka vode, ki jo vsebuje Salanova. Poleg variacije biomase in notranje koncentracije dušika modul omogoča tudi izračun pretoka anorganskega dušika, ki je potreben za podporo rasti solate: ocenjuje se ob predpostavki, da je odstotek beljakovin v rastlini konstanten, enak 1,3 % sveže teže.

4.2.2 Definicija matrike T

Simulacija advektivnih transportnih procesov med komponentami IP-UNILJU je temeljila na shematizaciji, predstavljeni na Slika 4-4, podobno kot na Slika 4-1: v tem primeru, kot je razvidno, je "nc" enako 5.



Slika 4-4: Shema IP-UNILJU, ki poudarja vodne tokove med komponentami sistema.

4. 2.3 Definicija matrike R

Tabela 4-8: Interakcije med spremenljivkami abiotskega stanja.

Spremenljivka	Proces	merska enota
TAN		
$R_{1,4} = -\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1}x_{2,1}}{V_4} \right)$	Nitrifikacija amonijevega dušika v biofiltru	mol/h
ξ_{BF}	Učinkovitost pretvorbe biofiltra	-
NO3		
$R_{2,4} = +\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1}x_{2,1}}{V_4} \right)$	Nitrifikacija amonijevega dušika v biofiltru	mol/h
Alk		
$R_{3,4} = -2\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1}x_{2,1}}{V_4} \right)$	Sprememba alkalnosti, povezana z nitrifikacijo TAN	mol/h
NARED1		
$R_{5,4} = -2\xi_{BF} \left(\frac{q_{2,1}x_{2,1}}{V_4} \right)$	Kisik, uporabljen pri nitrifikaciji amonijevega dušika v biofiltru	mol/h
TSS		
$R_{6,3} = -\xi_{MF} \left(\frac{q_{2,3} * x_{2,6}}{V_3} \right)$	Odstranjevanje suspendiranih trdnih snovi v mehanskem filtru.	g/h
ξ_{MF}	Učinkovitost mehanskega filtra	-

4.2.4 Definicija vektorja g

Definirani elementi g so predstavljeni v Tabela 4-9 analogno Tabela 4-4.

Tabela 4-9: Tokovi snovi med organizmi in raztopino ter med raztopino in notranjim zrakom.

Spremenljivka	Proces	Enota
TAN		
$g_{1,2} = N_{exc} + N_{ric}$	Izločanje amonijevega dušika iz rib	$\left[\frac{mol_N}{L \cdot h} \right]$
NO3		
$g_{2,5} = N_{ass} + N_{ric}$	Asimilacija nitrata s primarnimi proizvajalci.	$\left[\frac{mol_N}{L \cdot h} \right]$
Alk		
$g_{3,2} = N_{exc} + N_{ric}$	Izločanje amonijevega dušika iz rib	$\left[\frac{mol_{eq}}{L \cdot h} \right]$
DEC		
$g_{4,2} = f_{resp} + DIC_{ric}$	Dihanje ribje biomase	$\left[\frac{mol_{DIC}}{L \cdot h} \right]$
NARED1		
$g_{5,2} = f_{resp} + DO_{ric} + DO_{rear} + DO_{sup}$	Dihanje ribje biomase	$\left[\frac{mol_{DO}}{L \cdot h} \right]$
TSS		
$g_{6,2} = f_{fec}$	Proizvodnja ribjih iztrebkov	$\left[\frac{g_{TSS}}{L \cdot h} \right]$

4.2.5 Spremenljivke odziva

Model smo primerjali s podatki, ki jih je zbral sistem za spremljanje, ki je podrobno opisan v dokumentu D1_1_1. Uporabljene spremenljivke odziva IP-UNILJU so povzete v tabeli 4.10

Tab. 4.10 Odzivne spremenljivke, ki se uporabljajo za preverjanje delovanja dinamičnega modela.

Spremenljivke odziva	Stopnja vzorčenja
y_1 : povprečna teža posamezne postrvi	1/mesec
y_2 : Povprečna teža rastlin solate	Ob trgatvi
y_3 : povprečna koncentracija TAN [mmol/L] v SU in FT	1/ teden
y_4 : povprečna koncentracija NO3 [mmol/L] v SU in FT	1/ teden
y_5 : koncentracija DO [mmol/L] v FT	1/10 minute
y_6 : koncentracija DO [% nasičenosti] v FT	1/10 minute
y_7 : pH v FT	1/5 minut

5. REZULTATI

Dinamični model, ki je sestavni del prototipa Digital Twin, smo testirali z uporabo v treh koprodukcijah:

- Orada in solata;
- Orada in kozarček;
- Šarenka in solata, sorta Salanova

Rezultati so predstavljeni ločeno v nadaljevanju poglavja.

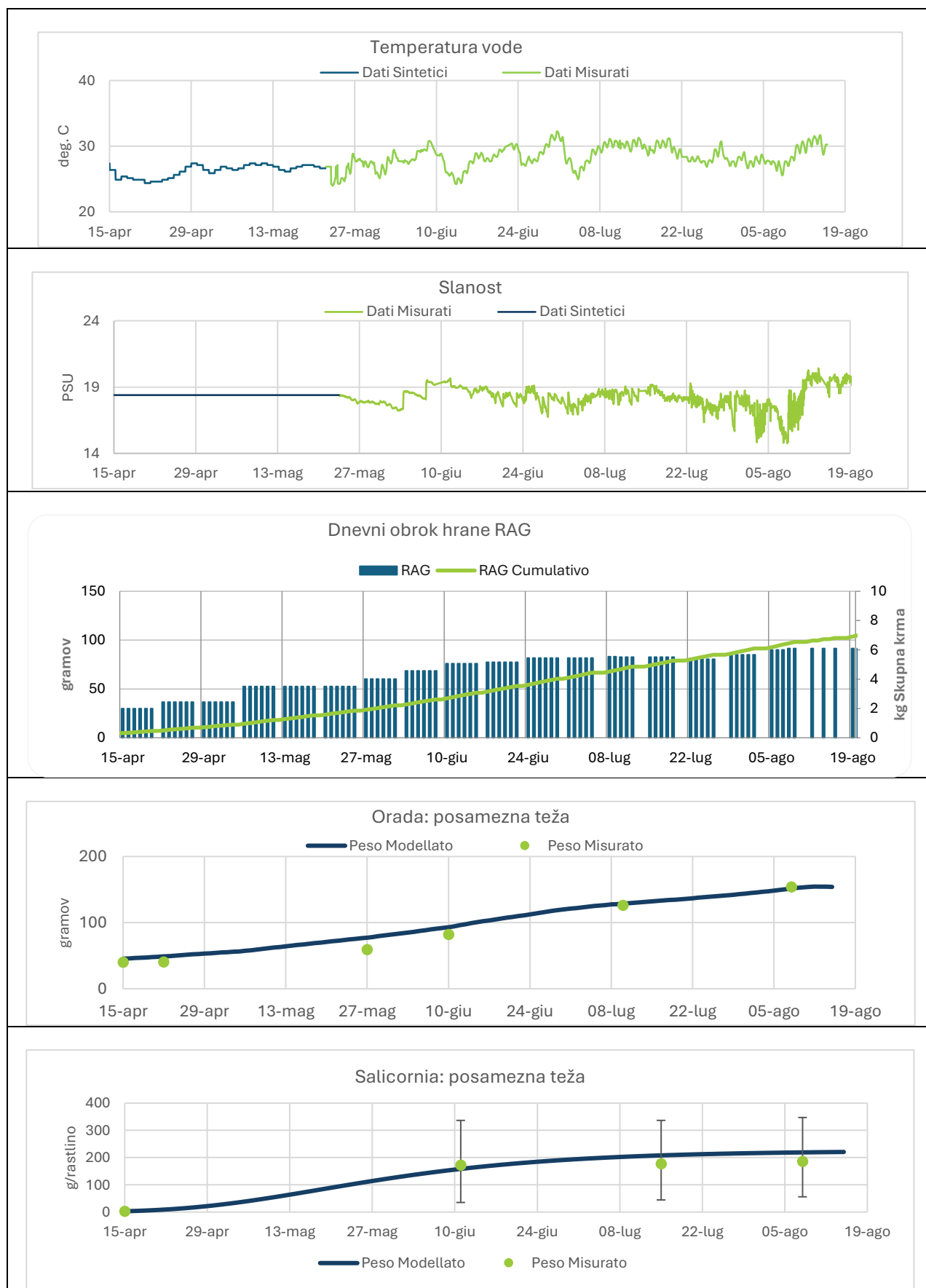
5.1 IP-UNIVE: Orada in kozarček

Eksperimentiranje soproizvodnje orade in steklanke je dalo zelo zanimive rezultate, ki so podrobno opisani v izročilu D1.2.1. Model je bil apliciran na obdobje 15. april – 15. avgust 2024, v katerem je bila izmenjava vode omejena. Začetni pogoji, izpeljani iz ocen in opazovanj, so navedeni v Tabela 5-1.

Tabela 5-1: Začetni pogoji, uporabljeni za simulacijo delovanja linije salicornia.

Biotske spremenljivke	Vrednost	Enota	Izvor
Steklenica			
Povprečna začetna teža	3	gramov	cenjeni
Število posameznikov	20	rastlina	opazili
Območje	1	m ²	opazili
Orada			
Povprečna začetna teža	45.3	gramov	opazili
Število posameznikov	37	ribe	opazili
Abiotske spremenljivke	Vrednost	Enota	Izvor
TAN	2.77E-03	mmol-N/L	cenjeni
NO3	0,270	mmol-N/L	cenjeni
Alkalnost	4.74	mmol _{eq} /L	cenjeni
DEC	4.84	mmol/L	cenjeni
NAREDİ	0,219	mmol/L	cenjeni
TSS	0	mg/L	cenjen

Slike Slika 5-1siljenja in krivulje rasti srednje teže rastlin orade in salicornia v primerjavi z opazovanji. Kot je razvidno, model pravilno simulira razvoj povprečnih tež orade in steklanke.

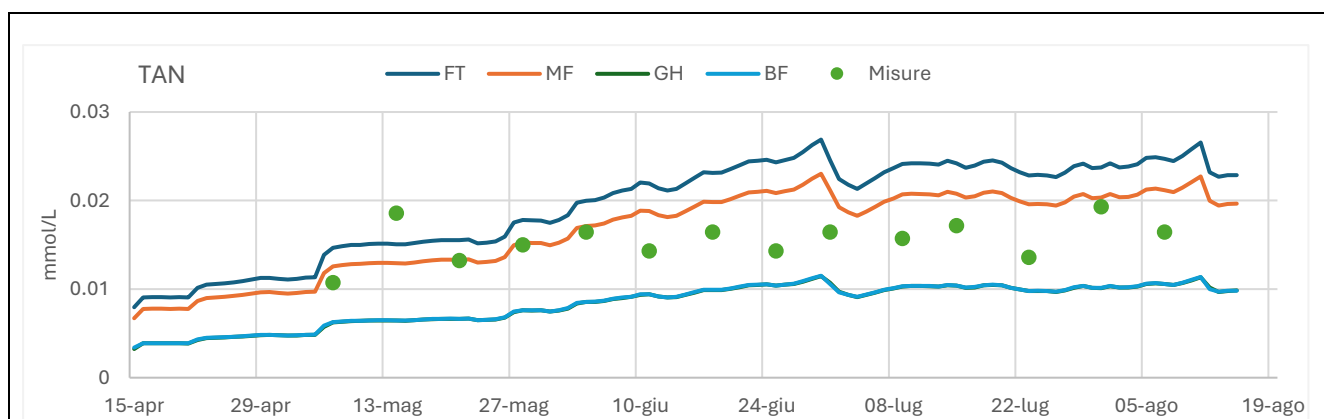


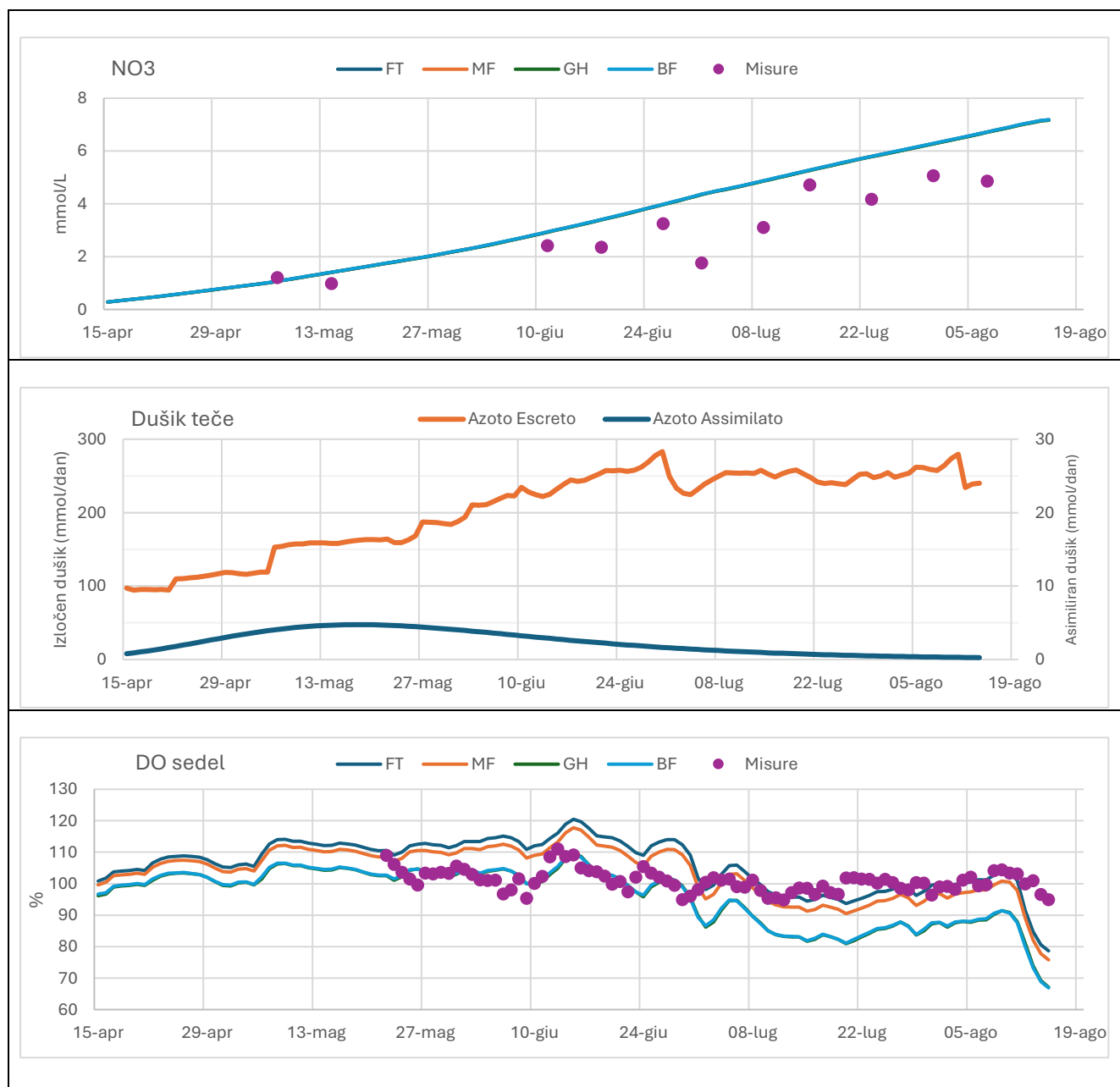
Slika 5-1: Razvoj prisilnih funkcij in biotskih spremenljivk v štirimesečnem obdobju, simuliranem z digitalnim dvojčkom

V prvih dveh mesecih je rastlinska biomasa rasla skoraj eksponentno pri določeni dnevni stopnji rasti ali SGR približno 7 %. Opazovanja kažejo visoko variabilnost: v perspektivi to kaže na možnost izbire rastlin, za katere je značilna najvišja stopnja rasti, enaka 8 %/dan. V simuliranem obdobju se je povprečna teža orade povečala s 40 na 150 gramov, kar je v skladu s povečanjem, opaženo v komercialnih obratih. Temperature vode so julija in avgusta dosegle in presegle 30 °C, vendar se zdi, da to ni povzročilo pretiranega stresa za ribe, ki so bile v okolju z dobro oksigenacijo in nizko gostoto. Slanost je ostala skoraj konstantna, pri vrednostih, ki so jih dobro prenašale tako ribe kot salicornia.

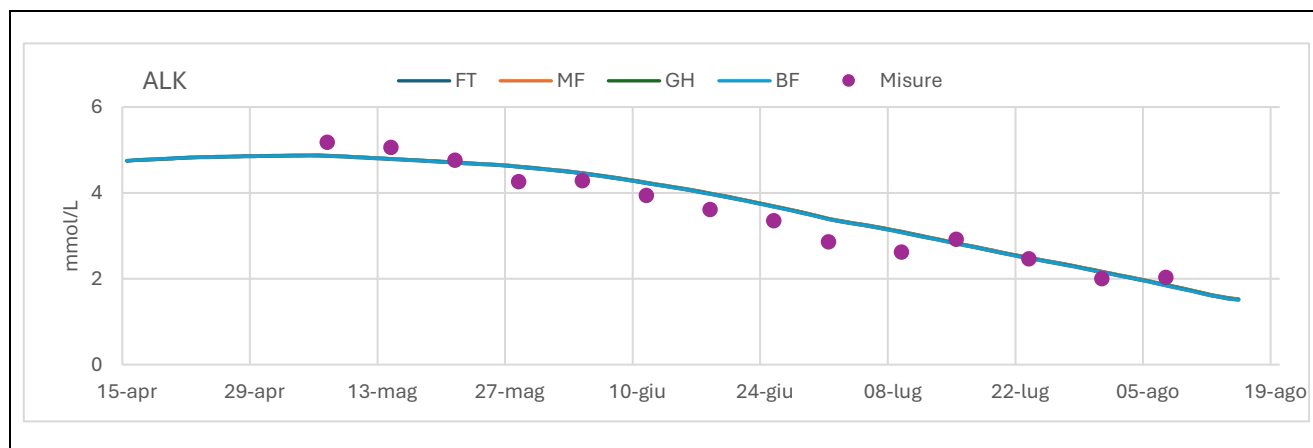
Razvoj simuliranih in opazovanih abiotskih spremenljivk in pH je prikazan na Slika 5-2 in Slika 5-3, ki predstavljata simulirane koncentracije v štirih komponentah sistema, glej Slika 4-1, v primerjavi s spremenljivkami odziva, opredeljenimi v Tabela 4-5: Odzivne spremenljivke, uporabljene za preverjanje delovanja dinamičnega modela.. Model pravilno reproducira kompleksno dinamiko šestih spremenljivk, na katere vpliva metabolizem biotskih spremenljivk, pa tudi kemična ravnovesja. Slika Slika 5-2, saj v akvaponskem sistemu prihaja do izgub dušika, ki jih je težko kvantificirati: lahko bi jih upoštevali z uvedbo korekcijskega izraza v modelu. Koncentracija TAN kaže najvišje vrednosti v rezervoarju za vzrejo rib: učinek biofiltra na njeno zmanjšanje je jasen. Analiza pretokov dušika v raztopino in iz nje, predstavljena v tretjem grafu, poudarja, da je obdelana površina sposobna asimilirati le majhen del dušika, izločenega s presnovno aktivnostjo rib: **te informacije je mogoče uporabiti za pravilno velikost akvaponičnega sistema**. Končno je simulirana koncentracija raztopljenega kisika nekoliko nižja v biofiltru, kjer ga uporabljajo bakterije v reakciji nitrifikacije, vendar naprava za prisilno prezračevanje še vedno zadostuje, da zagotovi ravni zelo blizu nasičenosti, torej optimalne za dihanje rib in rastlinskih korenin, ki jih model dobro simulira.

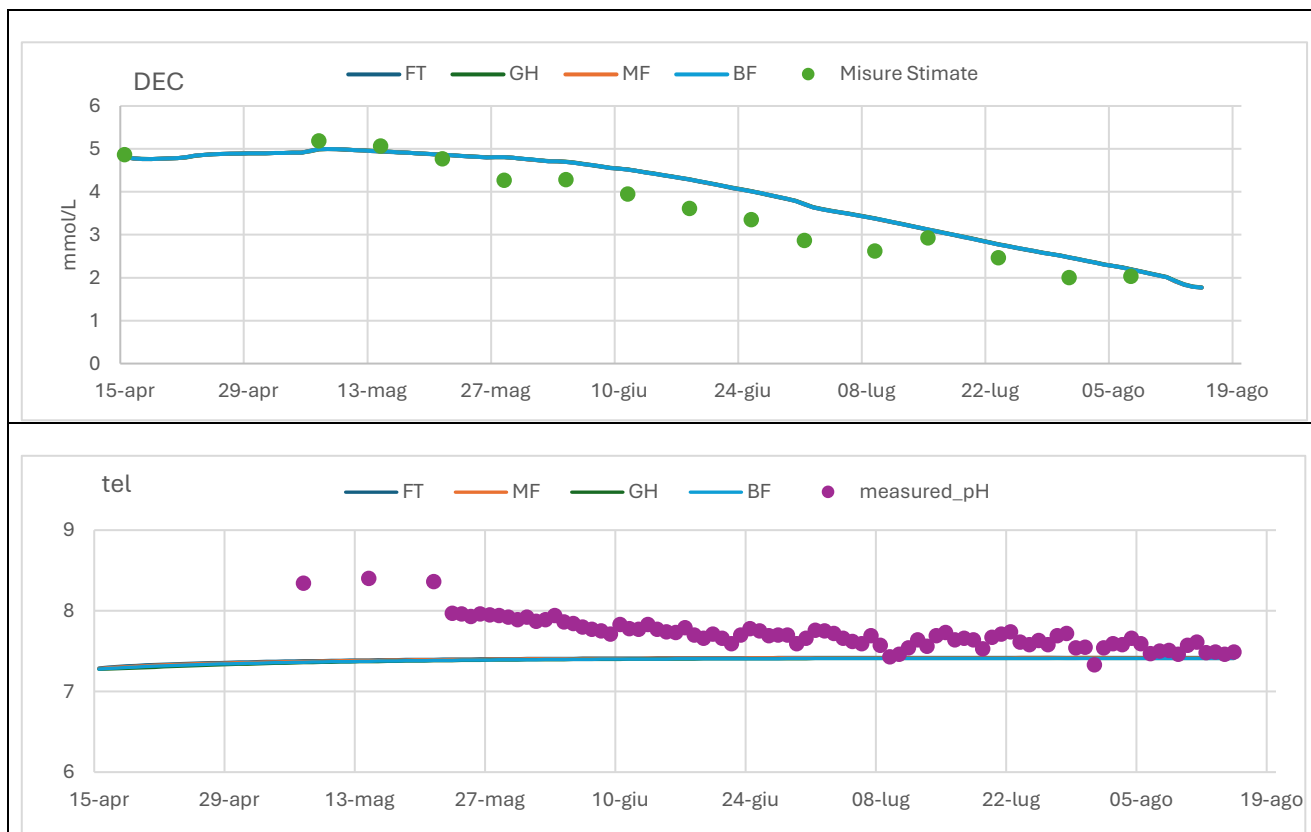
Drugi dve spremenljivki stanja, ALK in DIC, vplivata na kislost raztopine. Kot je razvidno iz Slika 5-3, se alkalnost s časom zmanjšuje, saj reakcija nitrifikacije zmanjša amonijev dušik in s tem tudi alkalnost raztopine, v skladu z enačbo 2.1. Koncentracija raztopljenega anorganskega ogljika je odvisna od sproščanja ogljikovega dioksida, ki je v glavnem povezan z dihanjem rib in izmenjavo z atmosfero: v prisotnosti prisilnega prezračevanja sistem teži k termodinamičnemu ravnovesju, ki se vzpostavi pri vrednostih, nižjih od vrednosti raztopine: zato se DIC zmanjša. Dosledno se zniža tudi pH: simulirane vrednosti so nekoliko višje od tistih, opaženih v prvem delu simulacije, nato pa se uskladijo s podatki.





Slika 5-2: Razvoj koncentracij TAN, nitrata, pretoka dušika, ki ga izločajo ribe in ga asimilira salicornia, raztopljenega kisika v 4 komponentah akvaponičnega sistema IP-UNIVE.





Slika 5-3: Razvoj koncentracij alkalnosti, raztopljenega anorganskega ogljika in vrednosti pH v 4 komponentah akvaponičnega sistema IP-UNIVE.

5.2 IP-UNIVE: Orada in morska solata

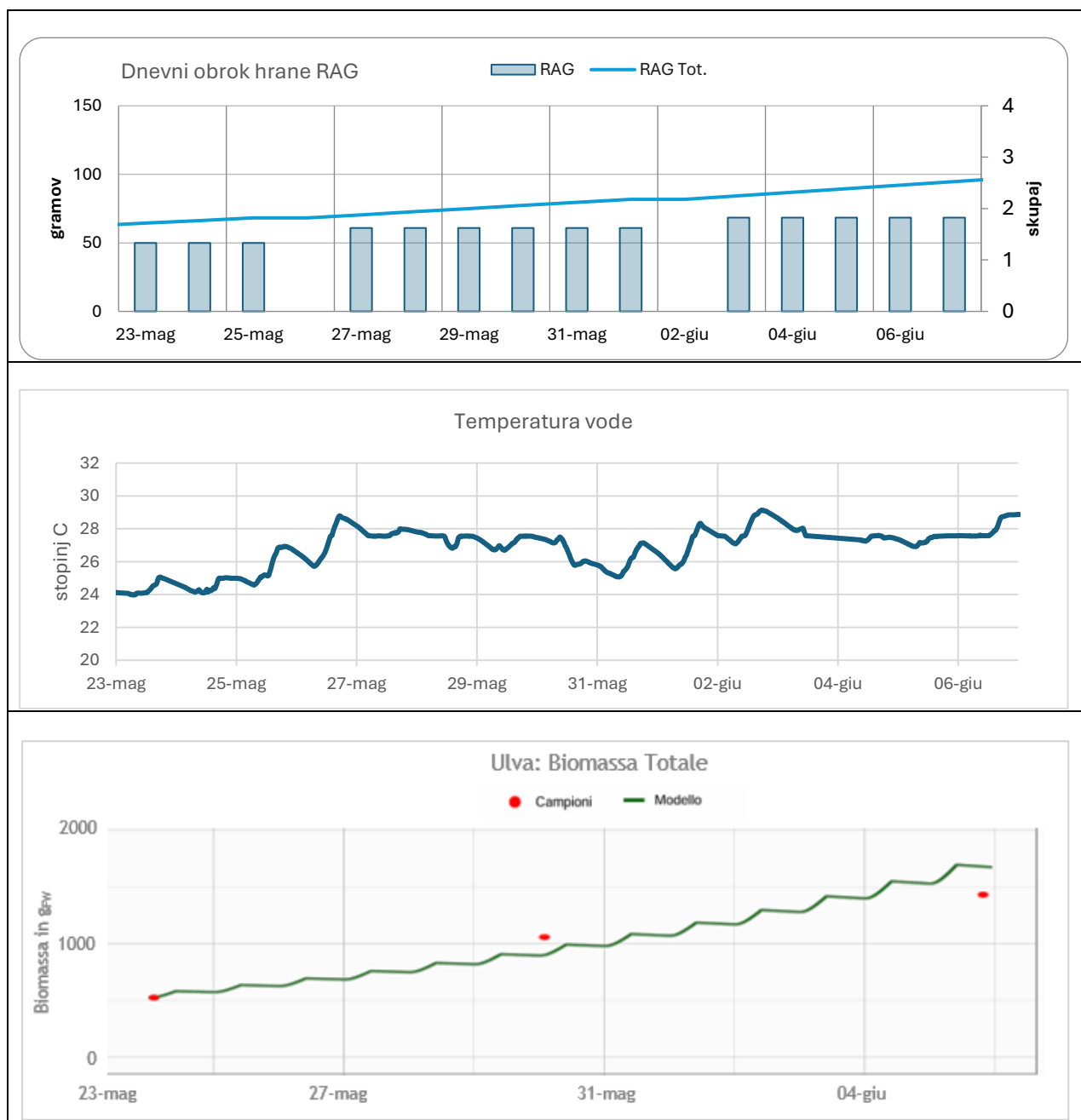
Eksperimentiranje soproizvodnje orade in morske solate je dalo zanimive rezultate, vendar omejeno na precej ozko časovno obdobje, med aprilom in junijem: v zvezi s tem glej izsledek D1.2.1. Model je bil uporabljen za obdobje od 3. maja do 5. julija 2024, v katerem so alge pokazale največjo rast: kot primer so navedeni rezultati, dobljeni za proizvodni cikel, ki je trajal dva tedna. Začetni pogoji, izpeljani iz ocen in opazovanj, so navedeni v tabeli 5.3.

Tab. 5.3 Začetni pogoji, uporabljeni za simulacijo delovanja linije salicornia.

Biotske spremenljivke	Vrednost	Enota	Izvor
Ulva			
Začetna biomasa	524	gramov	opazili
Območje	1	m ²	opazili
Orada			
Povprečna začetna teža	45.3	gramov	opazili
Število posameznikov	37	ribe	opazili
Abiotske spremenljivke	Vrednost	Enota	Izvor
TAN	2.77E-03	mmol-N/L	cenjeni
NO ₃	0,270	mmol-N/L	cenjeni
Alkalnost	4.74	mmol _{eq} /L	cenjeni
DEC	4.84	mmol/L	cenjeni
NAREDİ	0,219	mmol/L	cenjeni

TSS	0	mg/L	cenjeni
-----	---	------	---------

Slika 5-4orade linije AL povečala z 42,4 na 55,8 grama, kar kaže na dnevno stopnjo rasti, podobno tisti pri liniji, namenjeni gojenju salicornia . Kot je razvidno, je biomasa makroalg eksponentno rasla pri določeni dnevni stopnji rasti ali SGR približno 5 %: čas podvojitve je bil torej približno 14 dni. Model pravilno simulira razvoj dveh biotskih spremenljivk: to kaže, da je struktura, opisana v 3. poglavju, dovolj prožna in robustna. Čeprav je morska solata v ozkem časovnem obdobju rasla hitro, bi lahko visoke stopnje rasti uporabili za povečanje proizvodnje spomladi in nato ohranili proizvod za distribucijo skozi vse leto. Abiotske spremenljivke so pokazale podobne evolucije kot tiste, poudarjene na Slika 5-2in Slika 5-3in tukaj niso reproducirane.



Slika 5-4: Razvoj krmnega obroka, temperature vode in gostote biomase morske solate.

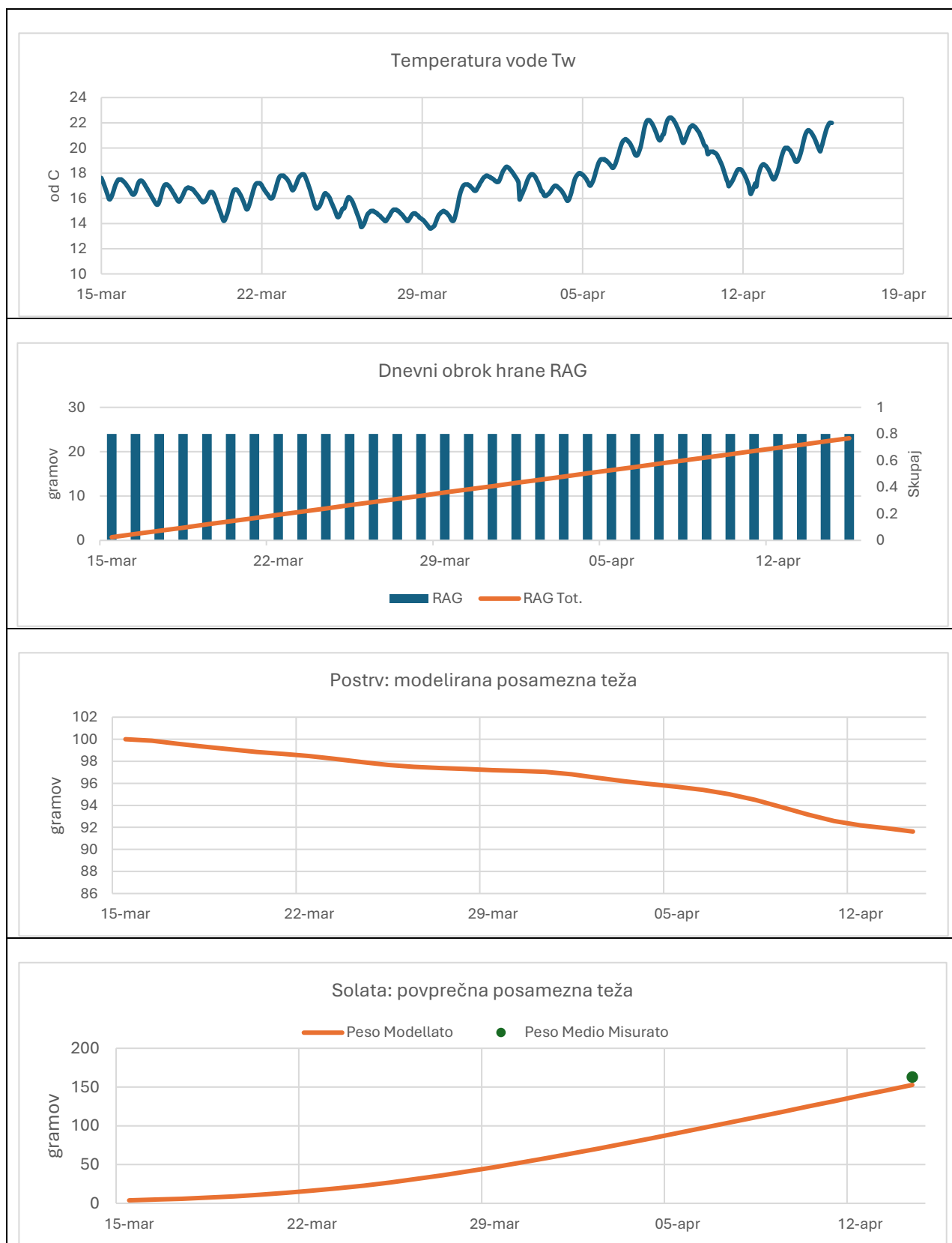
5.3 IP-UNILJU: Šarenka in solata

Poskus soprodelave šarenke in solate sorte Salanova je bil izveden v obdobju 15. 3. – 15. 4. 2024, v katerem je bil mesečni cikl pridelave solate v celem obratu. Začetni pogoji, izpeljani iz ocen in opazovanj, so navedeni v tabeli 5.4. V tem obdobju je bilo v sistemu prisotnih tudi 12 primerkov koi krpa s skupno biomaso 2,63 kg. Izločanje dušika pri tej vrsti je bilo parametrirano ob predpostavki, da 1 kg krme proizvede 0,047 kg NH₃, glede na dos Santos&al., 2022. Skupno je bilo danih 48 g krme na dan.

Tab. 5.4 Začetni pogoji, uporabljeni za simulacijo delovanja linije salicornia.

Biotske spremenljivke	Vrednost	Enota	Izvor
Solata			
Povprečna začetna teža	3	gramov	opazili
Število posameznikov	20	rastlina	opazili
Območje	10	m ²	izmerjeno
postrv			
Začetna teža (povprečje)	100	gramov	opazili
Število posameznikov	50	ribe	opazili
Abiotske spremenljivke	Vrednost	Enota	Izvor
TAN	7.86E-02	mmol-N/L	cenjeni
NO ₃	1.11	mmol-N/L	cenjeni
Alkalnost	4.74	mmol _{eq} /L	cenjeni
DEC	4.84	mmol/L	cenjeni
NARED1	0,30	mmol/L	cenjeni
TSS	0	mg/L	cenjeni

Na sliki Slika 5-5siljenja in rastne krivulje srednje teže rastlin orade in solate v primerjavi z opazovanji. V obratu so solato gojili po treh metodologijah: DWC, NFT, MFB. Pridelki so bili precej različni: najboljši so bili doseženi z metodologijo DWC. Model kaže, da je rastlinska biomasa rasla skoraj eksponentno pri določeni dnevni stopnji rasti ali SGR približno 13 %. Vendar postrvi niso bile dovolj krmljene: v simuliranem obdobju je povprečna teža postrvi padla s 100 na 92 gramov.

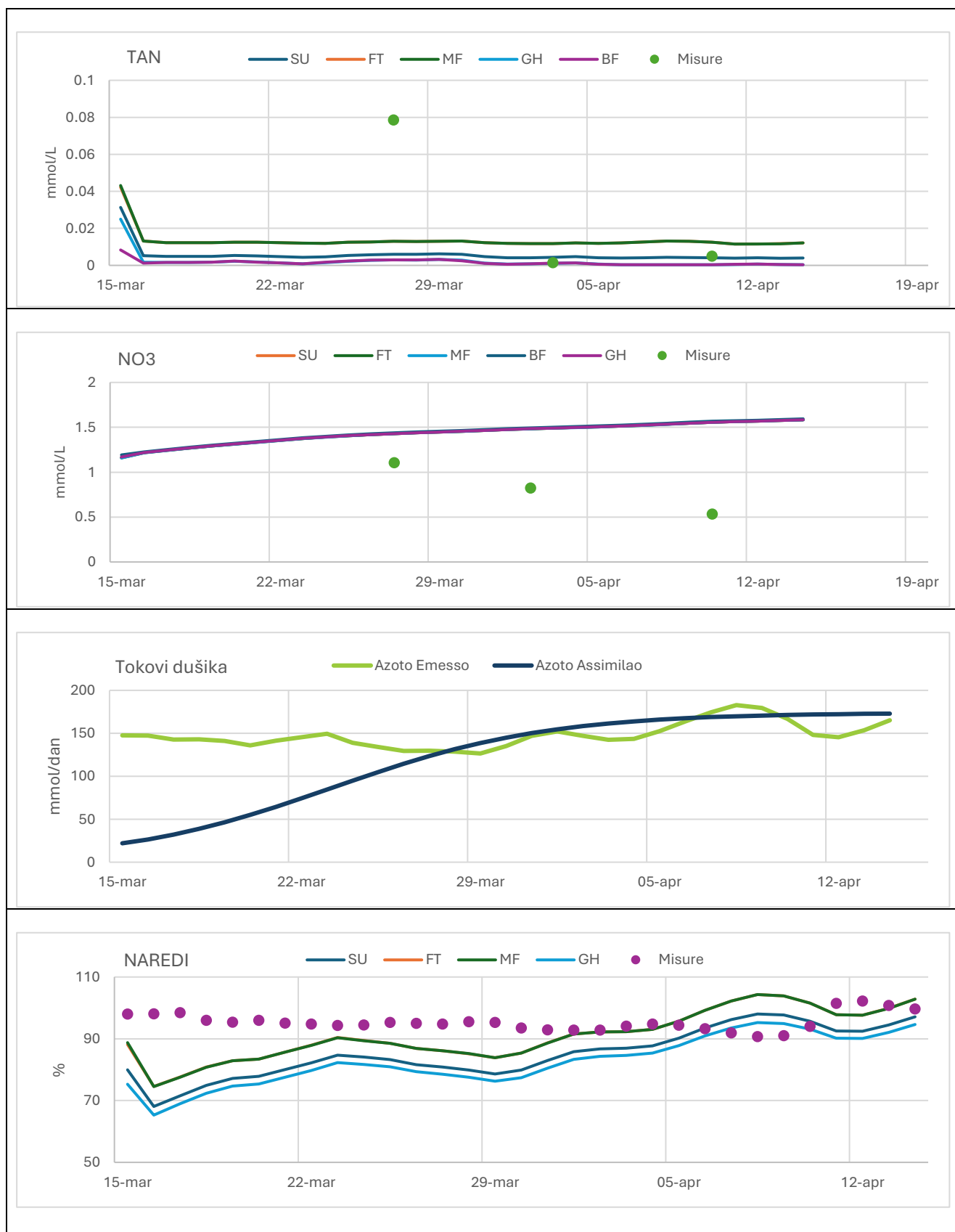


Slika 5-5: Razvoj krmnega obroka, temperature vode, povprečne teže postrvi, povprečne posamezne teže rastline solate, gojene v DWC, in pretoka dušika od rib do raztopine in od raztopine do rastlin, ob predpostavki enake produktivnosti treh sistemov.

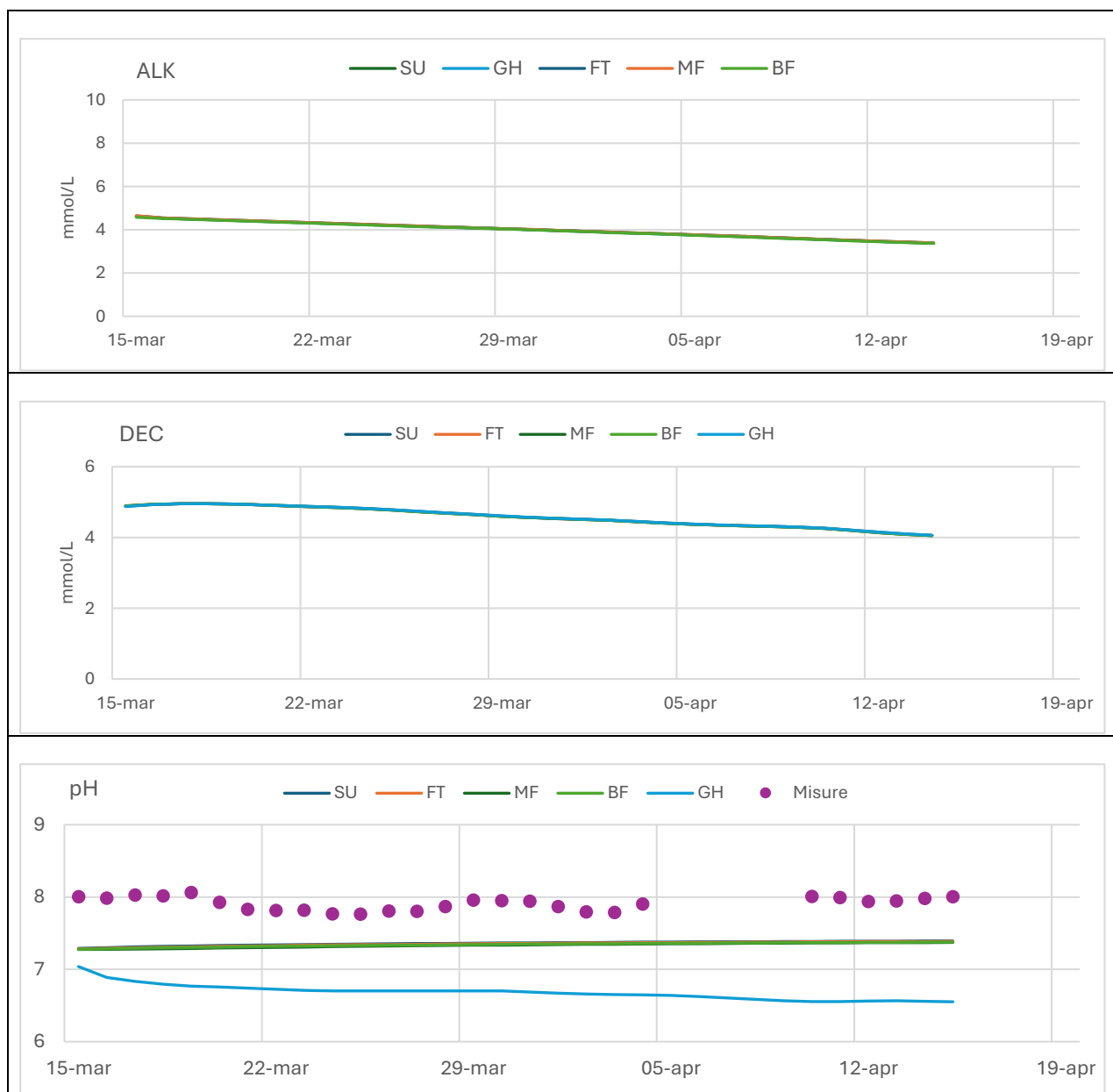
Razvoj simuliranih in opazovanih abiotских spremenljivk in pH je prikazan Slika 5-6. Slika Slika 5-6TAN, ki ga aktivnost biofiltra vzdržuje pri nizkih koncentracijah. Namesto tega je koncentracija nitratov precenjena: opazovanja kažejo zmanjšanje, medtem ko simulacija kaže

približno konstantno raven. Ta rezultat je mogoče razložiti z opazovanjem primerjave med pretokom dušika, ki ga izločajo ribe, in pretokom dušika, ki ga asimilira zelena solata, prikazano v tretjem grafu: oba izraza se uravnovesita proti koncu cikla in zato se koncentracija v raztopini malo spremeni. Spet je treba domnevati, da akvaponski sistem izgublja dušik: glej (Sumeth&al., 2017) za pregled procesov, ki lahko prispevajo k izgubi. Simulirana koncentracija raztopljenega kisika se ujema z opazovano, ki ostaja skoraj konstantna in zelo blizu ravni nasičenosti.

Kar zadeva druge spremenljivke, ni primerjav z alkalnostjo, vendar se zdi njen razvoj verjeten: model dejansko napoveduje zmanjšanje te spremenljivke v odsotnosti izmenjave vode ali dodajanja bazičnih spojin, saj reakcija nitrifikacije zmanjša koncentracijo NH_3 in poveča pH. Slednje predstavlja sistematično negativno razliko glede na podatke: pomanjkanje eksperimentalnih informacij o alkalnosti otežuje njihovo razlago.



Slika 5-6: Razvoj koncentracije TAN, nitrata in raztopljenega kisika v 5 komponentah akvaponičnega sistema IP-UNILJU.



Slika 5-7: Razvoj koncentracij alkalnosti, raztopljenega anorganskega ogljika in vrednosti pH v 5 komponentah akvaponičnega sistema IP-UNILJU.

6. SKLEPI

Rezultati, predstavljeni v prejšnjem poglavju, nakazujejo zaključke, ki so povzeti spodaj.

- Struktura modela dinamičnega akvaponičnega sistema, identificiranega med projektom BeBlue, je inovativna in razširja načela natančnega ribogojstva na to vrsto krožne agroživilske proizvodnje.
- Model odpira pot digitalizaciji akvaponskih sistemov in njihovi optimizaciji tako glede njihove zasnove kot upravljanja, ki temelji na dinamični kvantifikaciji masnih bilanc glavnih makroelementov, zlasti dušika.
- Simulacija kemijskih ravnovesij v raztopini poleg tokov snovi, ki se izmenjujejo med gojenimi organizmi in raztopino, omogoča ovrednotenje kislosti raztopine in jo s tem uravnavanje z dodajanjem bazičnih ali kislih spojin.
- Uporaba istega modela v treh študijah primerov, raziskanih v pilotnih obratih, ki jih upravljata LP, UNIVE in PP2, UNILJU, poudarja njegovo sposobnost pravilne simulacije dinamike različnih akvaponičnih sistemov, vključno z dvema linijama morske akvaponike, v katerih so bili proizvedeni: 1) orade in salicornia; 2) orada in solata. Ta vrsta akvaponike je popolnoma nova za programsko območje.
- Dobra učinkovitost modela v treh pilotnih primerih priča o fleksibilnosti njegove splošne strukture: to pomeni, da je z razporeditvijo rastnih modulov za različne ribje in rastlinske vrste mogoče simulirati dinamiko velikega števila kombinacij akvaponičnih izdelkov.
- V prihodnje bo model lahko zagotovil še bolj zanimive zmogljivosti, zlasti na ravni upravljanja, z uvedbo algoritmov za asimilacijo podatkov: na ta način bo mogoče dokončati delo, začeto v BeBlue, s prehodom od prototipa Digital Twin, ki je opisan tukaj, do delujočega Digital Twin, prilagojenega različnim poslovnim potrebam.

7. Bibliografija

Bolzonella, 2024. Development and application of mathematical models for the implementation of the Precision Fish Farming approach. Tesi di Dottorato, Univ. Ca' Foscari Venezia.

Bolzonella, M., R. Rizzi, R. Pastres, R. Modelling system for the eco-intensification of a seabass and seabream inland fish farming. Deliverable D4.2 NewTechAqua H2020 project. <https://cordis.europa.eu/project/id/862658>.

Brigolin D., R. Pastres, P. Tomassetti, S. Porrello, 2010. Modelling the biomass yield and the impact of seabream mariculture in the Adriatic and Tyrrhenian Seas (Italy). *Aquacult Int* (2010) 18:149–163 DOI 10.1007/s10499-008-9232-4

dos Santos, A. M., Bernardino, L. F., Attramadal, K. J. K., & Skogestad, S. (2023). Steady-state and dynamic model for recirculating aquaculture systems with ph included. *Aquacultural Engineering*, 102, 102346. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2023.102346>

Fore M., Frank K., Norton T., Svendsen E., Alfredsen J.O., Dempster T., Eguiraun H., Watson W., Stahl A., Sunde L.M., Schellewald C., Skoien K.R., Alver M.O., Berckmans D., 2018. Precision fish farming: a new framework to improve production in aquaculture. *Biosyst Eng* 173:176–193. <https://doi.org/10.1016/j.biosysteng.2017.10.014>

M. Føre, M. O. Alver, J. A. Alfredsen, A. Rasheed, T. Hukkelås, H. V. Bjelland, B. Su, S. J. Ohrem, E. Kelasidi, T. Norton, N. Papandroulakis, 2024. Digital Twins in intensive aquaculture—Challenges, opportunities and future prospects. *Computers and Electronics in Agriculture* 218 (2024) 108676. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.108676>

Ioslovich, I., Seginer I., Baskin, 2002. A. Fitting the Nicolet Lettuce Growth Model to Plant-spacing Experimental Data *Biosystems Engineering* (2002) 83 (3), 361–371. doi:10.1016/S1537-5110(02)00197-6

O'Leary, J. W., Glenn, E. P., & Watson, M. C. (1985). Agricultural production of halophytes irrigated with seawater. *Biosalinity in Action: Bioproduction with Saline Water*, 311–321. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5111-2_21

Royer, E. & Pastres, R., 2022. Data assimilation as a key step towards the implementation of an efficient management of dissolved oxygen in land-based aquaculture. *Aquaculture International*. <https://doi.org/10.1007/s10499-022-01028-w>.

Shpigel, M., Ben-Ezra, D., Shauli, L., Sagi, M., Ventura, Y., Samocha, T., & Lee, J. J. (2013). Constructed wetland with *Salicornia* as a biofilter for mariculture effluents. *Aquaculture*, 412–413, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.038>

Solidoro, C. , V.E. Brando, C. Dejak, D. Franco, R. Pastres, G. Pecenik. 1997. Long term simulations of population dynamics of *Ulva* r. in the lagoon of Venice. *Ecological Modelling* 102 (1997) 259–272

Sumeth Wongkiewa, Zhen Hub, Kartik Chandranc, Jae Woo Leed, Samir Kumar Khanala,* Nitrogen transformations in aquaponic systems: A review. *Aquacultural Engineering* 76 (2017) 9–19

Zollmann, Meiron & Liberzon, Alex & Golberg, Alexander. (2023). Modeling of growth of the macroalga *Ulva* sp. in a controlled photobioreactor based on nitrogen accumulation dynamics. *Applied Phycology*. 4. 121-140. 10.1080/26388081.2023.2224423.