

INTERREG VI-A ITALIJA SLOVENIJA 2021-2027

BeBlue Beyond Bluegrass:

Krepitev trajnostnega agrobiznisa skozi akvaponiko Krepitev
trajnostne kmetijski proizvodi proizvodnja iz akvaponike

D1.2.1 Morska akvaponika: tehnološke smernice/

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/ Projekti partnerji :

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

Projekt BeBlue sofinancira evropski združeni v okviru Program Interreg VI-A Italija-Slovenija .



Università
Ca' Foscari
Venezia



UNIVERZA V LJUBLJANI
University of Ljubljana



www.ita-slo.eu/BeBlue

Projekt/ Projekt :	Interreg Italija – Slovenija BeBlue – Onkraj modre trave
št. projekta / Številka projekt :	ITA-SI0100069
WP	WP1 - Beyond Bluegrass: digitalizacija in diverzifikacija izdelkov / Nadaljevanje Bluegrass: digitalizacija in diverzifikacija proizvodnja
dejavnost	A2.1 Testiranje novega izdelka: morska akvaponika
Dostavljivo	D1.2.1 /
Različica / posodobljeno :	1
Datum pošiljanja / Datum odpreme :	
Odgovorni partner / Odgovorni partner:	ZDRUŽENI
Avtorji/ svetovalci :	Francesco Cavraro , Matteo Bolzonella, Marco Francese, Caterina Garbin, Matteo Maglito, Joseph Safi, Roberto Pastres.

Dobavljiva vrsta / Vrsta končnega izdelka		
R	Dokument, poročilo / Dokument , poročilo	X
DEM	Demonstrator, pilot, prototip - Demo, pilotni projekt , prototip	
DEC	Spletne strani, videi itd. / Spleen čudno , video objave itd .	
DRUGO		

Stopnja razkritja / Stopnja britje		
Lahko	Javni – Javni	X
CO	Zaupno, samo za projektne partnerje, tehnično sekretarko in komisijo program management / zaupno , samo za projektne partnerstvo , tehnologija sekretarja in odbora za upravljanje program	

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

Kontakti koordinatorja / Kontakti usklajevanje	
Ime koordinatorja projekta	Roberto Pastres
Organizacija koordinatorja 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

D1.2.1 Morska akvaponika: tehnološke smernice	4
BEBLUE POVZETEK	5
SEZNAM KRATIC - SEZNAM AKRONIMOV	6
SEZNAM SLIK	7
SEZNAM TABEL	Error! Bookmark not defined.
POVZETEK	8
1. UVOD	10
1.1 Namen dokumenta	10
1.2 Razčlenitev	11
2. SISTEM IP-UNIVE IN NJEGOV NADZORNI SISTEM	12
3. POVZETEK REZULTATOV	22
3.1 Biotske spremenljivke in glavni prisilni dejavniki	22
3.2 Abiotske spremenljivke	30
3.3 Ekotoksikološki testi	32
3.4 Poraba energije	34
4. SMERNICE ZA MORSKO AKVAPONIKO	35
4.1 Nadzorni sistem	36
4.2 Dušikova bilanca in proizvodni potencial	38
4.3 Poraba energije	39
5. SKLEPI	41
6. Bibliografija	42
7. PRILOGA A	43
7.1 UVOD	43
7.2 OZADJE IN METODOLOGIJA	43
7.3 PRAKTIČNA UPORABA	45
7.4 VZDRŽEVANJE TESTNIH ORGANIZMOV	46
7.5 NAČRT VZORČENJA	47
7.6 STATISTIČNA ANALIZA	48
7.7 REZULTATI	49
7.8 SKLEPI	63

BeBlue Beyond Bluegrass

Krepitev trajnostnega agrobiznisa z akvaponiko

D1.2.1 Morska akvaponika: tehnološke smernice

(slovenska različica)

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 recirkulacijskih sistemih. BeBlue izkorišča rezultate, dosežene s projektom [čezmejnega sodelovanja BLUEGRASS](https://2014-2020.ita-slo.eu/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 nadnacionalnega povezovanja v mreže s procesi participacije in razširjanjem rezultatov.

SEZNAM KRATIC - SEZNAM AKRONIMOV

AL	Proizvodna linija Alga v IP-UNIVE
ALK	Alkalnost
BQC	Kontrola kakovosti BeBlue
DT	Digital Twin
IP-UNILJU	Aquaponic pilotna naprava, ki jo upravlja Univerza v Ljubljani
IP-UNIVE	Aquaponic pilotni obrat , ki ga upravlja Univerza Ca' Foscari v Benetkah
NO2	nitrit
NO3	nitrat
DO	Raztopljeni kisik (Raztopljen kisik)
RAS	Recirkulacijski ribogojni sistem
PAR	fotosintetično aktivno sevanje (fotosintetično aktivno sevanje)
RP	fosfor Reaktiven (reaktivni fosfor)
SA	Proizvodna linija Salicornia v IP_UNIVE
TAN	skupni amonijev dušik (skupni amonijev dušik) dušik)
TSS	Skupne suspendirane trdne snovi trdne snovi)
RAG	Dnevni obroki hrane

KAZALO SLIK

Slika 2-1: Pilotni obrat za akvaponiko v znanstvenem kampusu Univ. Ca' Foscari iz Benetk	12
Slika 2-2: Shema pilotne naprave za morsko akvaponiko IP-UNIVE: označeni so položaji avtomatskih senzorjev za zaznavanje: temperature vode, slanosti, koncentracije raztopljenega kisika in pH.	13
Slika 2-3: Tokovi snovi med biotskimi in abiotskimi spremenljivkami v akvaponskem sistemu.	15
Slika 2-4: Energijski tokovi v akvaponičnem sistemu.....	15
Figura 2-5: Figure 4: IP-UNIVE: (a) Luci LED, (b) Pompe d'acqua, (c) Montaggio del Filtro UV	19
Slika 2-6: IP-UNILJU: (a) Črpalka, (b) Avtomatski podajalniki	19
Figura 2-7: Esempio di controllo della qualità dei dati della temperatura dell'acqua per IP-UNIVE: Selezione dei punti "candidati outliers"	20
Figura 2-8: Esempio di controllo della qualità dei dati della temperatura dell'acqua per IP-UNIVE: Seria di dati verificata	21
Slika 3-1: Razvoj povprečne teže orade a); temperature vode b) in dnevnega obroka krme, RAG, za črti AL in SA, zloženi graf, prva os, in skupno uporabljeno krmo, druga os c).	23
Slika 3-2: Pravkar posajene sadike salicornije (levo) in 30 dni kasneje (desno).	24
Slika 3-3: (a) Krivulje rasti 20 rastlin salicornia, (b) temperatura zraka znotraj GH, (c) relativna vlažnost znotraj GH.	25
Slika 3-4: (a) Biomasa ulve (3 rezi), (b) temperatura vode v obdobju.....	26
Slika 3-5: (a) Biomasa ulve (3 rezi), (b) temperatura vode v obdobju.....	27
Slika 3-6: Časovna vrsta (a) ribje krme (kumulativno), (b) TAN, (c) NO ₃ , (d) fosfata, (e) alkalnosti in (f) koncentracij pH.	32
Slika 3-7: Prispevki glavnih naprav v odstotkih k ocenjeni letni porabi električne energije.	35
Slika 3-8: Zgodovinska serija porabe naprave za regulacijo temperature vode.	35
Slika 4-1: Vrednosti, zaznane na dveh točkah v liniji SA sistema.	37
Slika 4-2: Bilanca stanja NUE	38

KAZALO TABEL

Tabela 2-1: Glavne značilnosti pilotne naprave za morsko akvaponiko IP-UNIVE.	13
Tabela 2-2: Biotske spremenljivke, določene s periodičnim vzorčenjem v pilotni napravi, ki deluje v znanstvenem kampusu Univerze Ca' Foscari.	16
Tabela 2-3: Abiotske spremenljivke, ki jih spremljajo samodejni senzorji v pilotni napravi, ki deluje v znanstvenem kampusu Univerze Ca' Foscari.	17
Tabela 2-4: Zaznavanje porabe električne energije po napravah, navedenih na IP-UNIVE.	18
Tabela 3-1: Trajne halofitne rastline, gojene v pilotnem obratu.	28
Tabela 3-2: Opisna statistika abiotskih spremenljivk, ki jih spremljajo samodejni senzorji vsakih 15 minut. Statistika se nanaša na podatke, obdelane s platformo BQC.	31
Tabela 3-3: Opisna statistika abiotskih spremenljivk, spremljanih z vzorčenjem in tedenskimi meritvami.	31
Tabela 3-4: Ocenjena letna poraba energije na podlagi porabe, izmerjene v obdobju 27. 5. 2024 – 28. 2. 2025.	34

POVZETEK

Ta dokument opisuje rezultate, dosežene v okviru aktivnosti A2.1 »Testiranje novih izdelkov: morska akvaponika«. Aktivnost je bila izvedena v pilotnem obratu, ki se nahaja v znanstvenem kampusu Univerze Ca' Foscari v Benetkah, vodilnega partnerja projekta BeBlue, v nadaljevanju IP-UNIVE. Postroj in nadzorno-krmilni sistem, ki omogoča njegovo digitalizacijo, sta podrobno opisana v izročilih D1_1_1 in D1_1_2.

Naprava je začela polno obratovati aprila 2024: ta dokument predstavlja povzetek rezultatov, pridobljenih v obdobju april 2024 – februar 2025 in na njihovi podlagi nekaj smernic za izvedbo recirkulacijske naprave morske akvaponike. Uporaba somornice ali morske vode na eni strani širi nabor ribiških proizvodov, na drugi strani pa zožuje nabor rastlinskih vrst in v bistvu izključuje vse tiste, ki jih je mogoče gojiti z uporabo utrjene prakse sladkovodne akvaponike. Poleg tega so halofitne rastline, ki lahko prenašajo visoko slanost in makroalge, manj raziskane z agronomskega vidika kot zelenjava, običajno pridelana v akvaponiki, zaradi česar je težje oceniti njihovo produktivnost kot funkcijo okoljskih spremenljivk. Nazadnje, čeprav zanimanje za proizvodnjo halofitov in makroalg narašča, na programskem območju in na splošno v številnih državah Evropske unije primanjkuje nekaterih členov v proizvodni verigi, ki poteka od proizvodnje kalčkov do prodaje.

V tem dokumentu bodo na podlagi izkušenj, pridobljenih v projektu BeBlue, nakazane nekatere razvojne smeri za to zanimivo vrsto ribogojstva, odporno na podnebne spremembe in s skoraj nič vplivom na vodne vire, ki so vse bolj dragoceni tudi na območjih, ki so tradicionalno bogata z vodo, kot je tisto iz programa INTERREG Italija-Slovenija.

1. UVOD

Eden od glavnih ciljev projekta BeBlue je širjenje akvaponičnih sistemov na programskem območju, ki so sposobni zagotoviti inovativne izdelke z visoko dodano vrednostjo. 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 zgoraj omenjenim koprodukcijam. Predvsem obrat, ki ga upravlja Oddelek za agronomijo Univerze v Ljubljani, IP-UNILJU, je bil izboljšan in pripravljen za oceno izvedljivosti pridelave šarenke in mikrozelenja, medtem ko je bil obrat, ki ga vodi Znanstveni kampus Univerze v Benetkah, IP-UNIVE, prilagojen za soproizvodnjo orad, steklanke in makroalg. Kot je podrobno opisano v dokumentu BeBlue 's Deliverable D1.1.1, so bili obrati opremljeni z naprednimi avtomatskimi sistemi za spremljanje, ki lahko zagotavljajo podatke o kakovosti vode, kakovosti zraka in porabi energije v realnem času. Znatna količina dnevno zbranih podatkov je predhodno obdelana z uporabo platforme BQC za nadzor kakovosti, ki je v celoti delujoča in je opisana v dokumentu D1.1.2.

1.1 Namen dokumenta

Uporaba akvaponskih sistemov za pridelavo ribjih vrst, značilnih za morske ali brakične vode, bi po eni strani močno razširila ponudbo ribjih izdelkov iz akvaponike, po drugi strani pa bi bistveno omejila rastlinske vrste, ki bi jih lahko gojili. Zanimanje za gojenje rastlin, ki prenašajo visoko slanost, ter mikro in makroalg pa narašča: ti proizvodi, ki so še pred nekaj leti veljali za nišne, postajajo vse bolj razširjeni, tudi zaradi vse pogostejše uporabe v gostinstvu višjega cenovnega razreda, v primeru alg pa tudi v nutricevtikih. Ti premisleki so privedli do vključitve **morske akvaponike** v projekt BeBlue: to področje uporabe proizvodnje rib in rastlinskih vrst v recirkulacijskih sistemih je še vedno malo raziskano, zlasti s kvantitativnega vidika: njegovo širjenje v programskem območju mora biti zato podprto z močnim nizom dokazov, ki vlagateljem in upravljavcem omogoča objektivno ovrednotenje trajnosti, tako ekonomske kot okoljske. Za doseg tega cilja BeBlue načrtuje dve dejavnosti, ki sta logično povezani s sprejetjem pristopa upravljanja, znanega kot »precizno ribogojstvo«, ki je bil v BeBlue posplošen in uporabljen za akvaponične sisteme. 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 »digitalnega dvojčka« ali »Digital Twin« elektrarne, to je »virtualne kopije« elektrarne, ki simulira njeno delovanje in s tem omogoča analizo in interpretacijo podatkov, oblikovanje kratkoročnih napovedi, uporabnih za sprejemanje upravljaljskih odločitev. Sistemi spremljanja, sprejeti v BeBlue, so podrobno opisani v dokumentu D1.1.2, ki predstavlja tudi vmesnik, ki omogoča nadzor kakovosti podatkov. Prototip digitalnega dvojčka je namesto tega predstavljen v dokumentu D1.4.2.

Namen tega dokumenta je povzeti rezultate, pridobljene pri spremljanju in delno modeliranju pilotne naprave za morsko akvaponiko, IP-UNIVE, pridobivanje informacij, ki so potencialno uporabne za raziskovalce, operaterje v sektorju in vlagatelje, ki želijo nadaljevati pot, uvedeno v BeBlue, v smeri opredelitve operativnih parametrov za dimenzioniranje in upravljanje sistemov morske akvaponike, koristnih za ocenjevanje kapitalskih in operativnih stroškov ter s tem podjetniškega tveganja.

1.2 Dobavljiva razčlenitev

V skladu s ciljem tega poročila je dokument razdeljen na ta uvod in štiri druga poglavja. V drugem poglavju sta za lažjo uporabo opisana pilotna naprava IP-UNIVE, ki se nahaja v znanstvenem kampusu Univerze v Benetkah, in sistem za spremljanje, s katerim je opremljena. Nato je predstavljen povzetek dobljenih rezultatov s serijo grafov, ki prikazujejo razvoj spremljanih spremenljivk in tabel, ki zagotavljajo glavne deskriptivne statistične indekse. V četrtem poglavju so rezultati obravnavani, izvečeni so nekateri sklepi, predstavljeni v obliki smernic in sintetično ponovljeni v 5. poglavju.

2. SISTEM IP-UNIVE IN NJEGOV NADZORNI SISTEM

Pilotna naprava za morsko akvaponiko IP-UNIVE, ki se nahaja v znanstvenem kampusu Univerze Ca' Foscari v Benetkah, je sestavljena iz dveh predelkov, prikazanih na sliki 2-1, ki sta povezana z nizom cevi, ki zagotavljajo kroženje vode. Oba predelka sta sestavljena iz nosilnega jeklenega okvirja, ki podpira plastične plošče: prvi, na levi na sliki 2-1, hrani rezervoarje za gojenje rib: kasneje se bo imenoval RAS – Recirkulacija Sistem za ribogojstvo, saj ga je mogoče izolirati od drugega predelka in delovati kot majhen recirkulacijski obrat za ribogojstvo. V predelu na desni na sliki 2-1 je rastlinjak za hidroponsko gojenje: v nadaljevanju ga bomo poimenovali z akronimom GH – Green House.

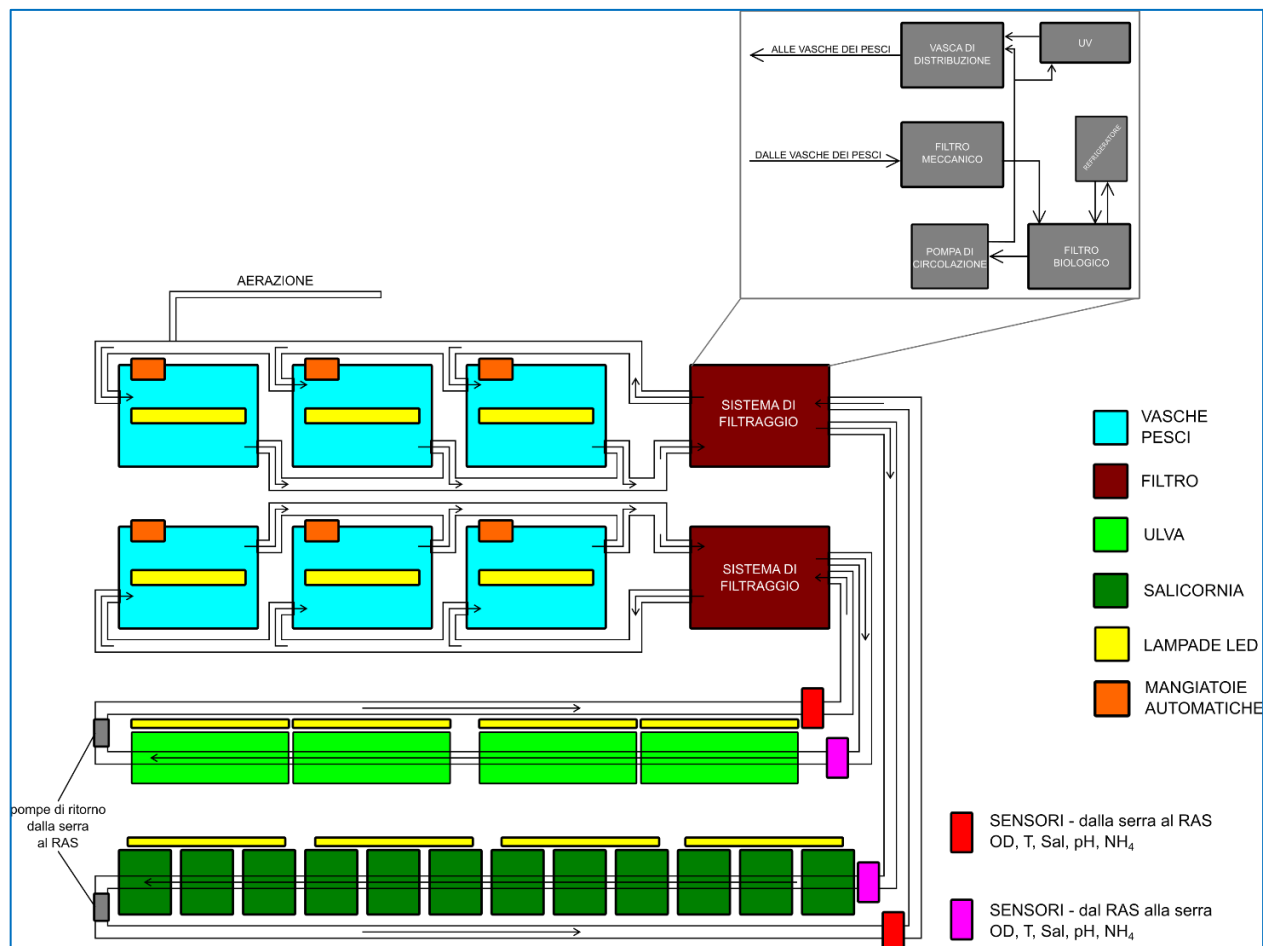


Slika 2-1: Pilotni obrat za akvaponiko v znanstvenem kampusu Univ. Ca' Foscari iz Benetk

Rastlina je shematizirana na sliki 2-1, medtem ko so glavne značilnosti opisane v tabeli 1. Slika 2-1 poudarja, da je rastlina razdeljena na dve ločeni delovni liniji, kar omogoča vzporedno eksperimentiranje različnih povezav med ribami in rastlinskimi vrstami. V projektu BeBlue je bila eksperimentirana pridelava orade (*Sparus aurata*), ki je bila kombinirana predvsem z dvema rastlinskima vrstama: a) halofitnimi rastlinami, zlasti steklarico (*Salicornia Europaea*); b) makroalge, zlasti morska solata (*Ulva lactuca*). Prva je potekala na progi, ki se bo imenovala **SA**, druga pa na liniji **AL**.

Vse vrste, vnesene v rastlino, so avtohtone na programskem območju: orado zelo poznajo italijanski in slovenski potrošniki, kozarček postaja vse bolj priljubljen, morska solata je vključena na seznam užitnih vrst alg: je proizvod, ki se pogosto uporablja v številnih azijskih državah, vstopa pa tudi v naše komercialne tokove po zelo zanimivih cenah. Sistem zaključujejo

tri komponente, ki imajo namen prečiščevanja vode, ki kroži v njem: i) ultravijolična svetilka za dezinfekcijo in zmanjšanje bakterijske obremenitve; ii) mehanski bobnasti filter, ki nenehno odstranjuje suspendirane trdne delce; iii) biofilter, v katerem bakterije izvajajo biopretvorbo amonijevega dušika, ki ga izločajo ribe, v nitratni dušik, ki ni zelo toksičen za ribe in ga rastline lahko asimilirajo.



Slika 2-2: Shema pilotne naprave za morsko akvaponiko IP-UNIVE: označeni so položaji avtomatskih senzorjev za zaznavanje: temperature vode, slanosti, koncentracije raztopljenega kisika in pH.

Tabela 2-1: Glavne značilnosti pilotne naprave za morsko akvaponiko IP-UNIVE.

RAS	
Dolžina [m]	6.15
Širina [m]	2.4
Višina [m]	2.4
Skupna prostornina rezervoarjev za ribe [m ³]	3.6
Prostornina razdelilnega rezervoarja (Sump) [m ³]	1,018

GH	
Dolžina [m]	6.15
Širina [m]	2.4
Višina [m]	2.4
Skupna prostornina rezervoarjev AL [m ³]	0,318
Skupna prostornina rezervoarjev SA [m ³]	0,3
Prostornina razdelilnega rezervoarja (Sump) [m ³]	1.115
Obdelovalna površina AL [m ²]	0,46
Obdelovalna površina SA [m ²]	0,504

Z ekološkega vidika morajo organizmi, ki pripadajo trem različnim trofičnim ravnam, soobstajati v akvaponskem sistemu: **potrošniki** (ribe), **primarni proizvajalci** (rastline ali alge), **razkrojevalci** (bakterije): zaradi skladnosti s terminologijo, sprejeto pri modeliranju sistema, opisanem v izročilu D1.4.1, jih bomo skupaj imenovali " **biotske spremenljivke** ". Soobstoj in, upajmo, visoka produktivnost rib in primarnih proizvajalcev, kot tudi učinkovitost bakterijskega oddelka so zagotovljeni z neprekinjenim kroženjem vodne raztopine/suspenzije in z delnim sistemom kondicioniranja njene temperature. Med biotskimi spremenljivkami in raztopino poteka stalna izmenjava snovi: kot je podrobno opisano v D1.4.1, ta izmenjava vpliva predvsem na naslednje spremenljivke, ki jih skupaj imenujemo "abiotske":

TAN : koncentracija anorganskega dušika v reducirani obliki;

NO₃ : koncentracija nitratov;

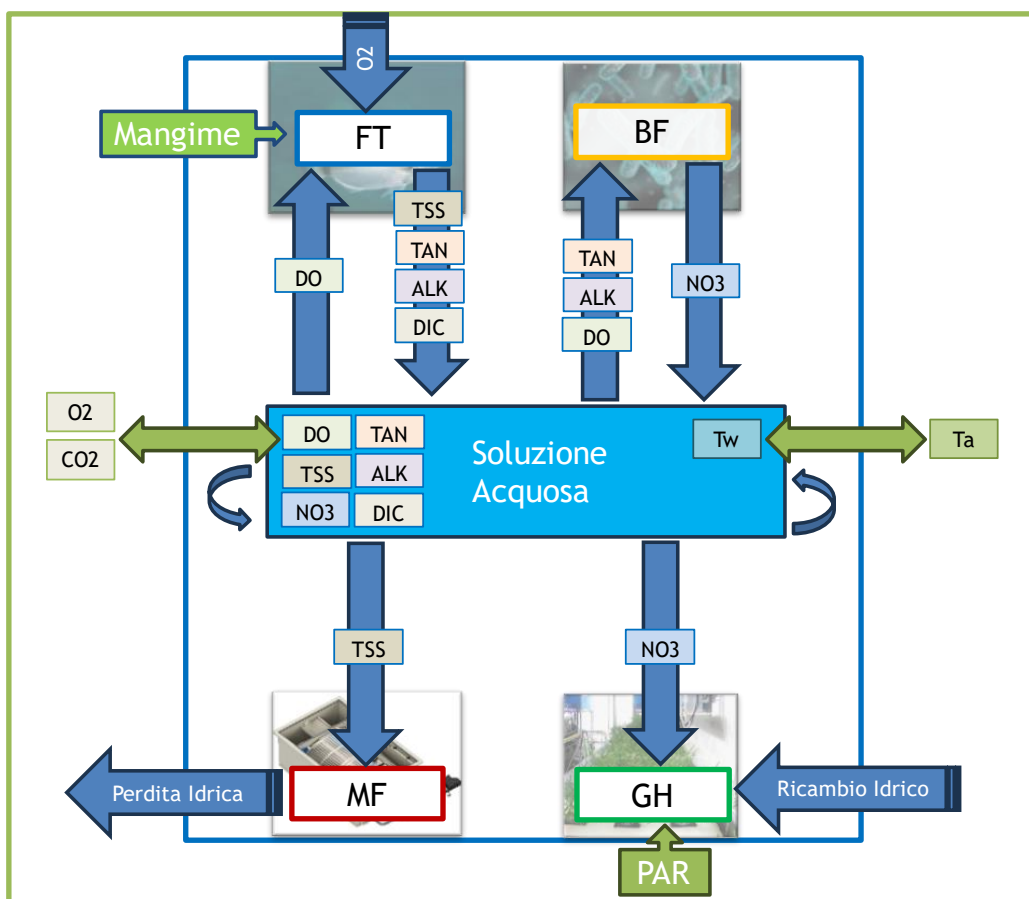
DO : koncentracija raztopljenega kisika;

ALK : alkalnost;

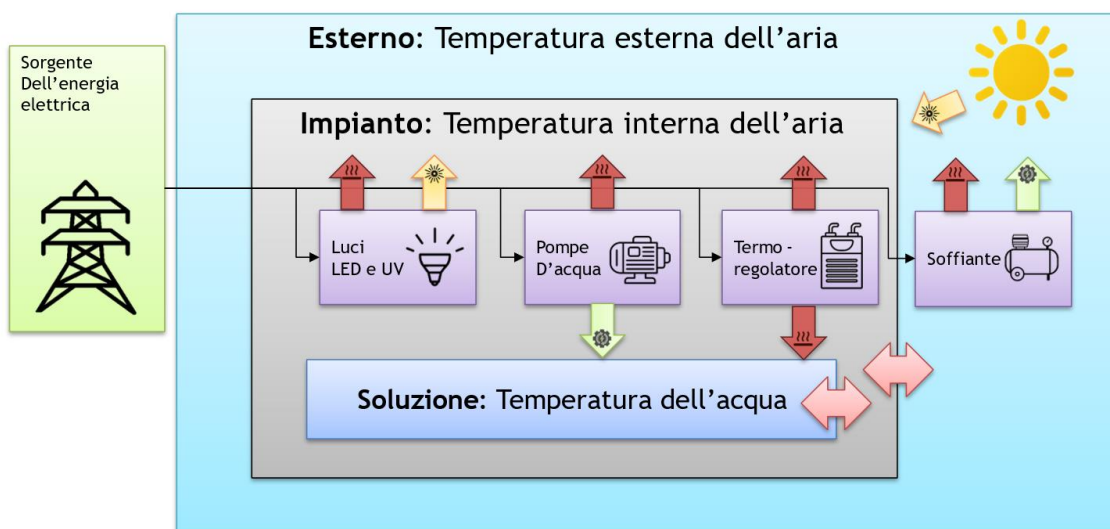
DIC : koncentracija raztopljenega anorganskega ogljika;

TSS : Skupna koncentracija suspendiranih trdnih snovi

Interakcije med biotskimi in abiotskimi spremenljivkami so na kratko predstavljene na sliki 2-3, kjer so nekatere komponente sistema, predstavljenega na sliki 2-2, združene. Zlasti »FT«, Fish Tank, predstavlja vsoto prostornine rezervoarjev, v katerih se gojijo ribe, »BF« biofilter, »GH« vsoto hidroponskih rezervoarjev, »MF« mehanski filter. V skladu z (Dos Santos&al , 2023), metabolizem rib sprošča zmanjšane dušikove spojine, skupaj imenovane TAN, ki povečajo alkalnost raztopine. Dihanje rib asimilira kisik iz vode in vanjo sprosti ogljikov dioksid: ta zadnja spojina poveča tako alkalnost kot koncentracijo raztopljenega anorganskega ogljika, DIC, ki je enaka vsoti bikarbonata, karbonata in raztopljenega ogljikovega dioksida. V biofiltru se TAN biološko pretvori v nitrat: ta proces zahteva kisik in zmanjša alkalnost. Nitrat nato asimilirajo primarni proizvajalci v hidroponskem rastlinjaku. Slika 2-3 prikazuje tudi glavne vnose snovi in energije, ki so bistveni za hranjenje rib, kroženje vode in uravnavanje sestave raztopine. Glavni vnos snovi v akvaponski sistem je hrana, ki jo dobijo ribe, medtem ko temperatura vode vpliva na metabolizem rib in alg, učinkovitost biopretvorbe TAN in v določeni meri tudi na aktivnost koreninskega sistema rastlin. Na aktivnost fotosinteze namesto tega vpliva raven PAR in do neke mere temperatura zraka. Zato je spremljanje in, kolikor je mogoče, nadzorovanje teh spremenljivk zelo pomembno. Stopnje pretoka vode med različnimi komponentami so bile približno konstantne s črpalnim sistemom, medtem ko je bila ustrezna oksigenacija rezervoarjev za razmnoževanje rib in koreninskega sistema rastlin zagotovljena s črpanjem zraka.



Slika 2-3: Tokovi snovi med biotskimi in abiotskimi spremenljivkami v akvaponem sistemu.



Slika 2-4: Energetski tokovi v akvaponičnem sistemu.

Opis sistema poudarja njegovo kompleksnost in predvsem njegovo dinamičnost: toplotne izmenjave z zunanostjo vplivajo na temperaturo notranjega zraka T_a in vode T_w , 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.

Nadzorna dejanja 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": i) nenadzorovane, npr. zunanja temperatura zraka, ii) delno nadzorovane, npr. temperatura vode ali iii) popolnoma nadzorovane, npr. ribji obrok hrane. Za lažjo optimizacijo upravljanja sistema je projekt BeBlue razvil prototip »digitalnega dvojčka« (DT) akvaponičnega sistema, ki je podrobno opisan v dokumentu D1.4.2. Osrednji element DT je model, ki je sposoben v realnem času simulirati delovanje sistema, ki naj bi bil virtualno predstavljen, in predlagati ustrezne upravljalvske ukrepe na podlagi kratkoročnih napovedi.

Tabela 2-2: Biotske spremenljivke, določene s periodičnim vzorčenjem v pilotni napravi, ki deluje v znanstvenem kampusu Univerze Ca' Foscari.

Biotske spremenljivke	Simbol	merska enota	Pogostost
Posamezna teža orade	IW	gramov	1/mesec
Biomasa <i>Ulva spp.</i>	FW _{AL}	gramov	1/teden
Rastlinska biomasa <i>Salicornia spp.</i>	FW _{SL}	gramov	1/mesec

Sistem spremljanja, implementiran v IP-UNIVE, je bil skrbno načrtovan za validacijo prototipa DT: zato je do določene mere predimenzioniran in bi ga bilo mogoče poenostaviti v primeru industrializacije morske akvaponike, kot bo navedeno v poglavju. 4. Načrt spremljanja je povzet v treh tabelah. Tabela 2 prikazuje biotske spremenljivke, tabela 3 spremljane abiotske spremenljivke, tabela 4 pa porabo električne energije.

Biotske spremenljivke so bile zaznane na naslednji način.

- 1) Orada : vsak mesec je bil iz vsakega rezervoarja odvzet vzorec enak polovici osebkov in določena je bila teža vsakega posameznika;
- 2) Salicornia : vsako rastlino smo označili in obrezali približno enkrat na mesec, da smo dobili krivulje rasti. Pri vsakem obrezovanju je bila določena sveža teža biomase, odstranjene iz vsake rastline. Ob koncu študijskega obdobja so rastline odstranili iz sistema, da bi določili njihovo svežo težo. Posamezne rastne krivulje smo dobili tako, da smo tako ugotovljeni vrednosti prišteli odvzeto biomaso.
- 3) Morska solata : morske alge so bile pobrane tedensko, nežno centrifugirane, da so odstranili odvečno vodo, in stehtane, da se določi sveža teža.

Tabela 2-3: Abiotске spremenljivke, ki jih spremljajo samodejni senzorji v pilotni napravi, ki deluje v znanstvenem kampusu Univerze Ca' Foscari

Abiotске spremenljivke	Simbol	merska enota	Pogostost	instrumenti	Obdobje vzorčenja
Temperatura vode	tw	°C	1/10 minute	4 senzorji (2 na vrstico)	23. 5. 2024 - 28. 2. 2025
pH	pH	-	1/10 minute	4 senzorji (2 na vrstico)	23. 5. 2024 - 28. 2. 2025
Raztopljeni kisik	NAREDI	[mg/L] - % nasat	1/10 minute	4 senzorji (2 na vrstico)	23. 5. 2024 - 28. 2. 2025
Slanost	SAL	PSU	1/10 minute	4 senzorji (2 na vrstico)	23. 5. 2024 - 28. 2. 2025
Temperatura zraka	Ti	°C	2/dan	2 senzorja (1 na nadaljevanje)	27. 5. 2024 - 14. 11. 2024
			1/10 minute	1 senzor	14. 11. 2024 - 28. 2. 2025
Relativna vlažnost	RH	%	2/dan	2 senzorja (1 na nadaljevanje)	27. 5. 2024 - 14. 11. 2024
			1/10 minute	1 senzor	14. 11. 2024 - 28. 2. 2025
Svetlost	PAR	μmol / m ² s	1/10 minute	1 senzor	14. 11. 2024 - 28. 2. 2025
koncentracija TAN	TAN	mgN /L	1/teden	1 fotometer	5.7.2024 - 28.2.2025
Koncentracija NO ₃ ⁻	NO3	mgN /L	1/teden	1 fotometer	5.7.2024 - 28.2.2025
Koncentracija NO ₂ ⁻	NO2	mgN /L	1/teden	1 fotometer	5.7.2024 - 28.2.2025
Alkalnost	ALK	mgCO ₃ ²⁻ /L	1/teden	1 fotometer	5.7.2024 - 28.2.2025
Koncentracija PO ₄ ³⁻	PO4	mgP /L	1/teden	1 fotometer	5.7.2024 - 28.2.2025

Spremljanje **abiotских spremenljivk** je potekalo tako z avtomatskimi senzorji kot z občasnim ročnim vzorčenjem. Instrumenti , uporabljeni za prvo skupino, so opisani v izročilu D_1_1_1. S spektrofotometrijo smo določili koncentracije **TAN, NO2, NO3, reaktivnega fosforja in alkalnosti** .

Tabela 2-4: Zaznavanje porabe električne energije po napravah, navedenih na IP-UNIVE

IP-UNIVE			
Naprava	Opis	številka	Pogostost
Črpalke	Obtočna črpalka (RAS) $Q = 7 \text{ m}^3/\text{h}$ $V = 6 \text{ m}$ $V = 230 \text{ V}$ $f = 50 \text{ Hz}$ $P_1 = 0,46 \text{ kW}$ $P_2 = 0,225 \text{ kW}$ deluje 24 ur na dan	2 (1 v obratovanju in 1 v sili)	1/10 minute
	Povratna črpalka rastlinjaka $Q = 1,5-8,1 \text{ m}^3/\text{h}$ $V = 6,3-2 \text{ m}$ $V = 450 \text{ V}$ $f = 50 \text{ Hz}$ $P_1 = 0,31 \text{ kW}$ $P_2 = 0,25 \text{ kW}$ s prekinjenim delovanjem (plavajoče)	1 (1 na vrstico x 2 vrstici)	1/10 minute
puhalo	$f = 50 \text{ Hz}$ $V = 220 - 240 \text{ V}$ $I = 5 \text{ A}$ $P = 0,85 \text{ kW}$ $\text{RPM} = 2810 \text{ vrt / min}$ $P = -160/160 \text{ mbar}$ deluje 24 ur na dan	1	1/10 minute
LED luči	RAS: $P = 51 \text{ W}$ prižgan 10 ur na dan	6 (3 na vrstico x 2 vrstici)	1/10 minute
	SERRA - Linija alg: $P = 40 \text{ W}$ prižgan 10 ur na dan	4	1/10 minute
Termoregulator	$V = 230 \text{ V}$ $f = 50/60 \text{ Hz}$ $P_1 = 280 \text{ W}$ $P_2 = 260 \text{ W}$	4 (2 na vrstico x2 vrstici)	1/10 minute
Video kamera	$V = 12 \text{ V}$ $I = 0,3 \text{ A}$ $P = 3 \text{ W}$	1	1/10 minute

Načrt spremljanja je bil dopolnjen z dejavnostjo nadzora dobrega počutja gojenih organizmov na podlagi ekotoksikoloških testov, ki jih je izvedel partner Shoreline. Ti testi omogočajo ovrednotenje dejanskega biološkega vpliva abiotičnih spremenljivk, ki razkrivajo zgodnje subletalne in smrtonosne učinke, povezane s kakovostjo vode, zahvaljujoč posebni občutljivosti uporabljenih organizmov. Pomemben primer je spremljanje eutrofikacije, kompleksnega pojava, ki ga sproži presežek hranil, predvsem anorganskega dušika in fosforja, ki lahko resno ogrozi ravnovesje akvaponičnega ekosistema. V tem kontekstu ekotoksikološki testi omogočajo pravočasno oceno bioloških učinkov kopičenja hranil, kar omogoča ciljno usmerjene preventivne posege. Integracija ekotoksikoloških testov in kemijsko-fizikalnih analiz predstavlja celovit pristop k oceni tveganja za okolje, bistvenega pomena za razumevanje kompleksnih interakcij med različnimi kemičnimi spojinami in njihovih sinergijskih učinkov na vodne organizme. Ta integrirana metoda podpira bolj zavestno in trajnostno upravljanje sistema, zagotavlja optimalne pogoje za rast rib in rastlin ter spodbuja dolgoročno stabilnost celotnega akvaponičnega sistema. Metodologija, uporabljena v BeBlue, je podrobno opisana v Dodatku A.

Preizkusi so bili izvedeni na štirih vzorcih, zbranih med majem in oktobrom 2024. Vsako vzorčenje je vključevalo zbiranje vzorcev vode na štirih točkah za vsako linijo sistema, opisano na sliki 2-1, na vhodu in izstopu iz akvarijev in hidroponičnega rastlinjaka. Za vsako vzorčno mesto je bilo odvzetih 250 mL vode, na kateri so bile opravljene tako analize kemijsko-fizikalnih parametrov kot ekotoksikološke preiskave. *Paracentrotus lividus* smo kot testni organizem uporabili v prvih dveh vzorčenjih, *Isochrysis* pri vseh štirih vzorčenjih je bil uporabljen *galbanum*.

Niž manj pomemben za namene presoje okoljske trajnosti ni spremljanje **porabe električne energije**. Glavne naprave, navedene v tabeli 3, so opremljene s senzorji za zaznavanje trenutne absorbirane moči vsakih 10 minut, iz katerih je mogoče natančno razbrati dejansko porabo električne energije.

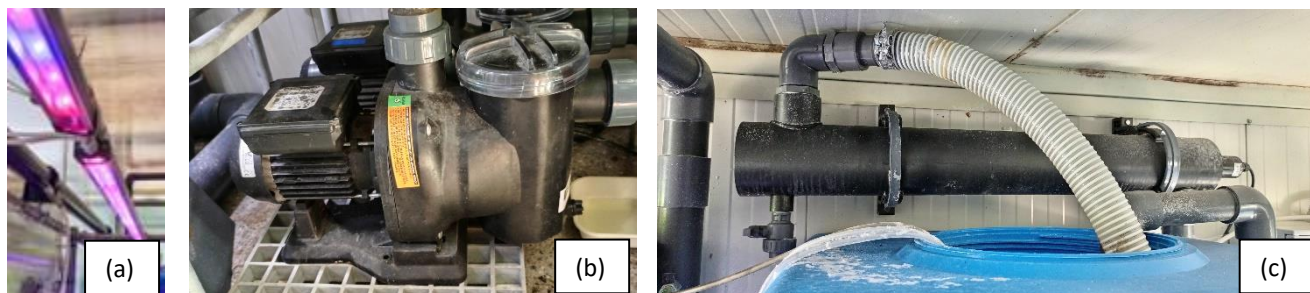
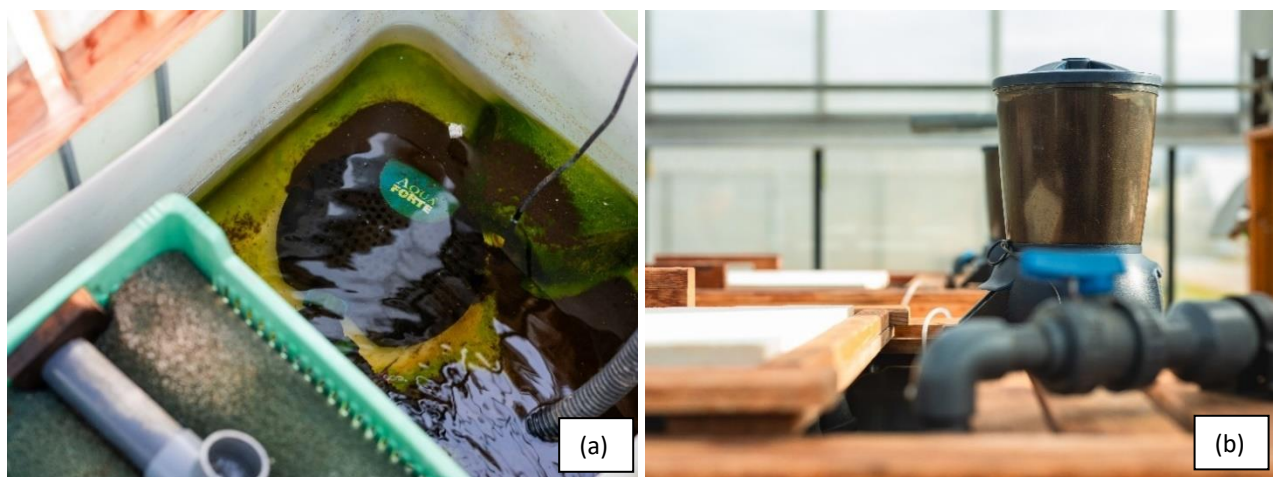


Figura 2-5: Figure 4: IP-UNIVE: (a) Luci LED, (b) Pompe d'acqua, (c) Montaggio del Filtro UV



Slika 2-6: IP-UNILJU: (a) Črpalka, (b) Avtomatski podajalniki

Zagotavljanje kakovosti in zanesljivosti spremljanih podatkov je ključnega pomena tako za pridobivanje koristnih informacij za vodstvo kot za njihovo uporabo v korporativnem komuniciranju ali, kot v tem primeru, v dejavnostih diseminacije. Količina zbranih podatkov pri občasnem ročnem vzorčenju je običajno majhna: v tem primeru je nadzor kakovosti podatkov zaupan izkušnjam operaterjev.

Samodejni senzorji po drugi strani ustvarijo **veliko količino podatkov**: na primer, glede na preglednici 1 in 3 se **vsak dan zazna naslednje**:

$$6[\text{podatki/uro}] \times 4[\text{var}] \times 4[\text{senzorji}] \times 24[\text{ur}] = \mathbf{2304 \text{ podatkov v IP-UNIVE}}$$

Avtomatski senzorji, čeprav nepogrešljiv element za digitalizacijo sistemov in optimizacijo njihovega upravljanja, zahtevajo skrbno vzdrževanje. Pravzaprav se lahko njihovo delovanje sčasoma hitro poslabša zaradi kopičenja motečih snovi. Poleg tega lahko pride do trenutnih prekinitev v prenosu signala in nazadnje jih bo morda treba občasno ponovno umeriti, da se prepreči sistematično popačenje meritev.

Vizualizacija podatkov lahko zagotovo pomaga operaterju pri prepoznavanju morebitnih anomalij in/ali sistematičnih odstopanj v nivoju signala, ki jih je težko utemeljiti glede na procese, ki potekajo v napravi. Vendar pa je to precej dolgočasno opravilo mogoče olajšati z uporabo postopkov statistične analize, morda tudi s pomočjo algoritmov, ki temeljijo na umetni inteligenci, ki omogočajo, da se v prvi vrsti ugotovi, kateri podatki ali zaporedja podatkov lahko kažejo na morebitne anomalije v delovanju senzorjev.

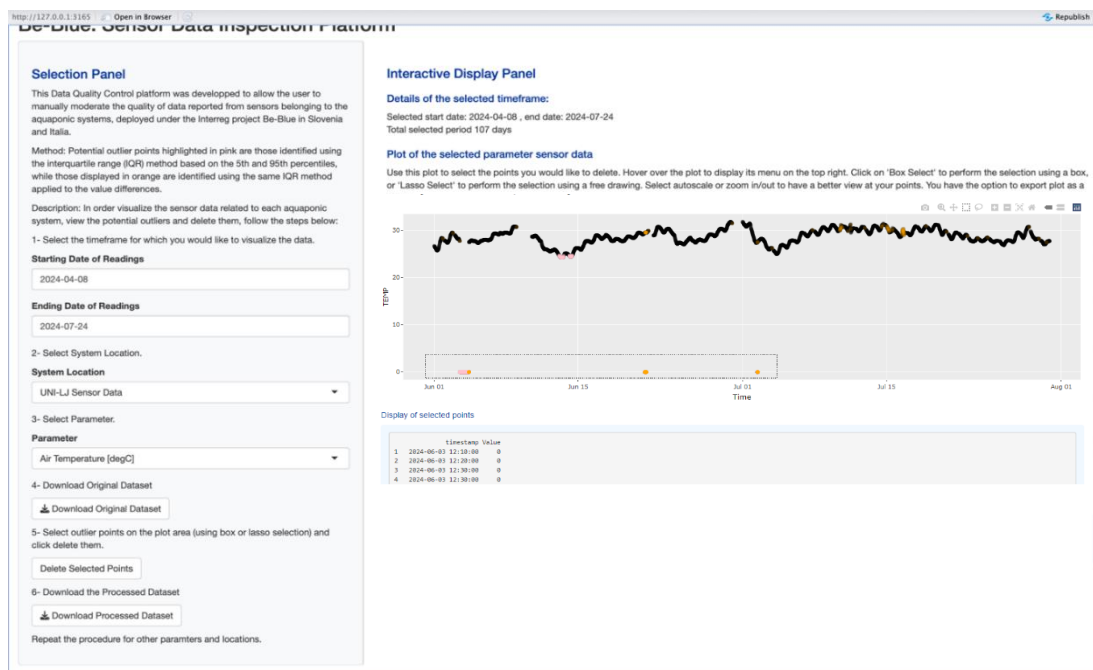


Figura 2-7: Esempio di controllo della qualità dei dati della temperatura dell'acqua per IP-UNIVE: Selezione dei punti "candidati outliers"

Iz tega razloga je BeBlue razvil preprost in robusten postopek za identifikacijo potencialno nenormalnih podatkov ali " *izstopajočih vrednosti* ", razdeljen na dve fazi: v prvi se analiza kumulativnih **porazdelitev podatkov in razlik med zaporednimi podatki** uporabi za identifikacijo potencialno nenormalnih podatkov ali " *kandidatnih izstopajočih vrednosti* ". V drugem primeru **mora operater odločiti, ali naj se tako identificirani podatki odstranijo ali obdržijo** . Postopek je postal operativen prek uporabniškega vmesnika, imenovanega BQC, ki je podrobno opisan v dokumentu D1.1.2, ki operaterju omogoča;

- Izberite spremenljivko in časovno okno za predhodno obdelavo: BQC prikaže časovno vrsto in potencialne *izstopajoče vrednosti* :
- Izbrišite podatke, ki dejansko veljajo za nezanesljive;
- Preverjene podatke arhivirajte za nadaljnjo analizo.

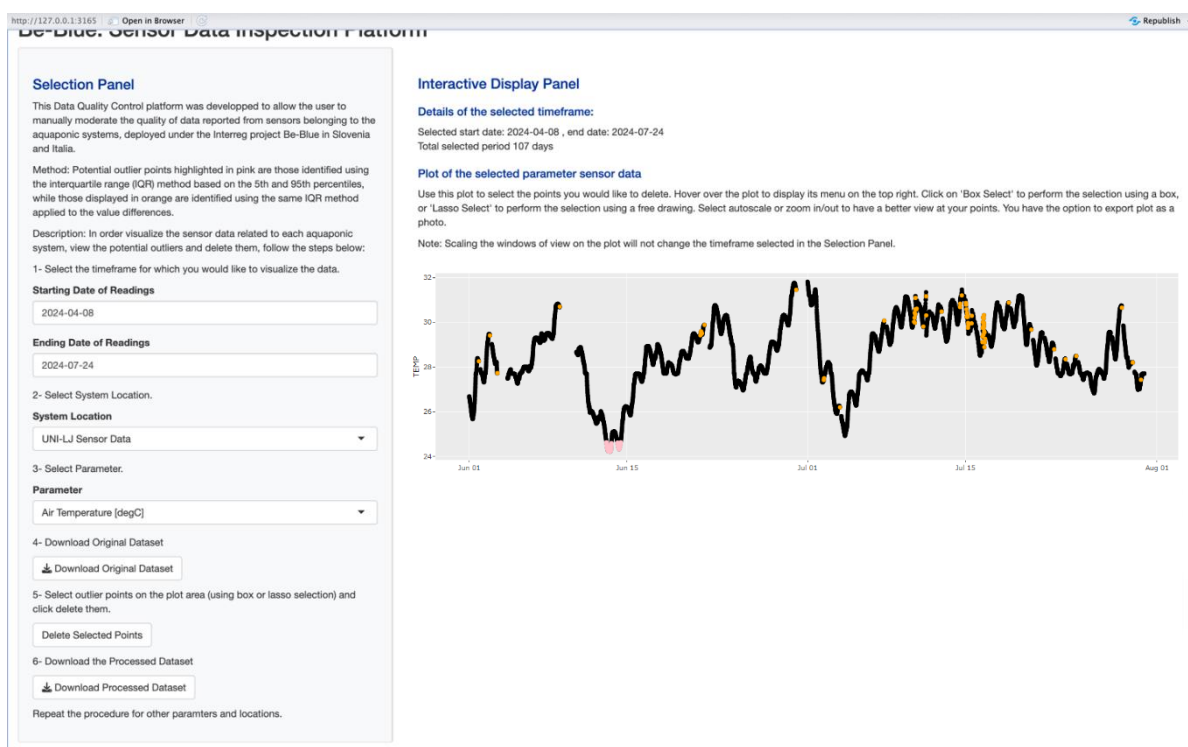


Figura 2-8: Esempio di controllo della qualità dei dati della temperatura dell'acqua per IP-UNIVE: Seria di dati verificata

Delovanje BQC je ponazorjeno na slikah 2-7 in 8: Slika 2-7 prikaže zaslon, ki operaterju prikazuje potencialne odstopanja, Slika 2-8 pa preverjene zgodovinske serije.

3. POVZETEK REZULTATOV

Sistem morske akvaponike je bil zagnan marca 2024, da bi zagotovil optimalno delovanje biofiltra. Po eksperimentalni fazi je samodejno spremljanje temperature vode, slanosti, koncentracije raztopljenega kisika in pH začelo polno delovati 27. maja 2024, temperature, zračne vlažnosti in PAR pa od 14. novembra 2024. Do začetka avtomatskega spremljanja so bile te spremenljivke dnevno določene s prenosnimi instrumenti.

Glavni rezultati so predstavljeni v naslednjem poglavju, razdeljenem na:

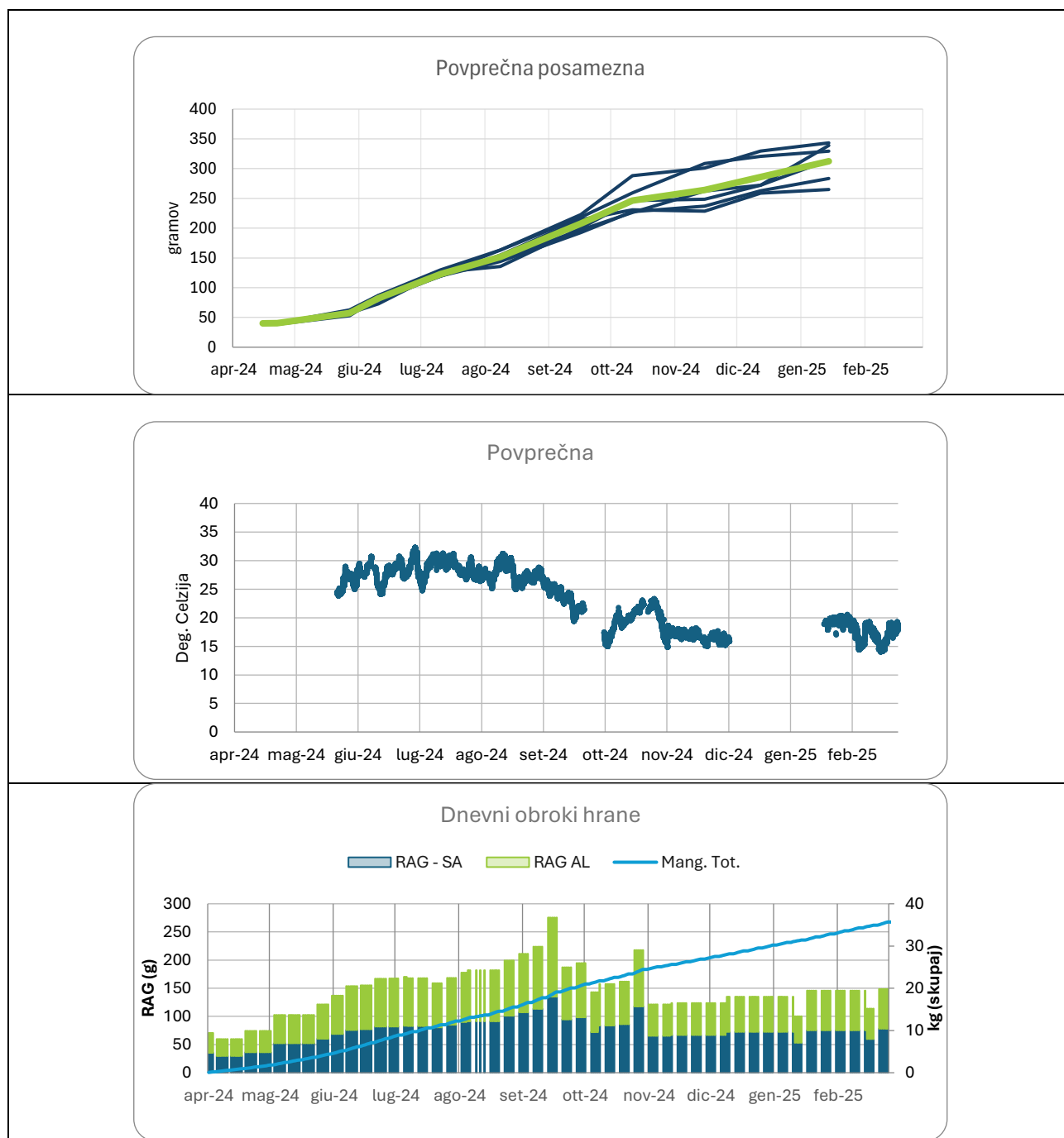
- biotske spremenljivke in glavni prisilni dejavniki;
- abiotske spremenljivke.

3.1 Biotske spremenljivke in glavni prisilni dejavniki

Dve ločeni liniji pilotnega obrata sta omogočili oceno izvedljivosti soproizvodnje morskih rib, makroalg in užitnih halofitnih rastlin. Poganjki salikornije so bili posajeni 18. 4. 2024, makroalge 9. 4. 2024. Poleg teh treh vrst so bili od 16. 10. 2024 v linijo, namenjeno makroalgam, vstavljeni potaknjenci sarkokornije, alimione in inule. Opazovanja v zvezi z rastjo teh vrst so bila v bistvu kvalitativne narave. Kvantitativni rezultati v zvezi s tremi izdelki, predvidenimi v predlogu projekta, so navedeni spodaj.

3.1.1 Orada

Morski breami so bili predstavljeni 4. aprila 2024: 89 osebkov, ki jih je dobavila valilnica "Valle Ca" Zuliani Soc. Agricola Srl so bili premeščeni in potopljani v 6 tankov, prikazanih na sliki 2-1: Tanki F1-F3 so bili povezani s prvotno prilagoditvijo AL, ki ni mogoče pripisati patologijam, je bilo zabeleženo za dobrobit živali, rastlino je bilo po kratkem obdobju aklimatizacije redno obiskano. Po praksi, ki se uporablja na številnih kmetijah, je bila krma zagotovljena pet dni v tednu. Ker je uporabna prostornina vsakega rezervoarja približno $0,6 \text{ m}^3$, se je povprečna gostota vzreje torej povečala od $0,98$ do $5,65 \text{ kg/m}^3$, kar je precej manj od tipične gostote intenzivne vzreje, ki znaša približno 30 kg/m^3 . V desetih mesecih je sistem proizvedel $4,67 \text{ kg/m}^3$ celotne biomase. Slika 3.1a prikazuje hitrejšo rast v poletnem obdobju in počasnejšo rast v zimskem obdobju, kot je pričakovano glede na časovni razvoj temperature vode, prikazano na sliki 3.1b. Dnevni obrok hrane je odvisen od teže in temperature, vendar je treba upoštevati, da se potreba po hrani poveča do optimalne temperature rasti približno 26°C in nato upade. Razvoj tega siljenja, predstavljen na sliki 3.1c, torej predstavlja vrh v poznem poletnem in jesenskem obdobju, v katerem je temperatura ostala med 15 in 25°C . Faktor pretvorbe krme ali FCR (Feed Conversion Ratio) je bil precej visok, približno 2. To je lahko posledica visoke presnovne aktivnosti v poletnem obdobju, ko je temperatura precej dalj časa ostajala blizu 30°C in celo presegla to vrednost.



Slika 3-1: Razvoj povprečne teže orade a); temperature vode b) in dnevnega obroka krme, RAG, za črti AL in SA, zloženi graf, prva os, in skupno uporabljeno krmo, druga os c).

3.1.2 Steklenica

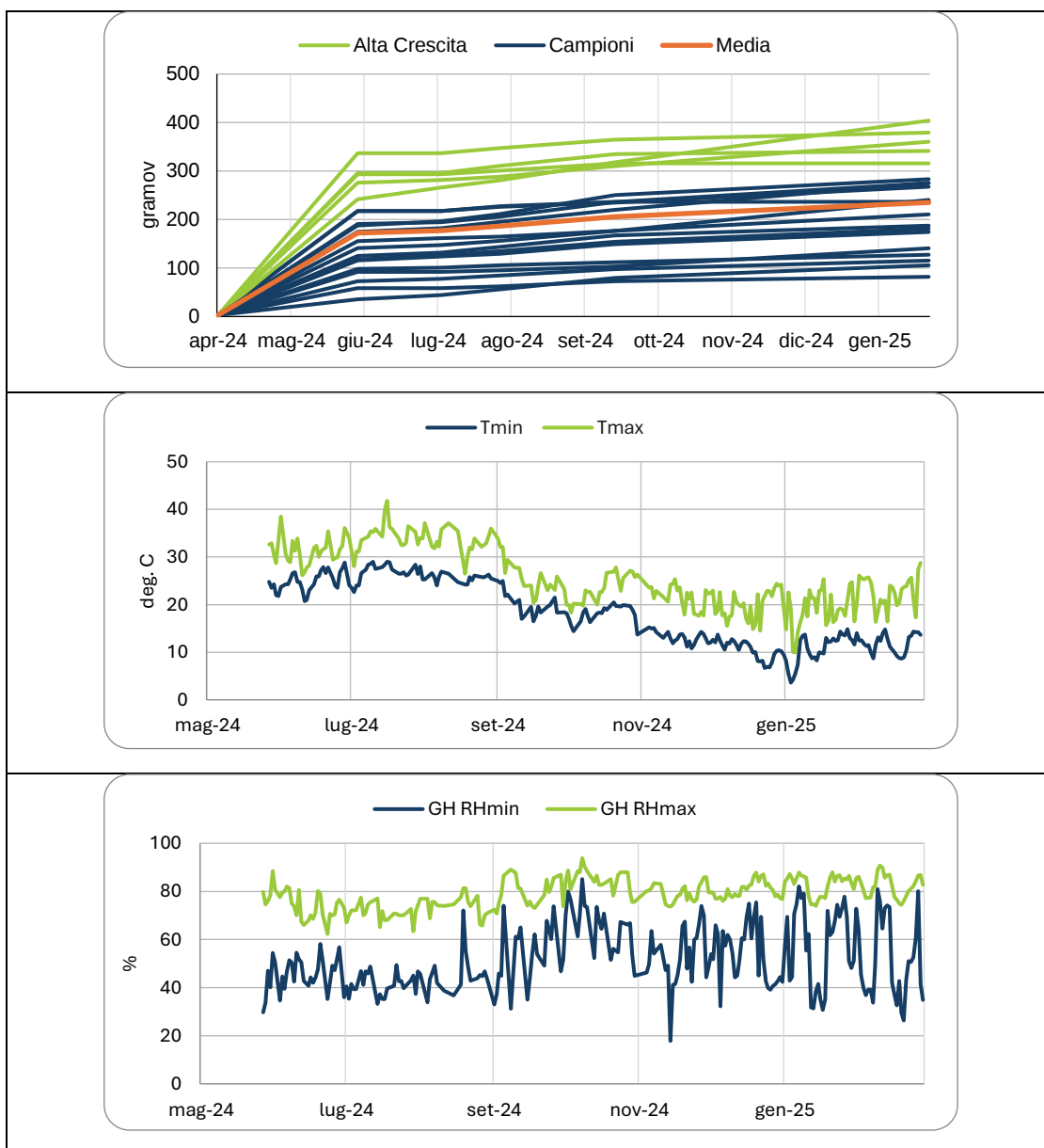
Hidroponski sistem, sprejet za soproizvodnjo salicornia, je znan kot DWC – Deep Water Culture: rastline so postavljene na plošče iz polistirena ali drugega plavajočega materiala, korenine so potopljene v vodno raztopino in pridobivajo hranila, zlasti dušik in kisik. Poganjke salicornije smo vsadili v pilotno rastlino 18. aprila 2024. 30 sadik, ki jih je zagotovilo začasno društvo za namen Tidalgarden, smo ovili v perlonsko volno in položili na plošče ekspandiranega polistirena.



Slika 3-2: Pravkar posajene sadike salikornije (levo) in 30 dni kasneje (desno).

Sadike so hitro razvile koreninski sistem in njihova biomasa se je hitro povečala. Krivulje rasti 20 rastlin, ki so bile januarja 2025 še prisotne v nasadu, so prikazane na sliki 3.3. Ker gre za vrsto, ki še ni bila gojena v večjem obsegu, je individualna variabilnost zelo velika. Vendar pa je mogoče opaziti dva stalna elementa:

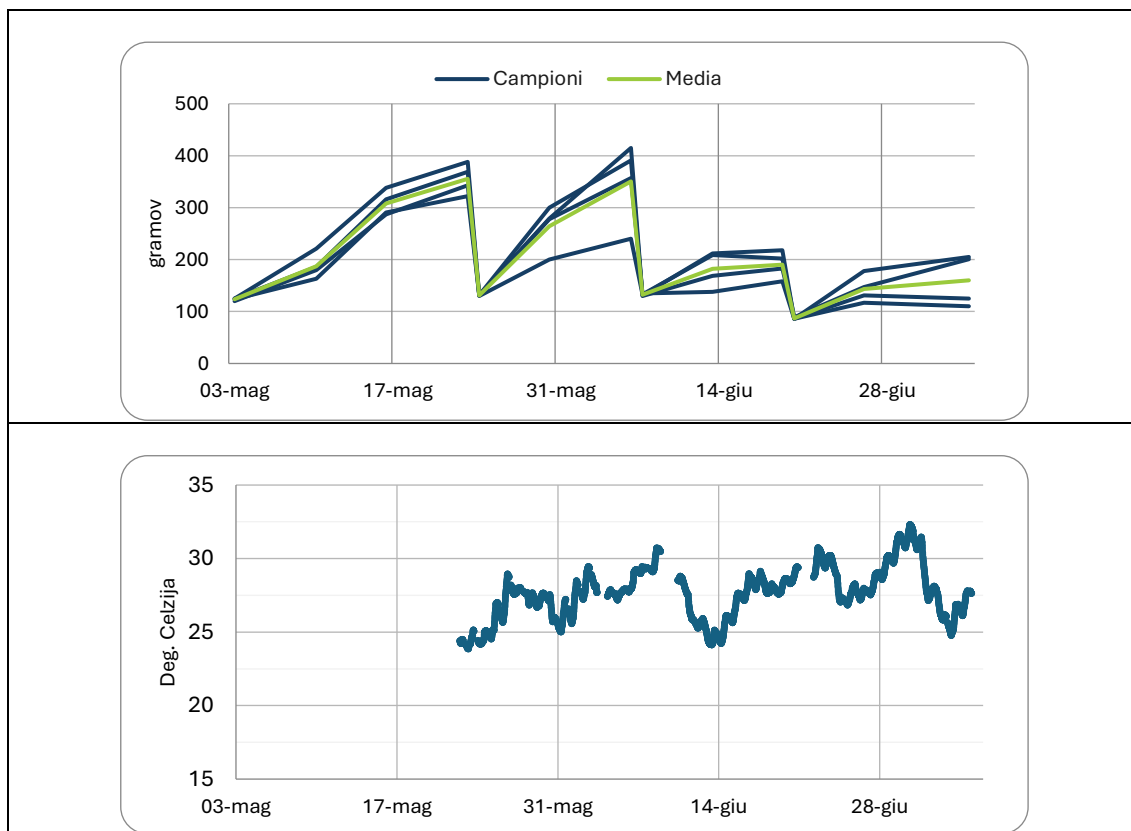
- 1) Večina biomase se proizvede v prvih 6-8 tednih: v tem obdobju je 25 % rastlin (označenih z zeleno na sliki 3.3) proizvedlo povprečno 300 g biomase, sveža teža, to je približno 150 g/mesec. Ob upoštevanju, da je koreninski sistem približno 10 % celotne teže, lahko ocenimo produktivnost približno 135 g/mesec užitne biomase, primerljivo s produktivnostjo solate.
- 2) Proizvodnja biomase se je nadaljevala vse do pozne zime, saj sta uporaba LED in stalna fotoperioda zakasnila ali zavrla cvetenje, ki se v naravi zgodi proti koncu septembra: ta podatek bi lahko bil zelo pomemben, saj bi nakazal možnost podaljšanja rastnih ciklov skozi vse leto.



Slika 3-3: (a) Krivulje rasti 20 rastlin salicornia, (b) temperatura zraka znotraj GH, (c) relativna vlažnost znotraj GH.

3.1.3 Morska solata

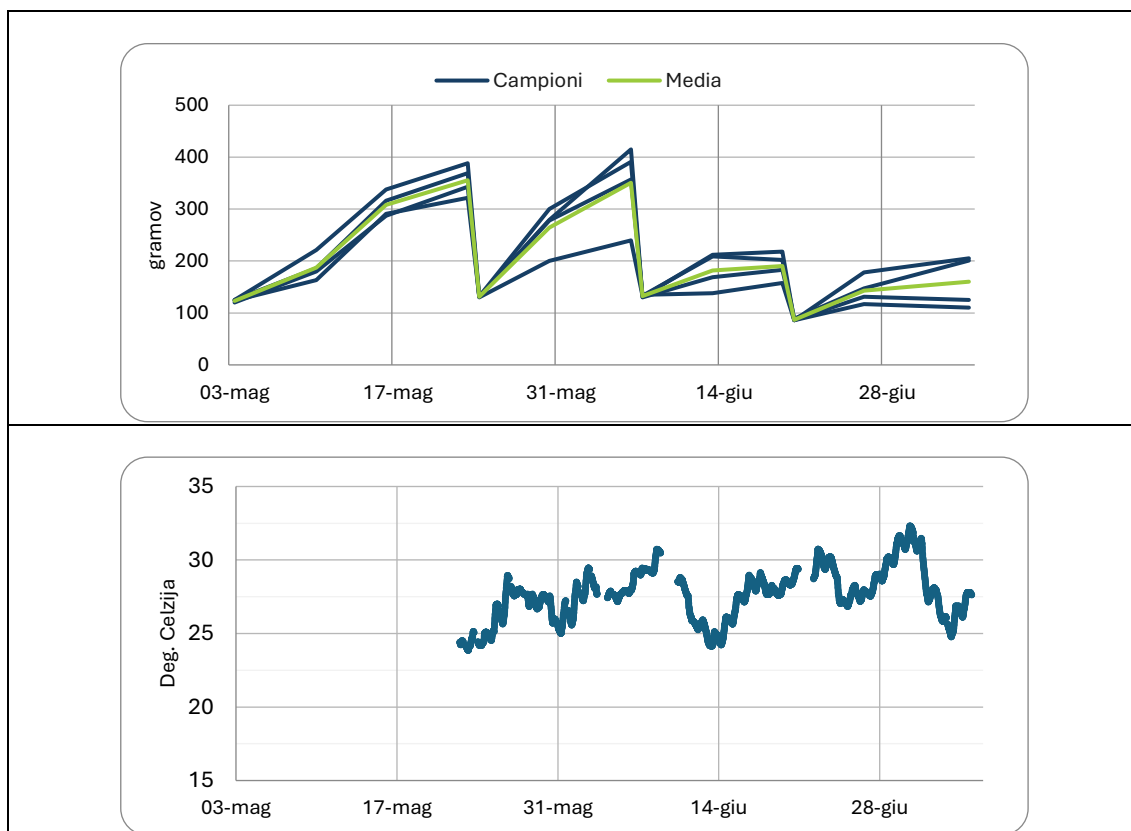
V skladu s tem, kar opažamo v okolju lagune, je biomasa morske solate v spomladanskem obdobju pokazala zelo visoke stopnje rasti, enake približno podvojitvi vsaka dva tedna. Kasneje so se tako pridelki kot stanje steljk poslabšali, verjetno zaradi povišanja temperature, ki je v pilotni napravi ni bilo mogoče popolnoma nadzorovati.



Slika 3-4: (a) Biomasa ulve (3 rezi), (b) temperatura vode v obdobju

3.1.3 Morska solata

V skladu s tem, kar opažamo v okolju lagune, je biomasa morske solate v spomladanskem obdobju pokazala zelo visoke stopnje rasti, enake približno podvojitvi vsaka dva tedna. Kasneje so se tako pridelki kot stanje steljk poslabšali, verjetno zaradi povišanja temperature, ki je v pilotni napravi ni bilo mogoče popolnoma nadzorovati.

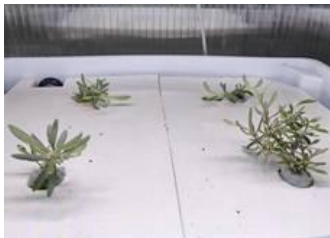


Slika 3-5: (a) Biomasa ulve (3 rezi), (b) temperatura vode v obdobju

3.1.3 Drugi halofiti

Poleg dveh vrst, predvidenih v predlogu projekta, so bila izvedena kvalitativna in polkvantitativna opazovanja rasti še treh vrst užitnih in avtohtonih halofitnih rastlin, kot je povzeto v tabeli 3.1.

Tabela 3-1: Trajne halofitne rastline, gojene v pilotnem obratu

Ime pogosta	Sarkokornija	Preživnina	Inula
Ime znanstveni	<i>Steklenica</i>	<i>Portulacoides halimione</i>	<i>Inula crithmoides</i>
Začetni datum opazovanje	16. 10. 2024	13. 11. 2024	3. 12. 2024
Fotografija ob vstavitvi			
Slika konec februarja			
Uporabe	Podobno kot salicornia, vendar trajnica, je tudi bogata z jodom, bromom in vitaminom C. V preteklosti so jo uporabljali za preprečevanje skorbuta. Lahko jih uporabimo kot prilogo sveži zelenjavi, začnimo jih z oljem in limono ali konzerviramo v kislu.	Liste lahko uživamo sveže, v solatah, konce mlajših vej pa konzerviramo v kislu.	Je rastlina, ki vsebuje veliko eteričnih olj. Uživamo ga lahko tako surovega kot kuhanega. Iz te rastline je mogoče pridobiti tudi inulin, ogljikov hidrat, ki se uporablja kot prehransko dopolnilo.

Čeprav so bili potaknjenci postavljeni v rastlinjak izven običajne rastne sezone, so blage temperature v rastlinjaku, kondicioniranje temperature vode med 15 in 20 °C in prisotnost LED osvetlitve 10 ur na dan omogočili hitro rast potaknjencev po začetni fazi umirjanja. Izhajajoč iz posamezne biomase 3-5 g, so vse tri vrste rasle in februarja dosegle povprečno biomaso približno 100 g. Čeprav je bil poskus izveden na nekaj vzorcih, se zdi, da ti prvi rezultati kažejo na možnost gojenja teh vrst v rastlinjaki vse leto, ne da bi nujno sledili običajnim naravnim vegetativnim ciklom.

3.2 Abiotske spremenljivke

Opisna statistika v zvezi s časovnimi vrstami temperature vode, slanosti, raztopljenega kisika in pH za vsako vrstico je povzeta v tabeli 3.2, ki predstavlja dva najpogostejša indeksa položaja, to je povprečna in mediana vrednost, ter disperzijske indekse, to je standardna deviacija, STD, in interkvartilni razpon, IQR, najmanjše in največje vrednosti.

Kar zadeva koncentracijo raztopljenega kisika, so povprečne in mediane vrednosti koncentracije med obema črtama zelo podobne in njihova variabilnost je omejena: 50 % podatkov je med 92,5 in 97,5 %, medtem ko minimalne vrednosti nikoli niso padle pod 70 %. To kaže na optimalne pogoje za povpraševanje po hrani in dobro počutje orade (Bolzonella&al. 2023). pH je ostal na sprejemljivi ravni za ribe in primarne proizvajalce. Zabeležen je bil precej velik letni temperaturni razpon, ki pa ni ogrozil delovanja akvaponičnega sistema. Zahvaljujoč izdatni oksigenaciji so orade prebrodile potencialno kritično poletno obdobje. Znižanje temperatur pozimi je zmanjšalo učinkovitost biofiltra, vendar se v tem obdobju zmanjša tudi apetit orade, kar povzroči zmanjšanje izločanja dušika. Raven TAN, iz katere je mogoče izračunati koncentracijo prostega amoniaka ob poznavanju pH, se torej nikoli ni dvignila do nevarnih ravni. To je razvidno iz opisne statistike, navedene v tabeli 3.3, ki se nanaša na abiotske spremenljivke, zaznane tedensko. Koncentracija TAN je ostala pod 0,4 mgN/L: pri srednjem pH to ustreza najvišji koncentraciji NH_3 0,06 mgN/L. Koncentracija nitritov nikoli ni presegla 0,3 mgN/L. Koncentracija nitratov je dosegla visoke vrednosti, saj površina, ki je na voljo za hidroponično gojenje, ni sorazmerna z biomaso rib, gojenih v oddelku RAS, kot bo podrobneje razvidno iz izročila D1.4.2, ki predstavlja rezultate prototipa Digital Twin, uporabljenega v pilotni napravi. To je zahtevalo nekaj menjav vode, večinoma opravljenih avgusta 2024 in februarja 2025.

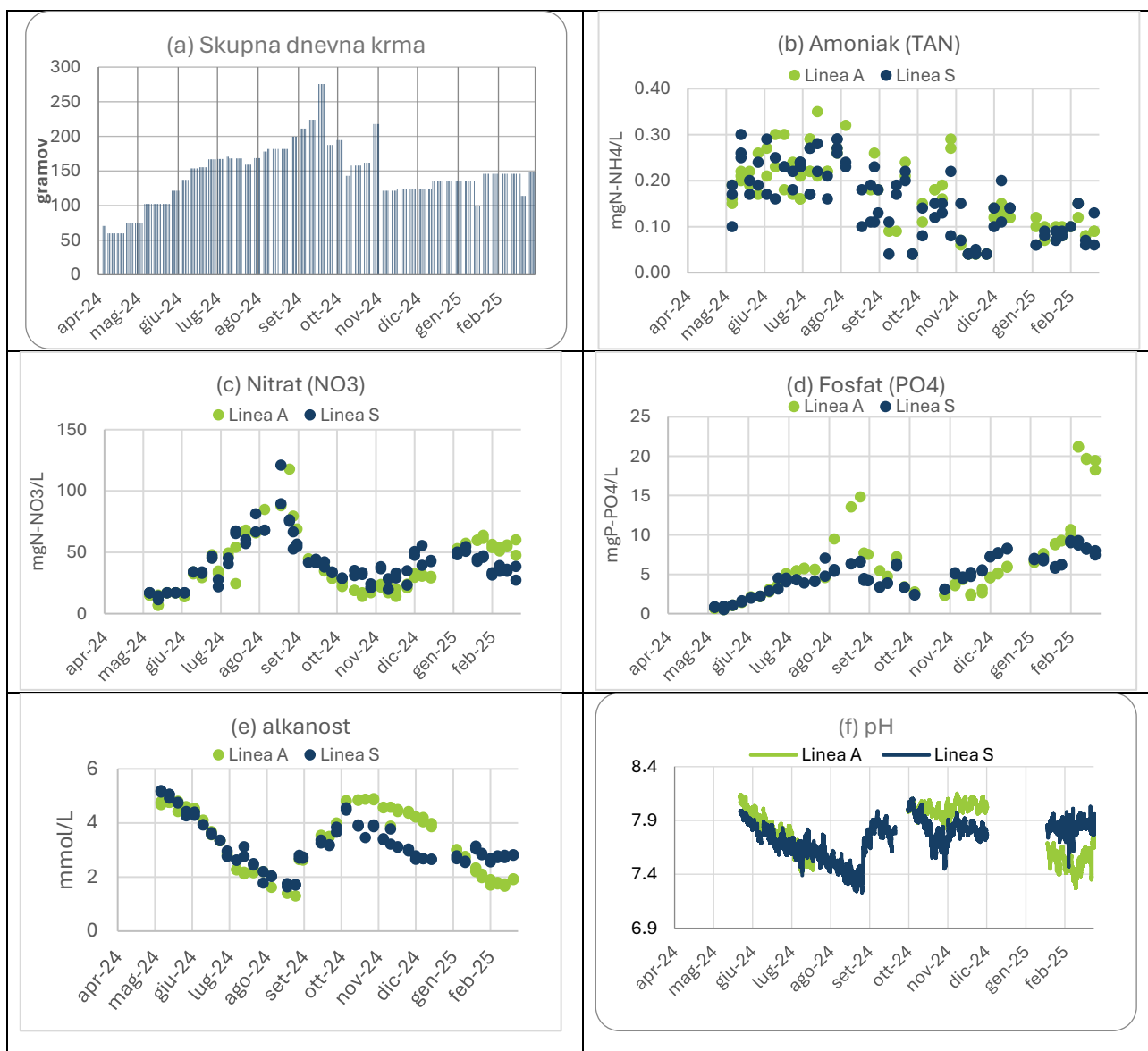
Kompleksnost procesov, ki potekajo v akvaponskem sistemu, in njihova dinamika je dobro prikazana na sliki 3.4, ki prikazuje razvoj dnevnega krmnega obroka koncentracij TAN, NO_3 , RP, ALK in pH v SA liniji od aprila 2024 do februarja 2025. Kot je razvidno, je koncentracija TAN povezana s krmnim obrokom, ki je nato moduliran s temperaturo, glej sliko 3.1. Koncentracija nitratov narašča od maja do avgusta, ko se izvede prvo redčenje, pri čemer se odstrani polovica volumna vode, ki kroži v sistemu, in jo nadomesti z umetno morsk vodo, ki se tukaj uporablja za zagotovitev ponovljivosti rezultatov. V istem obdobju je opaženo postopno zmanjševanje alkalnosti: to je posledica aktivnosti biofiltra, ki po (Dos Santos&al., 2023) odstrani večjo količino alkalnosti od tiste, ki jo v rezervoarje RAS vnesejo izločki TAN. Zmanjšanje alkalnosti povzroča sistematično negativno variacijo pH, ki gre od začetne vrednosti okoli 8, značilne za morsk vodo, do vrednosti okoli 7,2. Natančna nastavitev alkalnosti in pH bi zahtevala dodatek šibke baze, kot je soda bikarbona, da bi nadomestili izgubo alkalnosti. Ker je kislost vseeno ostala na znosni ravni, se to ni zgodilo. Po redčenju so se koncentracije nitratov približno prepolovile in še naprej padale v jesenskem obdobju, ko je bila biomasa salicornia višja in se je zmanjšal vnos dušika iz metabolizma rib.

Tabela 3-2: Opisna statistika abiotskih spremenljivk, ki jih spremljajo samodejni senzorji vsakih 15 minut. Statistika se nanaša na podatke, obdelane s platformo BQC.

	Povprečje	Mediana	STD	IQR	Min	maks
Temperatura AL [°C]	22.26	19.80	9.22	4.87	14.11	32.19
SA temperatura [°C]	23.03	23.58	9.28	5.22	11.14	32.32
Slanost AL [ppm]	17.50	17.69	3.45	2.21	10.52	24.19
Slanost SA [ppm]	17.49	17.45	1.26	1.09	0,26	21.77
DO [mg/L]	8.30	8.24	1.91	1.02	5.79	10.50
DO SA [mg/L]	8.26	7,86	1.83	1.14	5,89	11.36
NAREDI [%sat]	95,62	96.19	6.14	4.16	71.53	103,96
DO SA [%sat]	95.41	94,97	5.45	4.70	79,65	109.43
pH AL	7,84	7.90	0,43	0,23	7.27	8.22
pH SA	7.75	7.78	0,21	0,16	7.23	8.11

Tabela 3-3: Opisna statistika abiotskih spremenljivk, spremljanih z vzorčenjem in tedenskimi meritvami.

	Povprečje	Mediana	STD	IQR	Min	maks
TAN AL [mgN]/L]	0,17	0,16	0,08	0,13	0,04	0,40
TAN SA [mgN-L]	0,16	0,15	0,08	0,13	0,04	0,40
NO2 AL [mgN-NO ₃ /l]	0,07	0,06	0,05	0,04	0,01	0,27
NO2 SA [mgN-NO ₃ /l]	0,08	0,07	0,04	0,06	0,003	0,18
NO3 AL [mgN-NO ₃ /l]	38,56	32.15	21.40	33.59	6.68	117,65
NO3 SA [mgN-NO ₃ /l]	40,94	37,94	18.82	18.92	11.13	120.81
RP AL [mgP/l]	6.46	5.06	5.29	4,95	0,48	21.20
RP SA [mgP/L]	4.91	4.65	2.38	3.56	0,57	9.46
ALK AL [mgCaCO ₃ /L]	170,45	148,00	57,86	112,50	65,00	65,00
ALK SA [mgCaCO ₃ /L]	170,45	148,00	57,86	112,50	65,00	65,00



Slika 3-6: Časovna vrsta (a) ribje krme (kumulativno), (b) TAN, (c) NO₃, (d) fosfata, (e) alkalnosti in (f) koncentracij pH.

3.3 Ekotoksikološki testi

Analiza vplivov na sposobnost razmnoževanja morskega ježka *Paracentrotus lividus* je bila izvedena v prvih dveh vzorčenjih akvaponičnega sistema. Študija je ocenila odstotek neoplojenih jajčec glede na vzorce, odvzete iz osmih točk sistema. Za vsako vzorčenje so bile testirane tri različne koncentracije vzorca (100 %, 50 % in 25 %) za oceno EC₂₀ in EC₅₀, posebna pozornost je bila nato namenjena 100 % koncentraciji (kot je vzorec), ki je izpostavila najpomembnejše učinke. Vsak vzorec je imel svojo značilno sestavo hranil (NO₃⁻, PO₄³⁻, NH₄⁺, NO₂⁻), ki je odražala specifične pogoje na vsaki točki v sistemu. Rezultati so pokazali pomembne razlike med obema vzorčenjema, z izrazitim razvojem biološkega odziva, ki odraža spremembe pogojev rastline. Rezultati kažejo zanimiv razvoj med obema vzorčenjema, ki razkriva sposobnost testa za prepoznavanje zgodnjih sprememb v kakovosti vode. Pri prvem vzorčenju maja 2024 je bilo ugotovljeno, da sta EC₂₀ in EC₅₀ nad 100 % na vseh mestih vzorčenja, kar

kaže , **da najvišja testirana koncentracija ni mogla povzročiti pomembnih učinkov na oploditev** . Ta odgovor vzpostavlja jasno osnovo za ocenjevanje sistema. Drugo vzorčenje junija 2024 kaže bolj zapleteno sliko: medtem ko **vrednosti EC50 ostajajo nad 100 %**, kar kaže na **odsotnost hudih učinkov** , začnejo **vrednosti EC20** kazati odziv na nekaterih točkah vzorčenja in padejo pod 90 % , kar poudarja **začetek subletalnih učinkov**. Ta lastnost testa, tj. zmožnost zaznavanja zgodnjih učinkov (EC20), medtem ko ostaja v nekritičnem območju toksičnosti (EC50 >100 %), ga naredi posebej primerne kot sistem zgodnjega opozarjanja za spremljanje akvaponičnega sistema.

Pri testu oploditve na vzorcih morskega ježka iz maja 2024 je opaziti relativno nizko variabilnost, z vrednostmi med 5 % in 15 %. Točki UF-IN in UF-OUT prikazujeta najvišje odstotke neoplojenih jajčec (približno 15 %), kar ustreza tudi najvišjim koncentracijam hranil (NO₃: 95,4 in 99,4 mg/L; PO₄: 8,5 in 5,6 mg/L). Drugo vzorčenje, izvedeno junija 2024, kaže znatno povečanje odstotka neoplojenih jajčec v primerjavi s prvim vzorčenjem, pri čemer vrednosti odražajo povečanje koncentracije hranil v sistemu, glej sliko 3.5. Vzorec, vzet na vhodu v ribjo vodo Salicornia, kaže najvišji odstotek neoplojenih iker (približno 45 %), kar sovпада z najvišjimi zabeleženimi koncentracijami hranil (TN: 274,8 mg/L, PO₄-: 15,4 mg/L). Opazen je gradient učinka vzdolž linije Salicornia z zmanjšanjem inhibicije na točki FT-OUT (35 %) in nadaljnjim zmanjšanjem na točkah SA-IN in SA-OUT (20-30 %). Linija Ulva kaže bolj enoten profil, z odstotki neoplojenih jajčec, ki ostanejo okoli 30-35 % in relativno konstantnimi koncentracijami nitratov (NO₃: 188-206 mg/L). Rezultati regresijske analize med koncentracijami nitratov in fosfatov ter odstotkom neoplojenih jajčec morskega ježka *P. lividus* so v celoti navedeni v dodatku A. V obeh primerih kažejo visoko in pomembno korelacijo. Za nitrat korelacijski koeficient ($R = 0,978$) in determinacijski koeficient ($R^2 = 0,956$) kažeta, da je 95,6 % variabilnosti v odstotku neoplojenih jajc mogoče pojasnjeno s koncentracijo nitrata v opazovanem območju koncentracij (0–250 mg/L NO₃-), kar kaže na dosleden učinek, odvisen od odmerka. Podobni rezultati so bili pridobljeni za fosfat: visok in statistično značilen korelacijski koeficient ($R = 0,91$, $p < 0,01$) in koeficient determinacije ($R^2 = 0,829$) sta pokazala, da je 82,9 % variabilnosti v odstotku neoplojenih jajčec mogoče pojasniti s koncentracijo fosfata.

Fiziološki odziv enocelične alge *Isochrysis galbana* na vode akvaponičnega sistema smo ovrednotili z analizo inhibicije v sintezi glavnih fotosintetskih pigmentov, klorofila a (Chl a), klorofila c (Chl c) in skupnih karotenoidov v primerjavi z vzorcem negativne kontrole. Rezultati so podrobno opisani v Dodatku A in povzeti tukaj. *I. galbana*, izpostavljena vzorcem, ki vsebujejo različne koncentracije dušika in fosfata, je pokazala precejšnje razlike v vsebnosti klorofila in karotenoidov. Zlasti **prekomerne koncentracije dušika so povzročile inhibicijo sinteze vseh fotosintetskih pigmentov**.

Rezultati prvega vzorčenja, opravljenega konec maja 2024, poudarjajo nizek odstotek inhibicije (<25 %) na vseh vzorčnih mestih. Rezultati drugega vzorčenja, opravljenega konec junija 2024, razkrivajo izrazito spremembo pogojev obrata. Ravni inhibicije sinteze pigmenta pri *Isochrysis galbana* so se dramatično povečale, kar odraža znatno kopičenje hranil v sistemu (slika 3.5). Tretje vzorčenje, izvedeno sredi septembra 2024, kaže prve rezultate po redčenju in naknadni odstranitvi presežka nitratov in fosfatov. Linija ex-alg, v katero je bil od septembra uveden halofit *Sarcocornia*, kaže najvišjo stopnjo inhibicije, z vrednostmi, ki dosežajo 65-70% za klorofil a in skupne karotenoide ter približno 50% za klorofil c. Te vrednosti ustrezajo visokim koncentracijam hranil (NO₃: 224-229 mg/L, PO₄: 12,30-14,40 mg/L). Linija Salicornia predstavlja

bolj zmerno in enakomerno inhibicijo med pigmenti, z vrednostmi okoli 50% za vse tri parametre. Koncentracije hranil v tem delu so vmesne (NO₃: 134–192 mg/L, PO₄: 11,80–13,20 mg/L). Rezultati četrtega vzorčenja, opravljenega sredi oktobra 2024, poudarjajo pomemben razvoj akvaponičnega sistema, za katerega je značilno znatno zmanjšanje inhibicije na vseh točkah vzorčenja, skladno s podatki, prikazanimi na sliki 3.5. To izboljšanje je še posebej očitno pri novi liniji Sarcocornia, kjer je bila inhibicija zmanjšana na vrednosti med 5% in 20%, skupaj s stabilizacijo koncentracij hranil (NO₃: 67-77 mg/L, PO₄: 8,05-9,76 mg/L). Linija Salicornia ohranja nekoliko višje stopnje inhibicije, z vrednostmi okoli 30-45% in višjimi koncentracijami dušika (NO₃: 96-130 mg/L).

Neparametrična korelacijska analiza je poudarila zanimiva razmerja med parametri, spremljanimi v akvaponskem sistemu. Kot je bilo pričakovano, nitrati in fosfati kažejo najmočnejšo korelacijo (0,83), oba izhajata iz metabolitov, ki jih izločajo ribe. Pomemben vidik izhaja iz analize korelacije med fotosintetskimi pigmenti. Skoraj popolna korelacija med klorofilom a in c (0,96), skupaj z močnimi korelacijami s skupnimi karotenoidi (0,96-0,93), kaže na usklajen fiziološki odziv *I. galbana* na okoljske razmere. To kaže, da **stres, ki ga povzročajo hranila, sistemsko vpliva na celoten fotosintetski aparat alge.**

Regresijska analiza med nitratom (NO₃-), klorofilom a, klorofilom c in karotenoidi kaže negativne oziroma statistično značilne korelacije: $R = 0,941$ $p < 0,01$; $R = 0,888$ $p < 0,01$; $R = 0,879$ $p < 0,01$). Določevalni koeficienti kažejo, da je vsaj 75 % variabilnosti koncentracije pigmenta mogoče razložiti z nitratom. Poleg tega se rezultati ujemajo in kažejo, da lahko vrednosti koncentracije nitrata, višje od 200 mg/L, povzročijo izrazito inhibicijo sinteze treh pigmentov. Ti dokazi potrjujejo splošen zaviralni učinek nitrata na fotosintetično sintezo pigmenta pri *I. galbana*. in s tem sistemski vpliv nitratov na fotosintetski metabolizem alge.

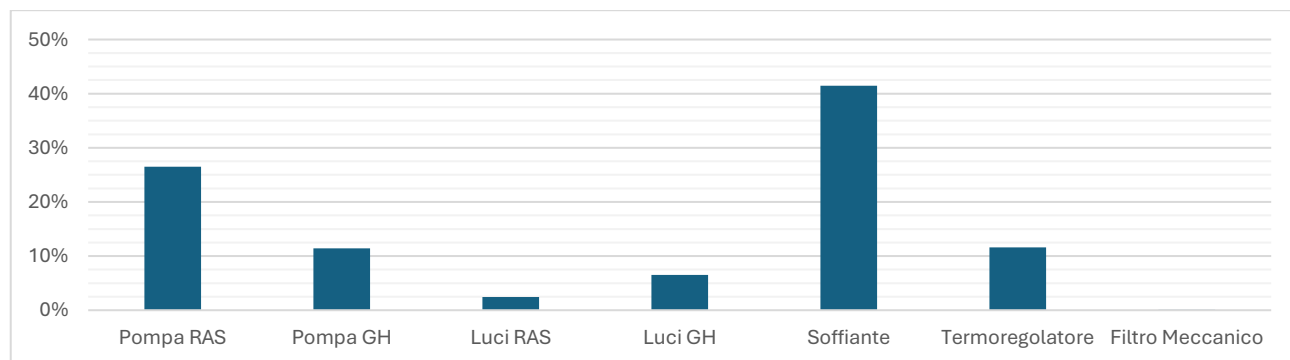
3.4 Poraba energije

Tabela 3-4: Ocenjena letna poraba energije na podlagi porabe, izmerjene v obdobju 27. 5. 2024 – 28. 2. 2025.

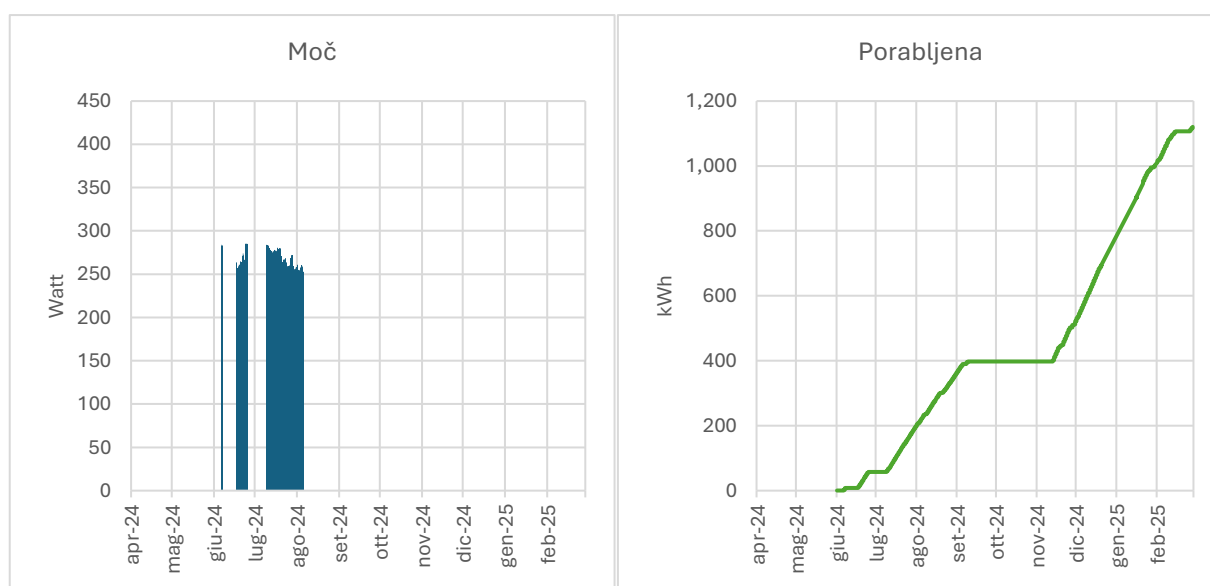
	št. enot	Poraba enote (kWh/leto)	Skupna poraba (kWh/leto)
Črpalka RAS	2	3,366	6,732
GH črpalka	2	1450	2.900
RAS luči	2	308	616
GH luči	2	831	1,662
Črpalka puhala	1	10.545	10.545
Termoregulator	2	1,476	2.952
Mehanski filter	2	9	18
Skupaj			25 400

Poraba energije pilotne naprave je bila precej visoka v primerjavi s proizvedeno biomaso, saj je šlo za **infrastrukturo, zasnovano predvsem za aplikativne raziskave** in predstavitvene namene in zato **ni optimizirana za proizvodne namene**. Odstotek incidence naprav je

namesto tega predstavljen na sliki 3.6. Kot lahko vidite, prezračevalna naprava, puhalna črpalka, porabi več kot 40 % celotne električne energije, obe črpalčki, ki uravnavata kroženje vode, pa skupaj okoli 36 %. Te naprave so bile vedno aktivne, zato je njihovo porabo mogoče oceniti z dobrim približkom iz instalirane moči. Naprave za regulacijo temperature prispevajo približno 10 %: v tem primeru je pomembno spremljanje porabe energije, saj je njihovo delovanje omejeno na določena obdobja v letu, kot prikazuje graf na sliki 3.7.



Slika 3-7: Prispevki glavnih naprav v odstotkih k ocenjeni letni porabi električne energije.



Slika 3-8: Zgodovinska serija porabe naprave za regulacijo temperature vode.

4. SMERNICE ZA MORSKO AKVAPONIKO

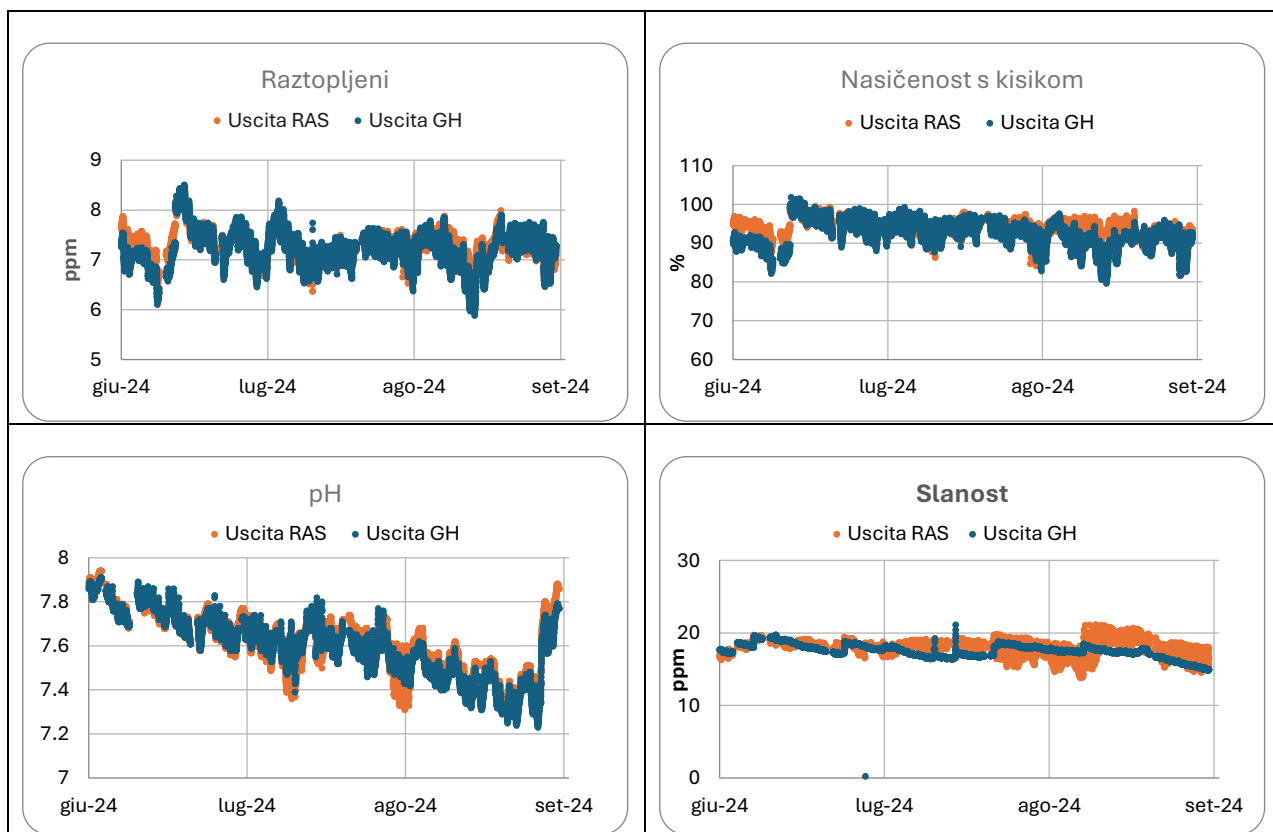
Morska akvaponika še ni konsolidirana in do neke mere standardizirana proizvodna tehnologija, kot je zdaj akvaponika, v kateri se soproizvajajo sladkovodne ribe in različne vrste tržno zanimivih rastlin. Zlasti na programskem območju še ni proizvodnih obratov za morsko akvaponiko, glavne prejšnje izkušnje pa so bile izvedene v okviru raziskovalnih projektov v programih PRIMA in H2020. Čeprav so pomembni, so rezultati, pridobljeni v teh projektih, v bistvu kvalitativni: zlasti v okviru projekta H2020 NewTechAqua je bila dokazana izvedljivost proizvodnje cipelj in steklanke v recirkulacijskem sistemu, ne da bi količinsko opredelili donos glede na okoljske razmere ter zahtevane vložke materiala in energije.

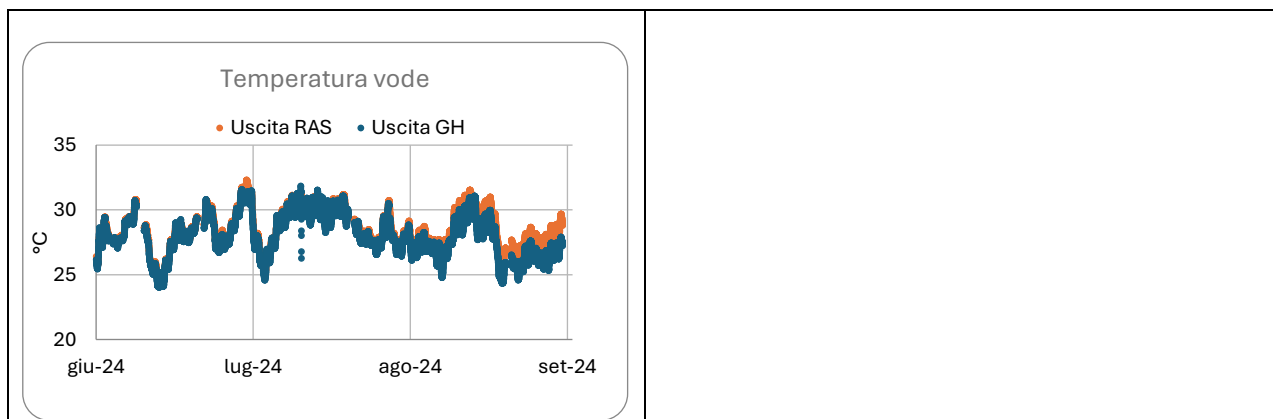
Projekt BeBlue je želel preseči dosedanje stanje tehnike znanja s sprejetjem kvantitativnega pristopa, katerega namen je zagotoviti uporabne elemente za prenos tehnologije v kmetijsko-živilski sektor. Rezultati, prikazani v prejšnjem poglavju, skupaj s tistimi, ki so določeni v Izdelku D1.4.2 in prototipom »digitalnega dvojčka«, opisanem v Izdelku D1.4.1 in kmalu brezplačno dostopnem prek spleta prek platforme »DiGiPonic«, po našem mnenju kažejo, da je bil ta cilj dosežen.

Izhajajoč iz teh rezultatov, so v tem poglavju povzeti nekateri koristni premisleki, da bi orisali optimizacijsko pot, ki vodi do načrtovanja in upravljanja morskih akvaponičnih obratov, ki so trajnostni z ekonomskega in okoljskega vidika.

4.1 Sistem spremljanja

Sistem za spremljanje, nameščen v pilotnem obratu, je bil zasnovan tako, da poveča količino in kakovost zbranih podatkov, ki so uporabni za identifikacijo, kalibracijo in validacijo prototipa Digital Twin, opisanega v izročilu D1.4.2. Zaradi tega je nekoliko odveč in bi ga bilo mogoče poenostaviti v proizvodno usmerjenih obratih, kot je prikazano spodaj.





Samodejno spremljanje kakovosti vode. Samodejni sistem za spremljanje temperature vode, slanosti, raztopljenega kisika in pH je zagotovil pomembne informacije in se priporoča za namestitve. Vendar poleg določenega začetnega vložka zahteva stalno pozornost h kakovosti podatkov in precej pogoste posege kalibracije sonde, kar vpliva tudi na obratovalne stroške. Zato je pomembno optimizirati število avtomatskih senzorjev: rezultati, dobljeni v projektu BeBlue, kažejo, da lahko en senzor zadošča za majhne/srednje velike sisteme, kot so tisti, opisani v dokumentu D.2.1.1: kot je razvidno iz slike 4.1, so vrednosti, zaznane v dveh točkah sistema, na izhodu iz RAS in na izhodu iz hidroponičnega rastlinjaka, zelo podobne glede temperature in slanosti in se ne razlikujejo preveč drugi dve spremenljivki. To bi lahko bila tudi posledica majhnosti pilotne naprave, vendar bi bil fazni pristop, npr. namestitev senzorja, preverjanje njegovega delovanja in ocenjevanje variabilnosti v sistemu s prenosnimi instrumenti se zdi najboljši način za uskladitev stroškov in koristi samodejnega nadzora.

Samodejno spremljanje temperature zraka, relativne vlažnosti in PAR. Začetni stroški so nižji od spremljanja kakovosti vode in senzorji, nameščeni v pilotni napravi, so se izkazali za robustne. Spremljanje teh parametrov je bistvenega pomena v hidroponskem rastlinjaku, vendar so stalne meritve vlažnosti in temperature zraka pomembne tudi v RAS, saj vplivajo na izmenjavo toplote med vodo in zrakom: porabo naprav za kondicioniranje temperature vode je zato mogoče modulirati glede na zaznane vrednosti.

Slika 4-1: Vrednosti, zaznane na dveh točkah v liniji SA sistema.

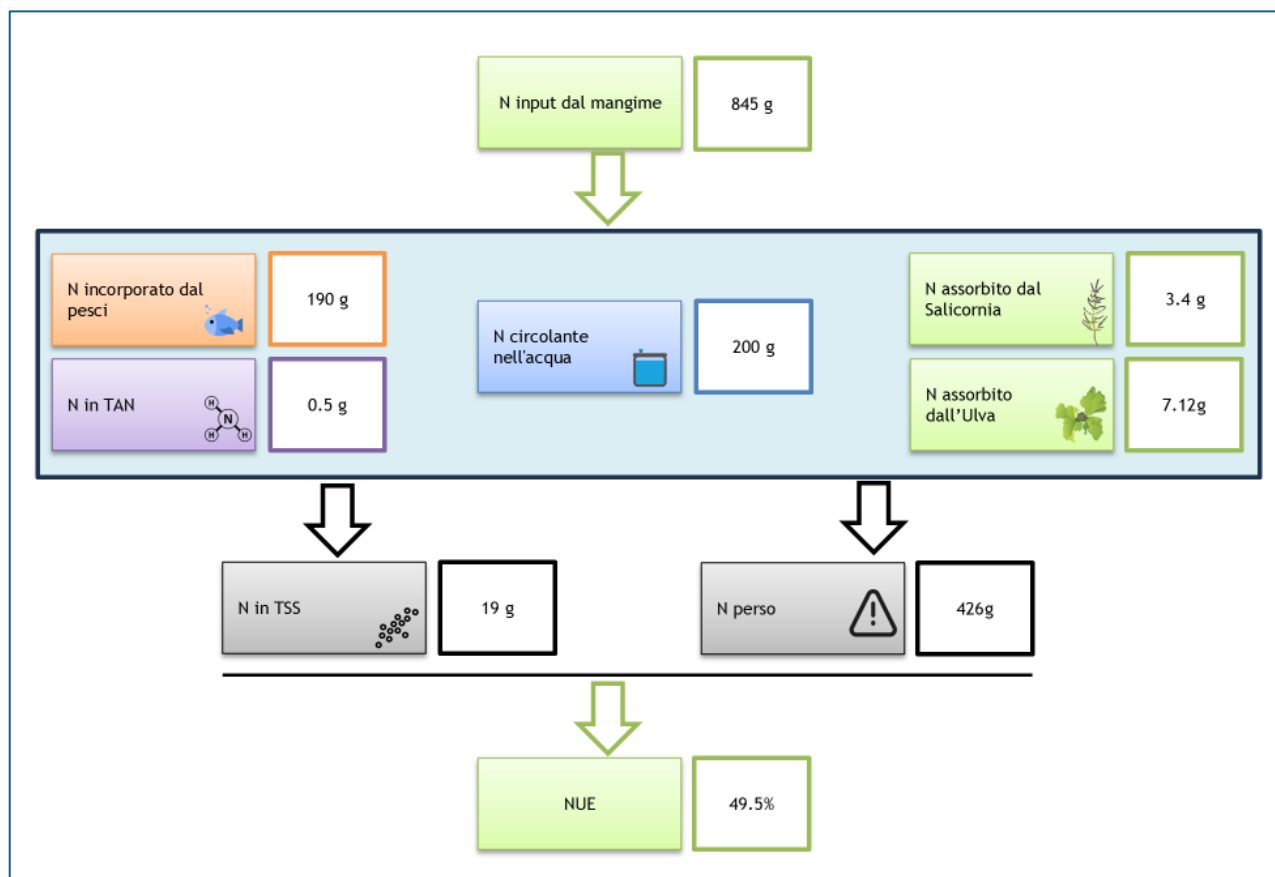
Tedensko spremljanje kemijskih spremenljivk

Spremljanje kemičnih spremenljivk je zelo pomembno, tako za zagotovitev, da vrednosti potencialno strupenih spojin, kot je amoniak, ostanejo pod tolerančnimi pragovi, kot za oceno ravnovesja med metaboliti, ki jih proizvajajo ribe, in njihovo asimilacijo s strani primarnih proizvajalcev. Izvedeno je bilo s spektrofotometrom in posebnimi analitskimi kompleti za vsako spremenljivko. Preizkusi, izvedeni s primerjavo zbranih podatkov z vrednostmi, pridobljenimi s standardnimi metodologijami, so pokazali, da ta vrsta instrumentov, relativno poceni in enostavna za uporabo, zagotavlja dovolj zanesljive vrednosti TAN, NO₂, NO₃, RP in alkalnosti. Ugotovljeno je bilo, da je tedenska pogostost ustrezna, vendar je izbira pogostosti vzorčenja v veliki meri odvisna od variabilnosti, ki jo kažejo parametri. To bi lahko bilo bolj omejeno in odvisno od lokacije: po poskusnem obdobju bi se lahko zmanjšalo, s čimer bi se zmanjšali operativni stroški za osebje in potrošni material.

Spremljanje z biološkimi testi. Rezultati so poudarili učinkovitost kombinirane uporabe dveh bioindikatorjev, morskega ježka *Paracentrotus lividus* in enocelične alge *Isochrysis galbana*

, pri spremljanju kakovosti vode akvaponskega sistema. Organizma sta pokazala komplementarne in dosledne odzive na kopičenje hranil v sistemu. Vendar je treba poudariti, da pragovi akutne toksičnosti niso bili nikoli doseženi, kar dokazuje dejstvo, da tudi v nerazredčenih vzorcih (kot so) nikoli ni bila dosežena 100-odstotna inhibicija. Preskusi oploditve z morskim ježkom *P. lividus* so pokazali jasno odvisno od odmerka razmerje med koncentracijami hranil in zaviranjem reproduktivne sposobnosti, s posebno močno korelacijo z nitrati ($R^2 = 0,956$, $p < 0,01$). Vzporedno je enocelična alga *I. galbana* pokazala znatne spremembe v sintezi fotosintetskih pigmentov, pri čemer vzorec odziva odraža razvoj rastline v štirih vzorčenjih. Močna negativna korelacija med hranili in pigmenti ($R = -0,93$ za NO_3^- proti klorofilu a) potrjuje občutljivost tega organizma kot indikatorja stresa s hranili. Z metodološkega vidika ima razviti protokol nedvomne prednosti: hitrost izvedbe, ponovljivost rezultatov, ekonomska vzdržnost in enostavnost implementacije, zaradi česar je privlačen tudi za majhne proizvodne obrate. Pravzaprav uporabljeni instrumenti, osredotočeni na prenosni terenski spektrofotometer, predstavljajo široko uporabljeno napravo pri spremljanju ribogojstva z nizkimi stroški, ki imajo obrobni vpliv na celotno naložbo. To orodje, ki se že pogosto uporablja za analizo hranil, se lahko uporablja na enak način za vrednotenje fotosintetskih pigmentov, kar omogoča nizke operative stroške in naredi protokol dostopen in trajnosten.

4.2 Dušikova bilanca in proizvodni potencial



Slika 4-2: Bilanca stanja NUE

Eksperimentiranje proizvodnje makroalg in halofitnih rastlin je imelo dva različna rezultata: v prvem primeru so bile dosežene zelo visoke stopnje rasti, vendar za kratko obdobje, med aprilom in koncem junija. V drugem pa kvantitativna opažanja v zvezi s salicornia kažejo na zelo

zanimive stopnje rasti, enake približno 140 g/mesec, medtem ko bolj kvalitativna opazovanja v zvezi s *Sarcocornia*, *Limione* in *Inula* kažejo, da je te vrste mogoče enostavno proizvesti v obratih za reciklažo skozi vse leto. Podatki na sliki 3.5 pa kažejo, da

Po pričakovanjih pilotna naprava ni optimalno dimenzionirana, saj je že zelo nizka gostota ribje biomase, ki ne presega 6 kg/m^3 , povzročila presežek nitratov, kar je zahtevalo posege redčenja. Ocena proizvodnega potenciala *salicornia* glede na biomaso orade je nadalje raziskana v izročilu D1.4.2 z uporabo rezultatov prototipa Digital Twin. Tukaj je predstavljenih nekaj premislekov, ki temeljijo predvsem na opazovanjih. V akvaponskem sistemu lahko potekajo procesi, ki sproščajo dušik v ozračje in omejujejo njegovo uporabo pri primarnih proizvajalcih (Wongkiewa & al., 2017). Ob predpostavki, da so ti procesi v prvem približku zanemarljivi, se je dušik iz amonijaka, ki ga je sprostila orada v obdobju od 5. maja do 20. avgusta 2024, v katerem ni prišlo do pomembne izmenjave vode, akumuliral v bistvu kot nitrat, ki so ga primarni proizvajalci asimilirali v zelo omejenem obsegu. Rezultati masne bilance v tem obdobju so povzeti na sliki 4.2. sledeča logika je povzeta spodaj. Če odštejemo koncentracijo, izmerjeno 20. avgusta, od tiste, izmerjene 5. maja v liniji *salicornia*, dobimo $0,0738 \text{ gN/L}$, pomnožimo z volumnom in dobimo približno 200 gramov dušika. Glede na literaturo je elementarna sestava salikornije zelo spremenljiva: glede na vrednost, navedeno v (O'Leary, 1985), je beljakovinska frakcija enaka približno 5,7 % suhe teže, kar pomeni 0,09 % dušika v sveži teži. Z najboljšim izkoristkom dušika, nabranega v obliki nitrata v obravnavanih štirih mesecih, bi torej lahko izvedli dva proizvodna cikla salikornije: z izbiro najboljših rastlin bi lahko pridobili približno 300 gramov sveže teže na rastlino na cikel. Vsaka rastlina bi sekvestrirala 0,17 grama dušika na cikel: ob predpostavki gostote sajenja 100 rastlin/m² (Shpigel et al., 2013) bi en kvadratni meter obdelovalne površine odstranil približno 17 gN. Z upoštevanjem dveh ciklov bi bilo možno proizvesti približno 720 kg biomase na 24 kvadratnih metrih.

4.3 Poraba energije

Poraba energije je eden največjih obratovalnih stroškov, verjetno največji v scenariju, ko je obrat digitaliziran in avtomatiziran, kar zmanjšuje stroške osebja. Poraba, ki jo ustvari pilotna naprava, je izrazito visoka in ni reprezentativna za dejansko porabo. Podatki, zbrani v spremljanju, predlagajo naslednje optimizacijske ukrepe:

Črpanje vode: v sistemih z nizko gostoto biomase, kot so povezani akvaponični sistemi, je mogoče zmanjšati hitrost kroženja vode, ne da bi koncentracija metabolitov, ki jih oddajajo ribe, dosegla nevarne mejne vrednosti;

Prezračevanje: zračna črpalka je neprekinjeno delovala in je prispevala približno 40 % skupne porabe električne energije. To je omogočilo vzdrževanje optimalnih koncentracij raztopljenega kisika, zelo blizu in v nekaterih primerih celo višje od vrednosti nasičenja. Z uporabo avtomatskega nadzornega sistema pa bi bilo možno skrajšati čas delovanja, saj je izbrana vrsta v optimalnih pogojih v območju 70-100% nasičenosti.

Kondicioniranje temperature vode : Delovanje naprav ni optimizirano, saj je bil sistem za spremljanje temperature zraka pridobljen šele pred kratkim. Modeliranje izmenjave toplote voda-zrak bi lahko vodilo aktiviranje teh naprav.

5. SKLEPI

Rezultati, predstavljeni v prejšnjih poglavjih in v Dodatku A, poudarjajo, da je aktivnost A1.2 »Testiranje novih izdelkov: morska akvaponika« v celoti dosegla glavni cilj, predviden v fazi načrtovanja, in prikazuje možnost: i) pridelave užitnih kopenskih rastlin, ki lahko prenašajo visoko slanost, kot je salicornia; ii) pridelavo morske solate v nadzorovanem okolju v recirkulacijskem sistemu. V obeh primerih gre za izdelke visoke ekonomske vrednosti, ki se vse pogosteje uporabljajo ne le v prehrani, temveč tudi v nutricevtikih.

Izkušnje, pridobljene pri tej dejavnosti, in količina zbranih podatkov nam je omogočila zbiranje dragocenih podatkov in informacij za nadaljnji razvoj morske akvaponike. Z uporabo koncepta tehnološke stopnje pripravljenosti ali »TRL« je mogoče oceniti, da so rezultati BeBlue **prvič omogočili doseganje na programskem področju TRL 7**, »Demonstracija prototipa v operativnem okolju«, začeni s TRL 4 »Tehnologija, potrjena v laboratoriju«, kot je razvidno iz prejšnjih izkušenj v raziskovalnih projektih, kot je »SIMTAP« <https://www.simtap.eu/>, financiran v okviru programa PRIMA »Ne wTechAqua“, <https://cordis.europa.eu/project/id/862658>, financiran v okviru programa H2020.

Zbrani kvantitativni podatki so nam dejansko omogočili:

- pridobiti **kvantitativne ocene stopenj rasti salicornia in morske solate** v povezavi z dejavniki, ki lahko vplivajo nanje, kot so koncentracije raztopljenih snovi, temperatura vode in zraka;
- oceniti prednosti in slabosti različnih strategij spremljanja, vključno z ekotoksikološkimi testi, tako v smislu začetnih kot operativnih stroškov;
- natančno oceniti porabo energije sistema, kar je bistvena predpostavka za usmerjanje njihove optimizacije;
- kvantificirati masne bilance, zlasti dušika, s čimer utira pot za boljše razumevanje zapletenih bioloških in kemičnih procesov, ki potekajo v akvaponskem sistemu;
- zagotoviti trdno zbirko podatkov za razvoj in validacijo dinamičnega modela, razvitega v dejavnosti A1.4 in opisanega v dokumentu D1.4.2, ki predstavlja temeljni element »digitalnega dvojčka« ali digitalnega dvojčka akvaponičnega sistema.

Zadnji rezultat je izrednega pomena za nadaljnji razvoj morske akvaponike: dinamični model, ki je prosto dostopen prek uporabniškega vmesnika, ki bo dokončan v zadnjem semestru projekta, omogoča valorizacijo in posplošitev tukaj predstavljenih rezultatov z njihovo uporabo tako v fazi načrtovanja kot v fazi optimizacije upravljanja.

6. Bibliografija

Fore M., Frank K., Norton T., Svendsen E., Alfredsen JO, Dempster T., Eguiraun H., Watson W., Stahl A., Sunde LM, Schellewald C., Skoien KR, Alver MO, Berckmans D., 2018. Precizno ribogojstvo: nov okvir za izboljšanje proizvodnje v ribogojstvu. Biosyst Eng 173: 176–193. <https://doi.org/10.1016/j.biosys.stebila.eng.2017.10.014>

Royer, E. & Pastres, R., 2022. Asimilacija podatkov kot ključni korak k izvajanju učinkovitega upravljanja z raztopljenim kisikom v kopenskem ribogojstvu. Aquaculture International. <https://doi.org/10.1007/s10499-022-01028-w>.

dos Santos, A. M., Bernardino, L. F., Attramadal, K. J. K. in Skogestad, S. (2023a). Stalni in dinamični model za recirkulacijske ribogojne sisteme z vključenim pH. Aquacultural Engineering, 102, 102346. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2023.102346>

Bolzonella, M., R. Rizzi, R. Pastres, R. Modeliranje sistema za ekološko intenzifikacijo gojenja brancina in orade v celinskih vodah. Dobavljivi projekt D4.2 NewTechAqua H2020. <https://cordis.europa.eu/project/id/862658>.

Shpigel, M., Ben-Ezra, D., Shauli, L., Sagi, M., Ventura, Y., Samocha, T., & Lee, J. J. (2013). Zgrajeno mokrišče s Salicornia kot biofiltrom za odpadne vode marikulture. *Ribogojstvo*, 412–413, 52–63. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2013.06.038>

O'Leary, J. W., Glenn, E. P. in Watson, M. C. (1985). Kmetijska proizvodnja halofitov, namakanih z morsko vodo. *Biološka slanost v akciji: bioproizvodnja s slano vodo*, 311–321. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5111-2_21

Sumeth Wongkiewa, Zhen Hub, Kartik Chandranc, Jae Woo Leed, Samir Kumar Khanala, * Transformacije dušika v akvaponičnih sistemih: pregled. Akvakulturno inženirstvo 76 (2017) 9–19

7. PRILOGA A

Uredila Matteo Maglito in Marco Francese

UVOD

Spremljanje kakovosti vode

Ekotoksikološki testi predstavljajo bistveno orodje pri **spremljanju akvaponskih sistemov, saj zagotavljajo dopolnilne** in pogosto bolj poglobljene informacije kot tradicionalni **kemijsko-fizikalni parametri**. Medtem ko slednji (pH, temperatura, ravni raztopljenega kisika, dušika in fosfata) opisujejo trenutne okoljske razmere rastline, ekotoksikološki testi ocenjujejo dejanski biološki vpliv teh pogojev in razkrivajo **subletalne in letalne učinke**, ki bi lahko ušli običajnim kemičnim analizam.

Posebna občutljivost organizmov, uporabljenih v ekotoksikoloških testih, omogoča zgodnje odkrivanje okoljskih sprememb in deluje kot **zgodnji opozorilni sistem** za morebitne kritične težave v sistemu. Pomemben primer je **spremljanje eutrofikacije**, kompleksnega pojava, ki ga sproži presežek hranil (predvsem dušika in fosforja), ki lahko resno ogrozi ravnovesje akvaponičnega ekosistema. V tem kontekstu ekotoksikološki testi omogočajo pravočasno oceno bioloških učinkov kopičenja hranil, kar omogoča ciljno usmerjene preventivne posege.

Integracija ekotoksikoloških testov in kemijsko-fizikalnih analiz predstavlja celovit pristop k oceni tveganja za okolje, ki je temeljnega pomena za **razumevanje kompleksnih interakcij med različnimi kemičnimi spojinami in njihovih sinergijskih učinkov na vodne organizme**. Ta integrirana metoda podpira bolj zavestno in trajnostno upravljanje sistema, zagotavlja optimalne pogoje za rast rib in rastlin ter spodbuja dolgoročno stabilnost celotnega akvaponičnega sistema.

KONTEKST IN METODOLOGIJA

Za oceno kakovosti vode v obratu za morsko akvaponiko, ki se nahaja v znanstvenem kampusu Mestre Univerze Ca' Foscari v Benetkah, sta bila izbrana dva **bioindikatorska organizma** : **morski ježek *Paracentrotus lividus*** in **morske mikroalge *Isochrysis galbana*** . Izbira teh organizmov je bila določena tako z njihovo **visoko občutljivostjo na hranila**, kot so dušikove in fosfatne spojine, kritične komponente v akvaponičnih sistemih, kot tudi s **preprostostjo in hitrostjo testnih protokolov** .

Paracentrotus lividus

Test **oploditve** (spermiotoksičnost) z morskim ježkom ***Paracentrotus lividus*** je bil izveden po standardiziranem protokolu, opisanem v ISPRA, Quaderni – Ricerca Marina 11/2017. Preskus vključuje izpostavitve določene količine moških spolnih celic raztopinam, ki jih je treba analizirati, da bi **ocenili morebitno zaviranje njihove sposobnosti oploditve** . Protokol vključuje začetno fazo izpostavljenosti semenčic vzorcu, ki traja 1 uro, čemur sledi faza oploditve, ki traja 20 minut. Nato se test odčita pod optičnim mikroskopom. Ocenjena končna **točka** je **odstotek jajčec, ki ne kažejo oploditvene membrane** , vidne kot jasen halo okoli jajčeca. V procesu analize se štejejo za oplojena le jajčeca s popolnoma ali delno oblikovano membrano, za neoplojena pa nezrela jajčeca in tista, ki kažejo znake poškodbe (slika A-1). Vpliv strupenih snovi na oploditev je povezan predvsem z njihovim vplivom na gibljivost semenčic. Spermatozoidi so še posebej občutljivi na spremembe pH, temperature in osmotskega tlaka, kar lahko ogrozi njihovo sposobnost gibanja in molekularne mehanizme, potrebne za prepoznavanje in penetracijo jajčne celice. **Različne oblike raztopljenega dušika lahko bistveno motijo proces gnojenja**. Amoniak ($\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$) lahko neposredno spremeni gibljivost semenčic s spremembami znotrajceličnega pH in delovanja mitohondrijev, kar ogrozi sposobnost semenčic, da dosežejo jajčno celico. Nitrati (NO_3^-), čeprav so manj strupeni, lahko v **visokih** koncentracijah motijo energijsko presnovo semenčic in zmanjšajo njihovo učinkovitost gibanja. Nitriti (NO_2^-) so še posebej kritični, ker lahko poslabšajo mehanizme oksidativne fosforilacije, potrebne za gibljivost semenčic, in lahko tudi motijo površinske beljakovine, ki sodelujejo pri prepoznavanju gamete.

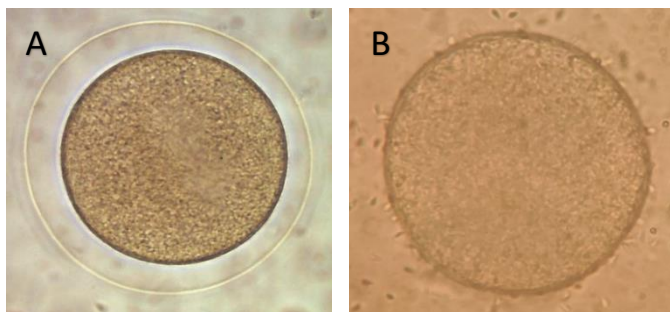


Figura A-1 - Uovo di *Paracentrotus lividus*
(A) fecondato e (B) non fecondato

Isochrysis galbanum

Isochrysis galbana (slika A-2) je enocelična morska mikroalga, ki je bila izbrana kot testni organizem zaradi svoje posebne **občutljivosti na dušikove spojine** . Čeprav so te spojine glavni vir prehrane, lahko **visoke koncentracije** dušika in fosforja povzročijo **spremembe v njihovi fiziologiji** , zaradi česar je ta organizem posebej primeren za spremljanje kakovosti

vode v morskih akvaponičnih sistemih, kjer je nadzor dušikovih in fosfatnih spojin ključnega pomena. Odziv telesa na izpostavljenost odvečnim hranilom se kaže s pomembnimi spremembami v proizvodnji treh glavnih pigmentov: **klorofila a**, **klorofila c** in **skupnih karotenoidov**. Različne oblike dušika, prisotne v vodi, posebej vplivajo na sintezo teh pigmentov. Amoniak, ki predstavlja najbolj strupeno obliko, povzroča hitre spremembe v vsebnosti pigmenta s spremembami **znotrajceličnega** pH in energetske presnove. Čeprav so nitrati vir dušika, ki ga telo lahko uporablja, lahko, če so prisotni v prevelikih koncentracijah, povzročijo oksidativni stres in ogrozijo sintezo pigmentov. Nitriti po drugi **strani** v glavnem motijo procese prenosa elektronov v fotosintezi, kar neposredno vpliva na učinkovitost fotosinteze in posledično proizvodnjo pigmentov.

Za izvedbo testov je bil upoštevan protokol, določen z metodo APAT-IRSA/CNR (Priročniki in smernice 29/2003). Alge, vzete iz matične kulture, smo izpostavili vzorcem 96 ur. Ob koncu izpostavljenosti smo zbrali biomaso alg in ekstrahirali pigmente z uporabo 90 % acetona kot topila z inkubacijo 24 ur. Končna kvantifikacija koncentracije pigmenta je bila izvedena s spektrofotometričnimi meritvami pri različnih ustreznih valovnih dolžinah.

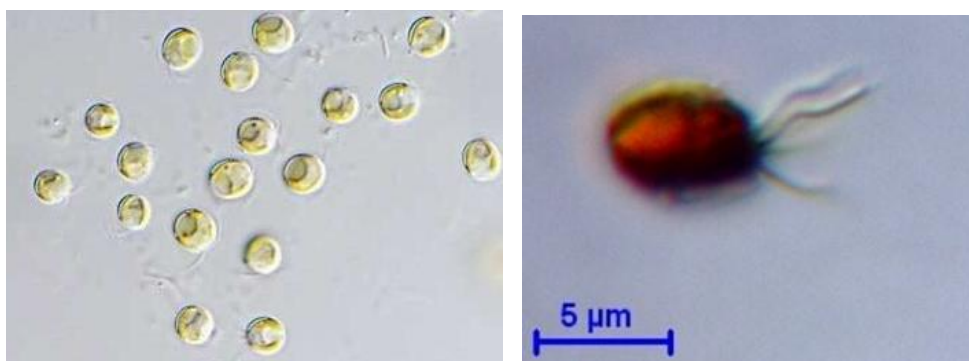


Figura A-2 - *Isochrysis galbana*

PRAKTIČNA UPORABA

komplementarno orodje kemijskim analizam v akvaponičnih sistemih je predlagana izvedba sistema biološkega monitoringa na osnovi mikroalge *Isochrysis galbana*. Pomen vključevanja tega biološkega pristopa je v njegovi zmožnosti zagotavljanja bolj integrirane ocene stanja sistema. Medtem ko kemijske analize zagotavljajo takojšen "posnetek" parametrov vode, uporaba bioindikatorjev omogoča **ovrednotenje kumulativnega biološkega učinka** rastlinskih pogojev, ki deluje kot sistem za prepoznavanje morebitnih kritičnih težav. Bioindikatorji lahko torej razkrijejo težave, ki morda niso takoj očitne zgolj s kemijskimi analizami, kar omogoča **zgodnje opozarjanje** in s tem preventivne posege za učinkovitejšo upravljanje rastline.

Isochrysis galbana je bila izbrana zaradi široke **komercialne dostopnosti** in **široke uporabe** v sektorju ribogojstva. Ta enocelična alga se običajno uporablja kot živilska kultura za ličinke mehkužcev, rakov in mladice različnih vrst morskih rib, zato jo je enostavno najti pri specializiranih dobaviteljih. Zaradi njegove široke razširjenosti in uporabe v morskem okolju je še posebej primerno orodje za biološko spremljanje akvaponičnih sistemov v slani vodi, saj

združuje trdno osnovo znanstvenih spoznanj s praktičnostjo metode, ki jo lahko sprejmejo tudi rejci ali kmetje.

Pravzaprav lahko samo vizualno opazovanje barve alg v kiveti zagotovi pomembne predhodne indikacije o zdravju sistema: **barva**, ki odstopa od tipičnega zlato-rjavega tona, lahko signalizira spremembe parametrov rasti, presnovni stres ali prehranska neravnovesja. Za podrobnejšo analizo vsebnosti pigmentov je mogoče uporabiti **spektrofotometrične tehnike** za natančno določitev sestave in koncentracije fotosintetskih pigmentov, ki zagotavljajo kvantitativne informacije o presnovnem stanju in stresu mikroalg.

Pomemben tehnični vidik je možnost **povezave nekaterih fotobioreaktorjev** za rast populacije enoceličnih alg neposredno na akvaponski sistem brez zahtevnih strukturnih sprememb, kar omogoča hitro in minimalno invazivno izvedbo. Obstaja torej možnost implementacije sistema kot **"sam-made" rešitve**, po začetnem izobraževanju, primernem za rejce ali kmete. Z ekonomskega vidika je torej lahko sistem zanimiv tudi za male proizvajalce. Začetna postavitev zahteva majhno naložbo v nakup osnovne opreme, kot sta fotobioreaktor in prenosni terenski spektrofotometer, ki je lahko enak tistemu, ki se uporablja za kemijske analize. Stroški upravljanja so omejeni predvsem na nakup rastnega medija in potrošnega materiala, zaradi česar je sistem dolgoročno vzdržen. Začetna naložba se lahko amortizira z **zmanjšanjem pogostosti kemičnih analiz zunanje** in predvsem zahvaljujoč preprečevanju težav, ki bi lahko zahtevale drage posege. Nazadnje lahko proizvajalci razvijejo lastno referenčno zbirko podatkov, ki je specifična za njihov obrat, z integracijo biološkega spremljanja z običajnimi praksami upravljanja.

Medtem ko je zgoraj opisana enocelična alga dostopen bioindikator, ki ga lahko uporablja tudi nespecializirano osebje, test z **morskim ježkom *Paracentrotus lividus*** zahteva bolj specifične veščine in laboratorijski kontekst. Kljub temu test na morskega ježka ostaja hitra, enostavna in hitra metoda biološkega spremljanja, ki zagotavlja pomembno diagnostično učinkovitost.

VZDRŽEVANJE TESTNIH ORGANIZMOV

Osebki ***Paracentrotus lividus***, uporabljeni v poskusu, so bili novembra 2023 **nabrani v Tržaškem zalivu** in ves čas testiranja vzdrževani v objektu Shoreline, ki se nahaja v Area Science Park of Padriciano (TS). Pogoji **bivanja** so bili stalno **nadzorovani**, da bi zagotovili dobro počutje organizmov, s posebnim poudarkom na nadzoru temperature, slanosti, oksigenacije in kakovosti vode. Akvariji so bili redno **čiščeni** in opremljeni z ustreznimi filtrirnimi sistemi. Organizmi so bili primerno **hranjeni**, da so ohranili aktivne spolne žleze, in vzdrževani v ustreznem fotoperiodu. Po obdobju aklimatizacije so bili osebki **identificirani po spolu** in ločeni v ločene rezervoarje za samce in samice (slika A-3). Pomembno je poudariti, da je bilo med celotnim poskusom zdravstveno stanje organizmov stalno spremljano in nikoli ni kazalo znakov ogrožanja.



Figura A-3 - *Paracentrotus lividus* (A) femmine e (B) maschi

Kulture *Isochrysis galbana* so bile vzdrževane v istih strukturah, v **nadzorovanih okoljskih pogojih** s posebnim poudarkom na temperaturi, svetlobnem režimu in oksigenaciji (slika A-4). Mikroalge so gojili z gojiščem Guillard f/2, pri čemer so kulture tedensko menjavale, da so populacije ohranile na optimalnih stopnjah rasti.

Za oba organizma **je bila uporabljena naravna morska voda , ki je bila podvržena strogemu postopku sterilizacije** , ki je vključeval tako UV obdelavo kot filtracijo skozi 0,22 mikrometrске filtre iz steklenih vlaken. Ta protokol upravljanja je omogočil zagotavljanje optimalnih pogojev za vzdrževanje organizmov in zanesljivost izvedenih ekotoksikoloških testov.



Figura A-4 - Stabulazione delle colture algali

NAČRT VZORČENJA

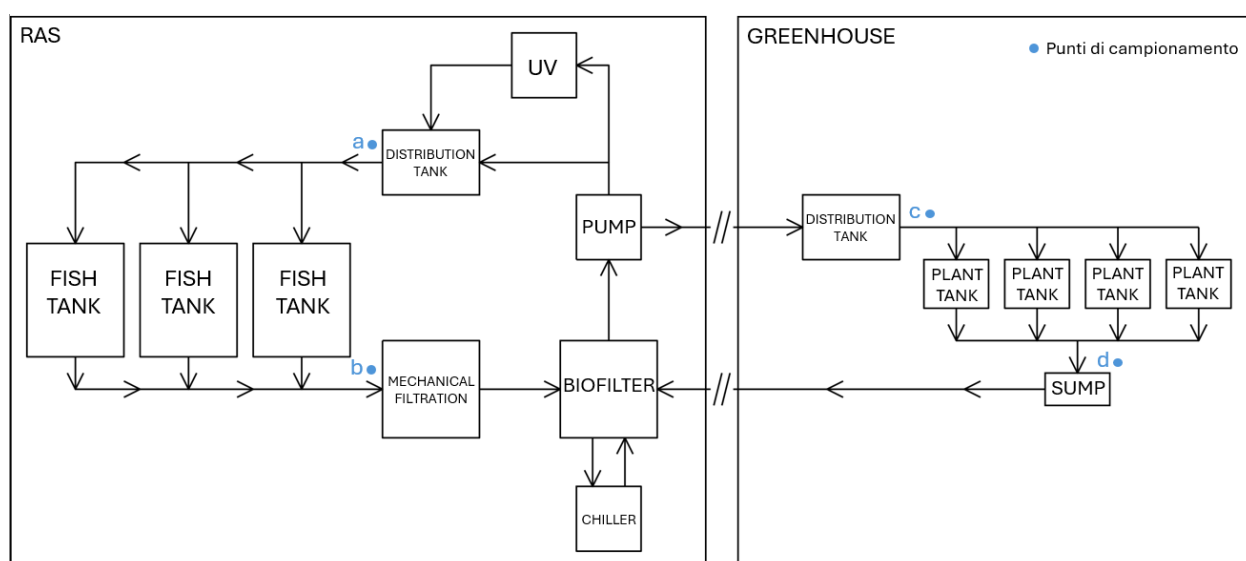
Študijo so izvedli s **štirimi vzorčenji, izvedenimi med majem in oktobrom 2024** . V začetni konfiguraciji, prisotni med prvima dvema vzorčenjema (maj in junij 2024), je obrat sestavljal dve proizvodni liniji: ena je bila namenjena *Salicornia europaea* in druga *Ulva lactuca* . Od tretjega vzorčenja (september 2024) je bila rastlina spremenjena z zamenjavo linije Ulva z novo linijo, posvečeno *Sarcocornia* .

Vsako vzorčenje je vključevalo zbiranje vzorcev vode na štirih točkah za vsako linijo sistema (tabela 1), ki je vključevala **vhod in izhod iz rezervoarjev za ribe ter odsek za gojenje** , ki je bil prav tako nadzorovan na **vhodu in izhodu** (slika A-5). Za vsako vzorčno mesto je bilo odvzetih 250 mL vode, na kateri so bile opravljene tako **analize kemijsko-fizikalnih parametrov** kot **ekotoksikološke preiskave** . Pri prvih dveh vzorčenjih je bil kot testni

organizem uporabljen *Paracentrotus lividus*, pri vseh štirih vzorčenjih pa *Isochrysis galbana*, kar omogoča spremljanje evolucije sistema tudi po strukturni spremembi rastline.

Mesta vzorčenja		SALIKORNIJA	ULVA	SARKOKORNIJA
do	Dovod vode v akvarij	SF_IN	UF_IN	sarF_IN
b	Odprtina za vodo v akvariju	SF_OUT	UF_OUT	sarF_OUT
c	Dovod vode za pridelke	SP_IN	UP_IN	sarP_IN
d	Odtok vode za pridelke	SP_OUT	UP_OUT	sarP_OUT

Tabella A-1 – Descrizione dei punti di campionamento



Slika A-5 - Shema pilotne naprave Mestre. Modre pike predstavljajo mesta vzorčenja: (a) dovod vode za ribe, (b) izhod vode za ribe, (c) dovod vode za pridelke, (d) odtok vode za pridelke



Figura A- 6 - Campionamento dell'impianto di acquaponica di Mestre

STATISTIČNA ANALIZA

Podatki, zbrani v ekotoksikoloških testih, so bili podvrženi obsežni statistični analizi za oceno učinkov hranil na testne organizme. Za test oploditve morskega ježka *P. lividus* smo za vsako vzorčno mesto izračunali **povprečni odstotek neoplojenih jajčec in ustrezen standardni odklon. Za ovrednotenje toksičnosti vzorcev sta bili EC20 in EC50 (koncentracija, ki povzroči učinek na 20 % in 50 % populacije)** izračunani s probit analizo odstotkov učinka, pridobljenega v različnih razredčitvah (100 %, 50 %, 25 %) vsakega vzorca. Ta parameter je omogočil količinsko opredelitev in primerjavo relativne toksičnosti različnih vzorčevalnih mest.

Za enocelično algo *I. galbana* smo analizirali **odstotke inhibicije produkcije pigmentov (klorofila a, c in skupnih karotenoidov)** v primerjavi z negativno kontrolo. Za vsak vzorec so bile izračunane srednje vrednosti in standardne deviacije ter nato predstavljene s **paličnimi grafikoni**. Višina stolpcev predstavlja odstotek inhibicije pigmenta. Spodnji stolpci kažejo manjšo inhibicijo, kar kaže na dobro stanje fiziološkega zdravja organizma. Nasprotno pa višje stolpce predstavljajo visok odstotek inhibicije, znak pomembnega fiziološkega stresa, ki moti normalno proizvodnjo fotosintetskih pigmentov. Zgornji del grafov prikazuje **koncentracije nitratov** (NO_3^-) in **fosfatov** (PO_4^{3-}) za vsak vzorec.

Za ovrednotenje **odnosov med kemijskimi parametri** (NO_3^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_2^-) in **opaženimi biološkimi učinki** so bile izvedene **Spearmanove korelacijske analize in linearne regresije**. Spearmanov korelacijski koeficient je bil izbran zaradi njegove robustnosti in sposobnosti prepoznavanja monotonih odnosov, ki niso nujno linearni. Za najpomembnejše korelacije so bile razvite linearne regresije za kvantifikacijo odnosa med spremenljivkami z izračunom determinacijskega koeficienta (R^2), korelacijskega koeficienta (R) in statistične pomembnosti (p-vrednost).

REZULTATI

Paracentrotus lividus

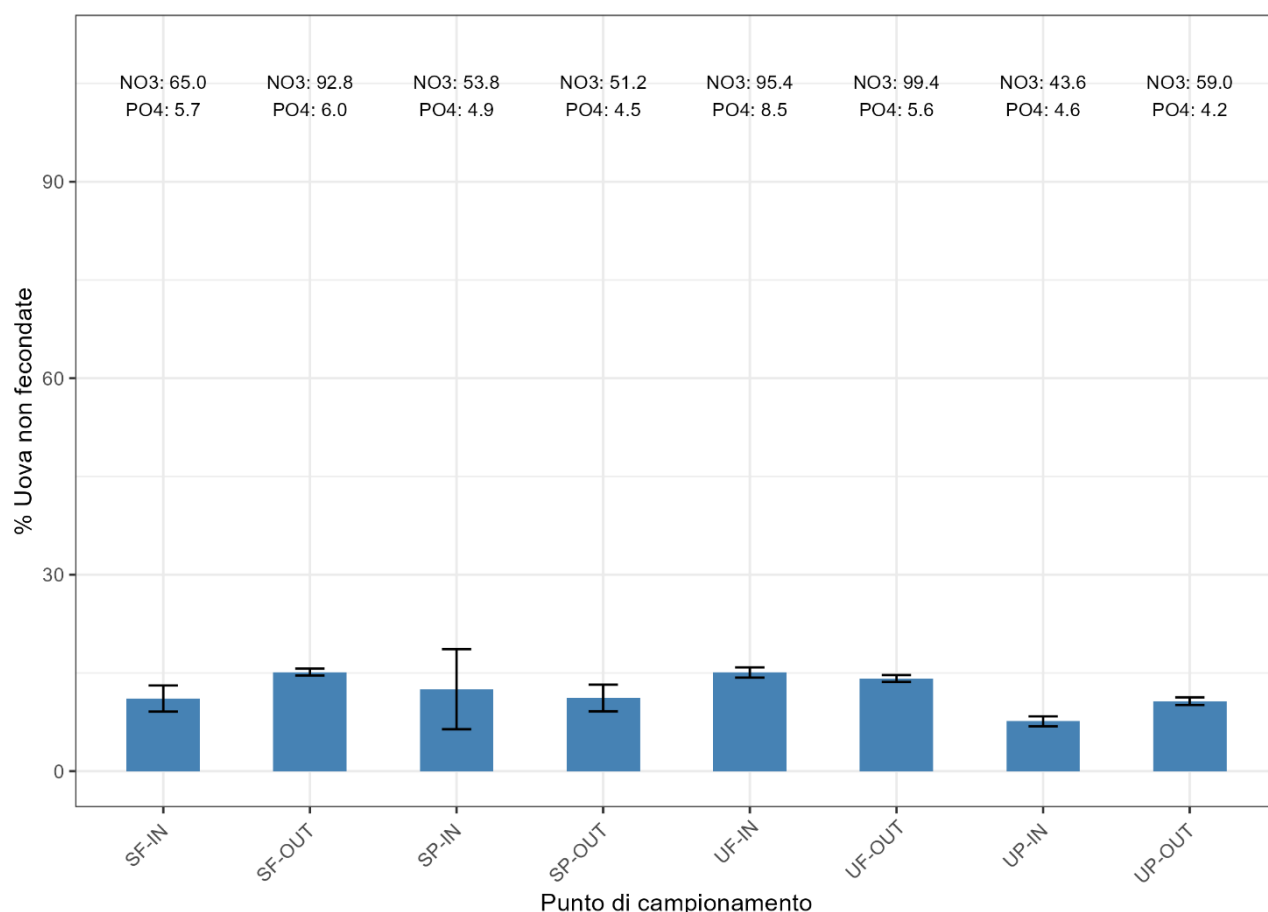
Analiza vplivov **na razmnoževalno sposobnost morskega ježka *Paracentrotus lividus*** je bila izvedena v prvih dveh vzorčenjih akvaponičnega sistema, pri čemer smo ta organizem uporabili kot bioindikator kakovosti vode. Študija je ovrednotila **odstotek neoplojenih jajčec** glede na vzorce, vzete iz osmih strateških točk obrata: vstopnih in izstopnih točk akvarijev SF-IN/OUT in območij gojenja SP-IN/OUT za linijo Salicornia ter podobno UF-IN/OUT in UP-IN/OUT za linijo Ulva. Za vsako vzorčno mesto so bile testirane tri različne koncentracije vzorca (100 %, 50 % in 25 %) za oceno **EC20 in EC50**. Posebna pozornost je bila nato namenjena **100-odstotni koncentraciji** (kot vzorec), ki je poudarila najpomembnejše učinke. Vsak vzorec je imel lastno značilno sestavo hranil (NO_3^- , PO_4^{3-} , NH_4^+ , NO_2^-), ki je odražala posebne pogoje na vsaki točki v sistemu. Rezultati so pokazali **pomembne razlike med obema vzorčenjema**, z izrazitim razvojem biološkega odziva, ki odraža spremembe pogojev rastline. Rezultati so podrobno predstavljeni spodaj, organizirani kronološko in po vrsti analize.

Razmerje med odmerkom in odzivom

Analiza **EC20** in **EC50** v testih oploditve z morskim ježkom *P. lividus* je dala pomembne informacije o občutljivosti sistema za spremljanje akvaponičnega sistema. Rezultati kažejo zanimiv razvoj med obema vzorčenjema, ki razkriva sposobnost testa za prepoznavanje zgodnjih sprememb v kakovosti vode. Pri **prvem vzorčenju maja 2024** je bilo ugotovljeno, da sta EC20 in EC50 nad 100 % na vseh mestih vzorčenja, kar kaže, da **najvišja testirana koncentracija ni mogla povzročiti pomembnih učinkov na oploditev**. Ta odgovor vzpostavlja jasno osnovo za ocenjevanje sistema. Drugo **vzorčenje junija 2024** kaže bolj zapleteno sliko: medtem ko vrednosti EC50 ostajajo nad 100 %, kar kaže na odsotnost resnih učinkov, začnejo vrednosti EC20 kazati odziv na nekaterih točkah vzorčenja in padejo pod 90 %, kar poudarja **začetek subletalnih učinkov**. Ta lastnost testa, tj. zmožnost zaznavanja zgodnjih učinkov (EC20), medtem ko ostaja v nekritičnem območju toksičnosti (EC50 >100 %), ga naredi posebej primerne kot sistem **zgodnjega opozarjanja** za spremljanje akvaponičnega sistema.

Vrednotenje gnojilne sposobnosti *P. lividus* kot odziv na nerazredčene (kot so) vzorce **Odstotek neoplojenih jajčec *P. lividus* – prvo vzorčenje**

Pri testu oploditve **na vzorcih morskega ježka iz maja 2024** je opaziti relativno nizko variabilnost, z **vrednostmi med 5% in 15%**. Točki UF-IN in UF-OUT prikazujeta najvišje odstotke neoplojenih jajčec (približno 15 %), kar ustreza tudi najvišjim koncentracijam hranil (NO₃: 95,4 in 99,4 mg/L; PO₄: 8,5 in 5,6 mg/L). Relativno majhne vrstice napak kažejo na dobro ponovljivost rezultatov. Zanimivo je, da imata točki "IN" in "OUT" vsakega para podobne vrednosti, kar kaže na določeno prostorsko homogenost učinka (slika A-7).



Slika A-7 – Odstotek neoplojenih jajčec *P. lividus* glede na koncentracije nitrata (NO₃) in fosfata (PO₄) na različnih mestih vzorčenja akvaponičnega sistema, prvo vzorčenje maja 2024.

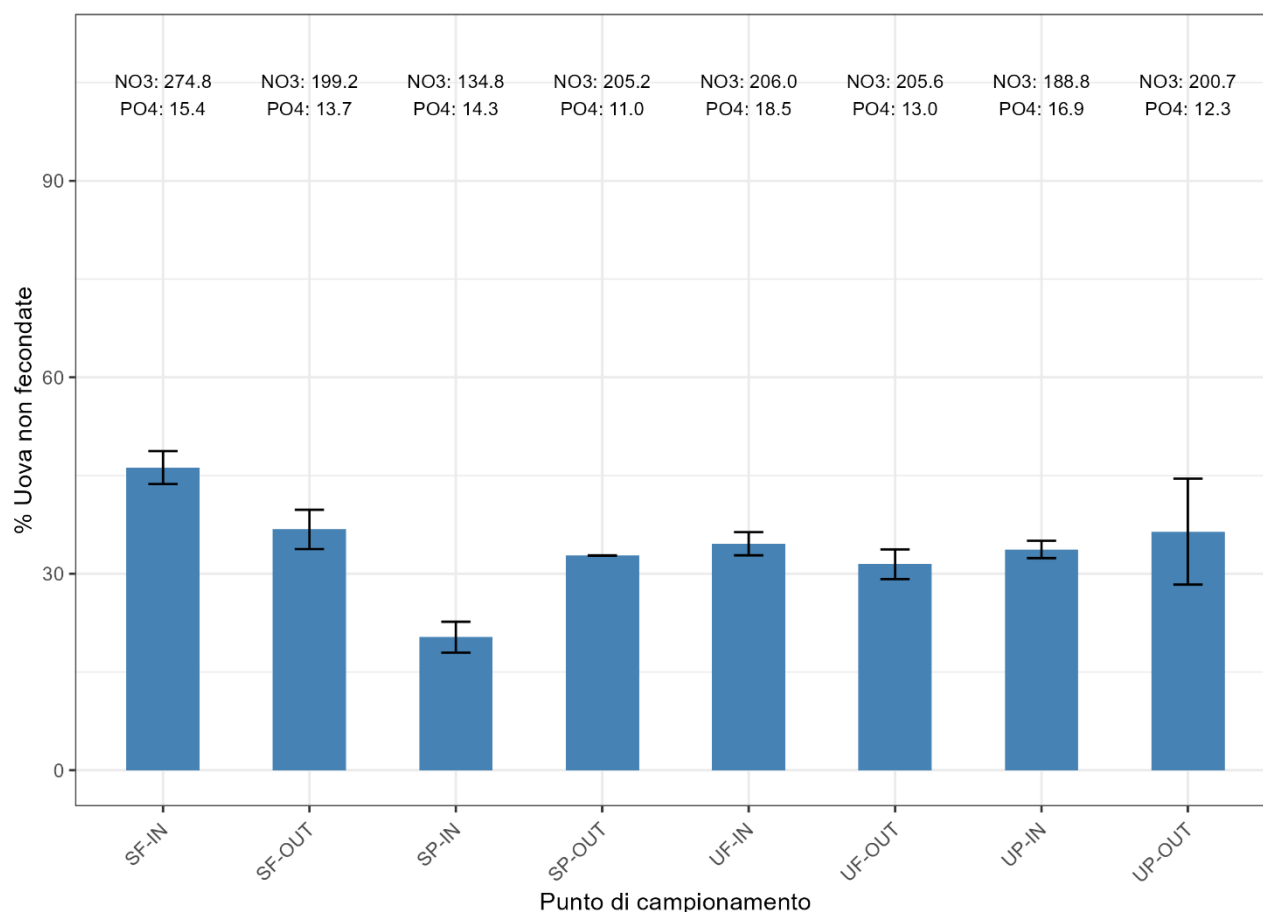
Odstotek neoplojenih jajčec *P. lividus* – drugo vzorčenje

Rezultati **testiranja morskih ježkov na vodah** drugega vzorčenja, ki je bilo opravljeno **junija 2024**, kažejo **znatno povečanje deleža neoplojenih jajčec** v primerjavi s prvim vzorčenjem, pri čemer vrednosti odražajo povečanje koncentracije hranil v sistemu (slika 8).

Točka **SF-IN** (vodno pitanje rib Salicornia line) predstavlja **najvišji odstotek neoplojenih iker** (približno 45 %), kar sovпада z najvišjimi zabeleženimi koncentracijami hranil (TN: 274,8 mg/L, PO₄³⁻: 15,4 mg/L). Opazen je gradient učinka vzdolž linije Salicornia z zmanjšanjem inhibicije na točki SF-OUT (35 %) in nadaljnjim zmanjšanjem na točkah SP-IN in SP-OUT (20-30 %).

Linija **Ulva** kaže bolj enoten vzorec, z **odstotki neoplojenih jajčec**, ki ostanejo okoli **30-35 %** in relativno konstantnimi koncentracijami nitratov (NO₃: 188-206 mg/L).

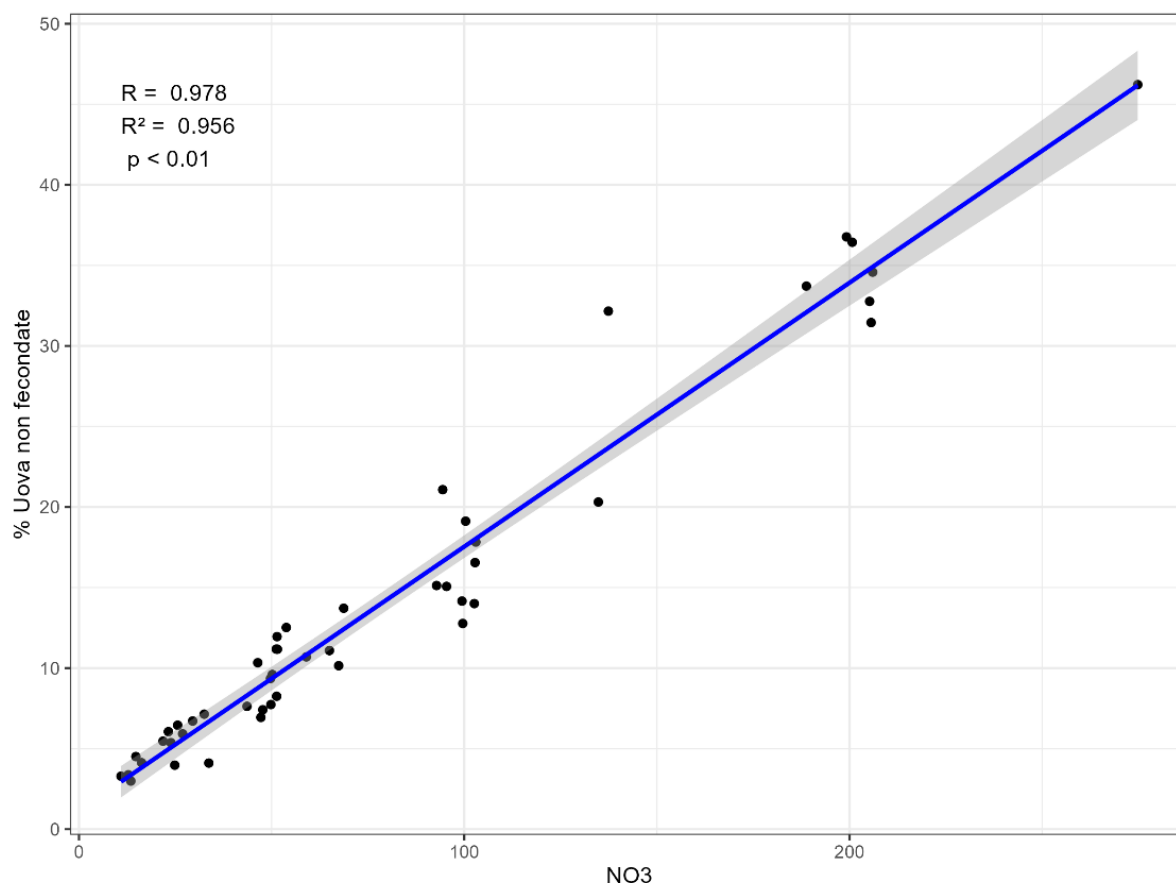
Relativno majhne vrstice napak kažejo na dobro ponovljivost rezultatov, kar kaže na stabilen biološki odziv, kar potrjuje zanesljivost rezultatov, dobljenih pri vrednotenju toksičnosti različnih vzorcev.



Slika A-8 – Odstotek neoplojenih jajčec *P. lividus* glede na koncentracije nitrata (NO₃) in fosfata (PO₄) na različnih mestih vzorčenja akvaponičnega sistema, glede na vzorčenje junija 2024.

Regresijska analiza med NO₃⁻ in odstotkom neoplojenih jajčec

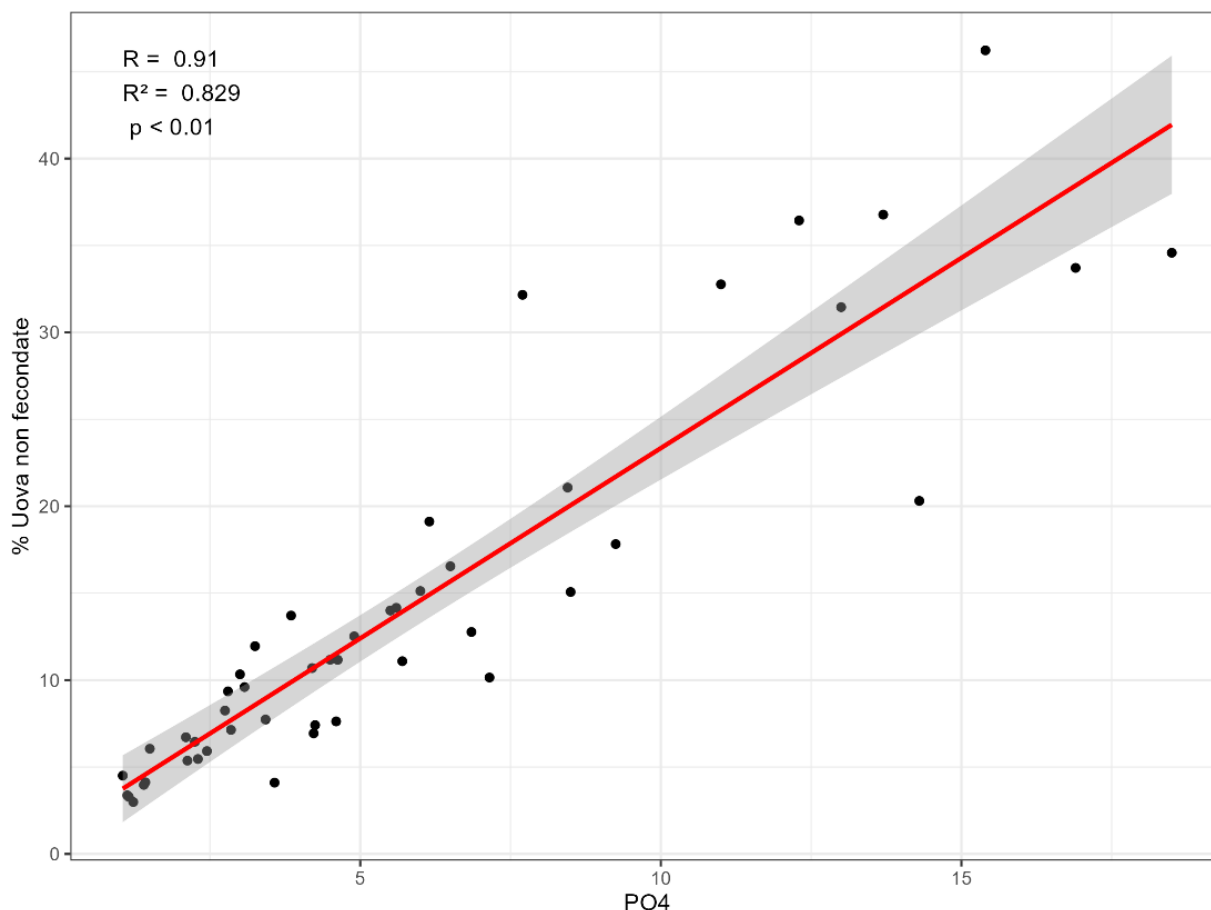
Regresijska analiza med koncentracijo **nitrata** (NO₃⁻) in **odstotkom neoplojenih jajčec** v morskem ježku *P. lividus* kaže **izjemno močno in pomembno povezavo**. Korelacijski koeficient ($R = 0,978$) in koeficient determinacije ($R^2 = 0,956$) kažeta, da je 95,6 % variabilnosti v odstotku neoplojenih jajčec mogoče pojasniti s koncentracijo nitratov, z visoko statistično značilnostjo ($p < 0,01$) (slika A-9). Regresijska premica kaže jasen pozitiven linearni trend, ki kaže, da se **z naraščanjem koncentracije nitratov sorazmerno povečuje delež neoplojenih jajc**. Točke so razporejene zelo enakomerno vzdolž regresijske premice, z minimalno disperzijo, kar dokazuje posebej ozek interval zaupanja (sivo območje). Razmerje se zdi še posebej močno v celotnem razponu opazovanih koncentracij (0-250 mg/L NO₃⁻), kar kaže na dosleden učinek, odvisen od odmerka. Opazimo lahko, da koncentracije nitratov nad 200 mg/L ustrezajo odstotku neoplojenih iker nad 35 %, medtem ko je pri nizkih koncentracijah (< 50 mg/L) učinek na oploditev minimalen (< 10 %). Ta močna linearna povezava potrjuje ključno vlogo nitrata pri zaviranju procesa gnojenja in podpira uporabo *P. lividus* kot učinkovitega bioindikatorja kakovosti vode v akvaponičnih sistemih.



Slika A-9 – Regresijska analiza med koncentracijo nitratov in odstotkom neoplojenih jajčec *P. lividus*.

Regresijska analiza med PO_4^{3-} in odstotkom neoplojenih jajčec

Regresijska analiza med **koncentracijo fosfata** (PO_4^{3-}) in **odstotkom neoplojenih jajčec** kaže močno ($R = 0,91$) in statistično pomembno ($p < 0,01$) korelacijo. Koeficient determinacije ($R^2 = 0,829$) kaže, da je 82,9 % variabilnosti v odstotku neoplojenih jajčec mogoče pojasniti s koncentracijo fosfata (slika 10). Opaženo je, da **z naraščanjem koncentracije fosfatov** (od 2 do 15 mg/L) **postopoma narašča odstotek neoplojenih jajčec**, ki pri najvišjih koncentracijah dosežejo vrednosti nad 30 %. Regresijska črta kaže pozitivno linearno razmerje, čeprav z večjo disperzijo točk, kot je bilo opaženo za nitrate. Interval zaupanja (sivo območje) se zdi širši, zlasti pri višjih koncentracijah fosfatov, kar kaže na večjo variabilnost biološkega odziva. To razmerje, čeprav manj tesno kot tisto, opaženo za nitrate, še vedno potrjuje pomembno vlogo fosfata pri zaviranju oploditve pri *P. lividus* in podpira pomen spremljanja tega parametra v akvaponičnih sistemih.



Slika A-10 – Regresijska analiza med koncentracijo fosfata in odstotkom neoplojenih jajčec *P. lividus*.

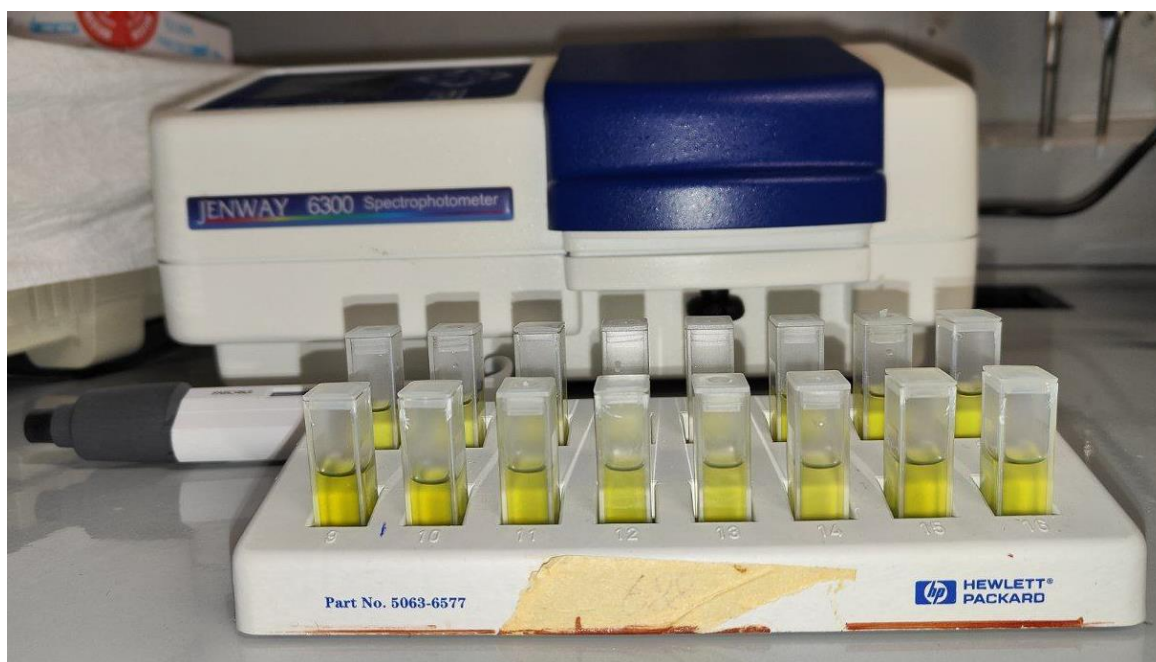
Isocrysis galbanum

Vpliv koncentracije dušika in fosfata na pigment

so ocenili fiziološki odziv **enocelične alge *Isocrysis galbana*** v vode akvaponičnega sistema, z **analizo inhibicije v sintezi glavnih fotosintetskih pigmentov** v primerjavi z negativno kontrolo. Študija se je osredotočila na analizo koncentracij **klorofila a (Chl a)**, **klorofila c (Chl c)** in **skupnih karotenoidov**, izraženih v mg/L, z uporabo teh parametrov kot indikatorjev fiziološkega stresa organizma (slika A-11). Raziskava je bila razvita s štirimi vzorčenji, izvedenimi med majem in oktobrom 2024, med katerimi je bila rastlina podvržena pomembnim strukturnim spremembam. V prvih dveh vzorčenjih je obrat deloval z dvema proizvodnima linijama, namenjenima *Salicornia* oziroma *Ulva lactuca*. Od tretjega vzorčenja je bila *Ulva* nadomeščena s *Sarcocornia*.

V dobljenih rezultatih je *I. galbana*, izpostavljena vzorcem z različnimi koncentracijami dušika in fosfata, pokazala pomembno variabilnost v vsebnosti klorofila in karotenoidov. Zlasti **prekomerne koncentracije dušika** so povzročile **inhibicijo sinteze vseh fotosintetskih pigmentov**. Vzoredno se je v 96 urah kultivacije **barva** kulture spremenila iz značilnega

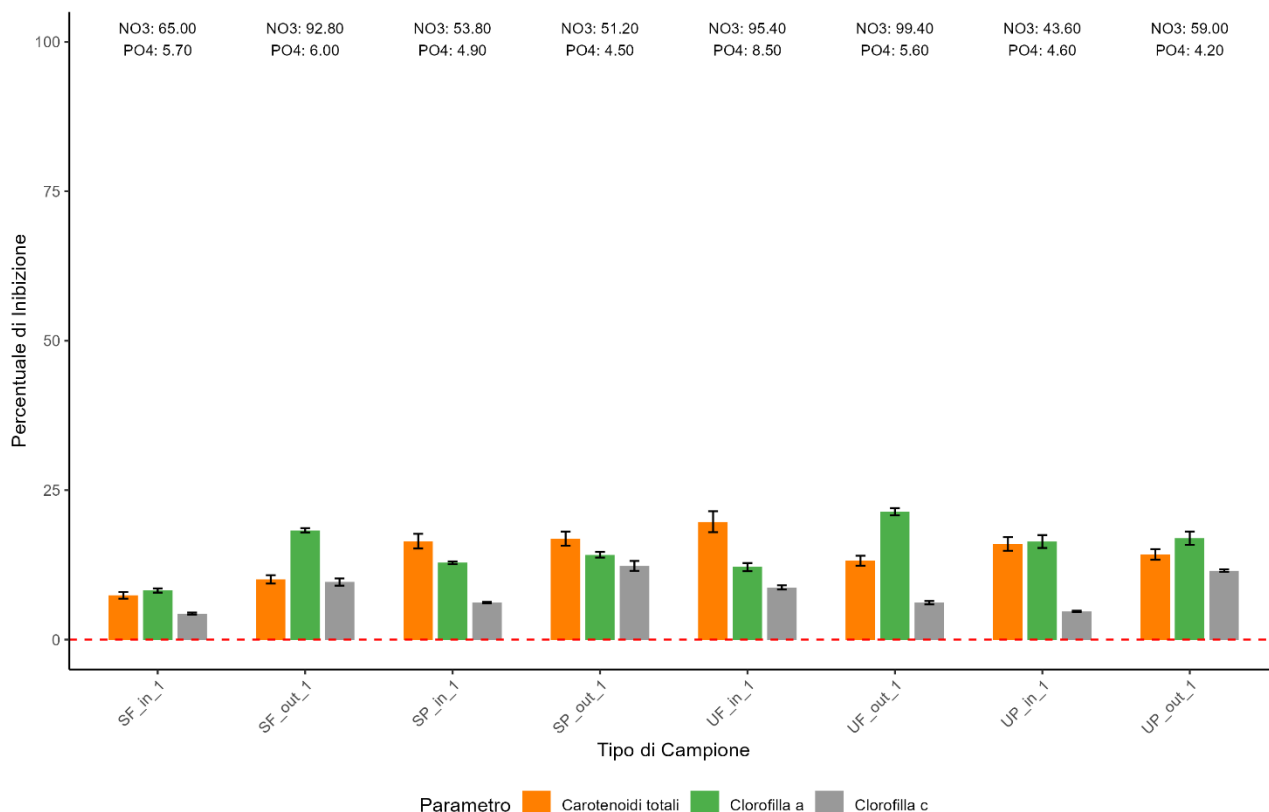
intenzivnega zlato-rjavega tona v svetlo rumeno-rjavo pri vzorcih z večjo pigmentno inhibicijo.



Slika 11 – Ekstrahirani pigmenti *Isocrysis galbana*

Odstotek inhibicije pigmentov *I. galbana* – prvo vzorčenje

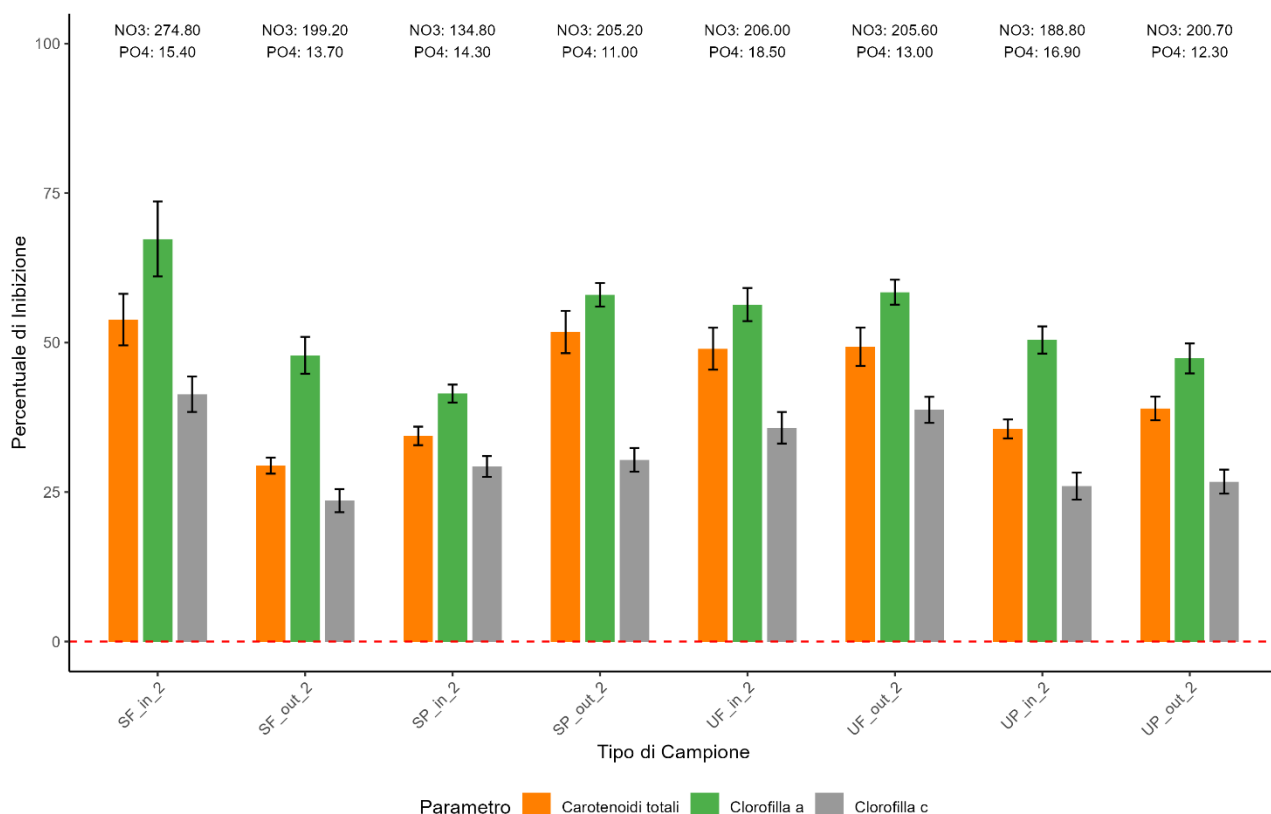
V rezultatih **prvega vzorčenja**, opravljenega konec **maja 2024**, je bil opažen **na splošno nizek odstotek inhibicije (<25 %)** za vse analizirane parametre (skupni karotenoidi, klorofil a in klorofil c) na vseh mestih vzorčenja (slika A-12). **Koncentracije hranil** ostajajo relativno **zmerne**, z vrednostmi nitratov (NO₃) v razponu od 43,60 do 99,40 mg/L in fosfatov (PO₄) od 4,20 do 8,50 mg/L. Porazdelitev inhibicije med tremi pigmenti je relativno enakomerna. Relativno majhne vrstice napak kažejo na dobro ponovljivost rezultatov. Zanimivo je, da vstopne (IN) in izstopne (OUT) točke vsakega para kažejo podobne vrednosti, kar kaže na omejeno sposobnost sistema, da bistveno spremeni kakovost vode v tej zgodnji fazi. Ti rezultati kažejo, da pri tem prvem vzorčenju akvaponski sistem ohranja razmeroma stabilne pogoje z zmernim vplivom na fiziologijo *I. galbana*.



Slika A-12 – Odstotek inhibicije pigmentov (skupnih karotenoidov, klorofila a in klorofila c) v *I. galbana*, izpostavljenih vzorcem vode, vzetih iz različnih točk akvaponičnega sistema (maj 2024). Višina stolpcev predstavlja odstotek inhibicije pigmenta. Spodnji stolpci kažejo manjšo inhibicijo, kar kaže na dobro stanje fiziološkega zdravja organizma. Nasprotno pa višje stolpce predstavljajo visok odstotek inhibicije, znak pomembnega fiziološkega stresa, ki moti normalno proizvodnjo fotosintetskih pigmentov.

Odstotek inhibicije pigmentov *I. galbana* – drugo vzorčenje

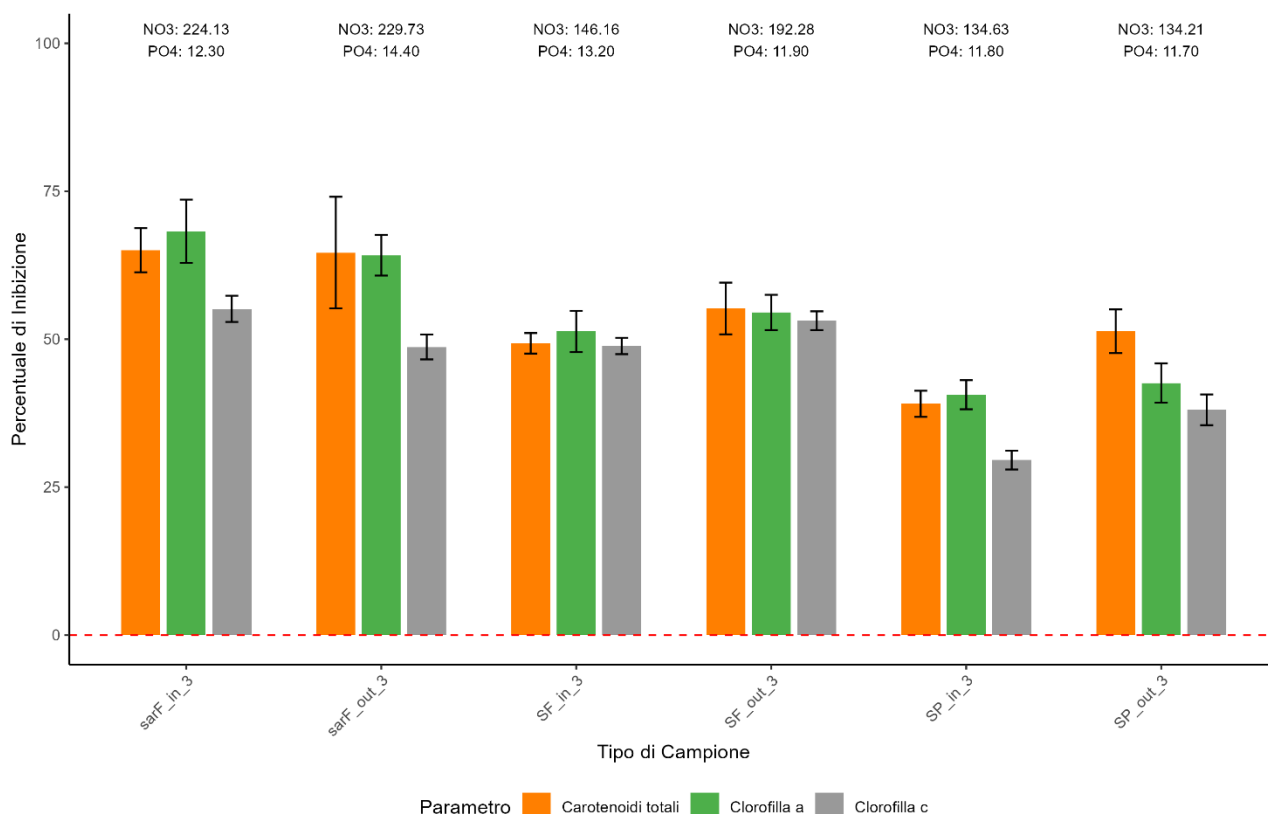
Rezultati **drugega vzorčenja**, opravljenega konec **junija 2024**, razkrivajo bistveno drugačno sliko v primerjavi s prvim, pri čemer poudarjajo izrazito spremembo pogojev obrata. Ravni **zaviranja sinteze pigmenta pri *Isochrysis galbana* so se dramatično povečale**, kar odraža **znatno kopičenje hranil v sistemu** (slika A-13). Stanje se zdi še posebej kritično na točki SF-IN (vodno pitanje rib *Salicornia*), kjer so zabeležene najvišje vrednosti tako hranil (NO3: 274,80 mg/L, PO4: 15,40 mg/L) kot inhibicije pigmenta. Na tej točki klorofil a pokaže inhibicijo, ki doseže 65 %, sledijo skupni karotenoidi z več kot 50 % in klorofil c s približno 40 %. Večje stolpce napak v primerjavi s prvim vzorčenjem kažejo na večjo variabilnost biološkega odziva, verjetno zaradi intenzivnosti stresa, ki so mu alge izpostavljene. Visoke koncentracije hranil, opažene na vseh točkah vzorčenja, z vrednostmi nitratov v razponu od 135 do 275 mg/L in fosfatov med 11 in 18,5 mg/L, nakazujejo, da gre sistem skozi fazo pomembnega neravnovesja z očitnim vplivom na fiziologijo testnega organizma.



Slika A-13 – Odstotek inhibicije pigmentov (skupnih karotenoidov, klorofila a in klorofila c) pri *I. galbana*, izpostavljenih vzorcem vode, vzetih iz različnih točk akvaponičnega sistema (junij 2024). Višina stolpcev predstavlja odstotek inhibicije pigmenta. Spodnji stolpci kažejo manjšo inhibicijo, kar kaže na dobro stanje fiziološkega zdravja organizma. Nasprotno pa višje stolpce predstavljajo visok odstotek inhibicije, znak pomembnega fiziološkega stresa, ki moti normalno proizvodnjo fotosintetskih pigmentov.

Odstotek inhibicije pigmentov *I. galbana* – tretje vzorčenje

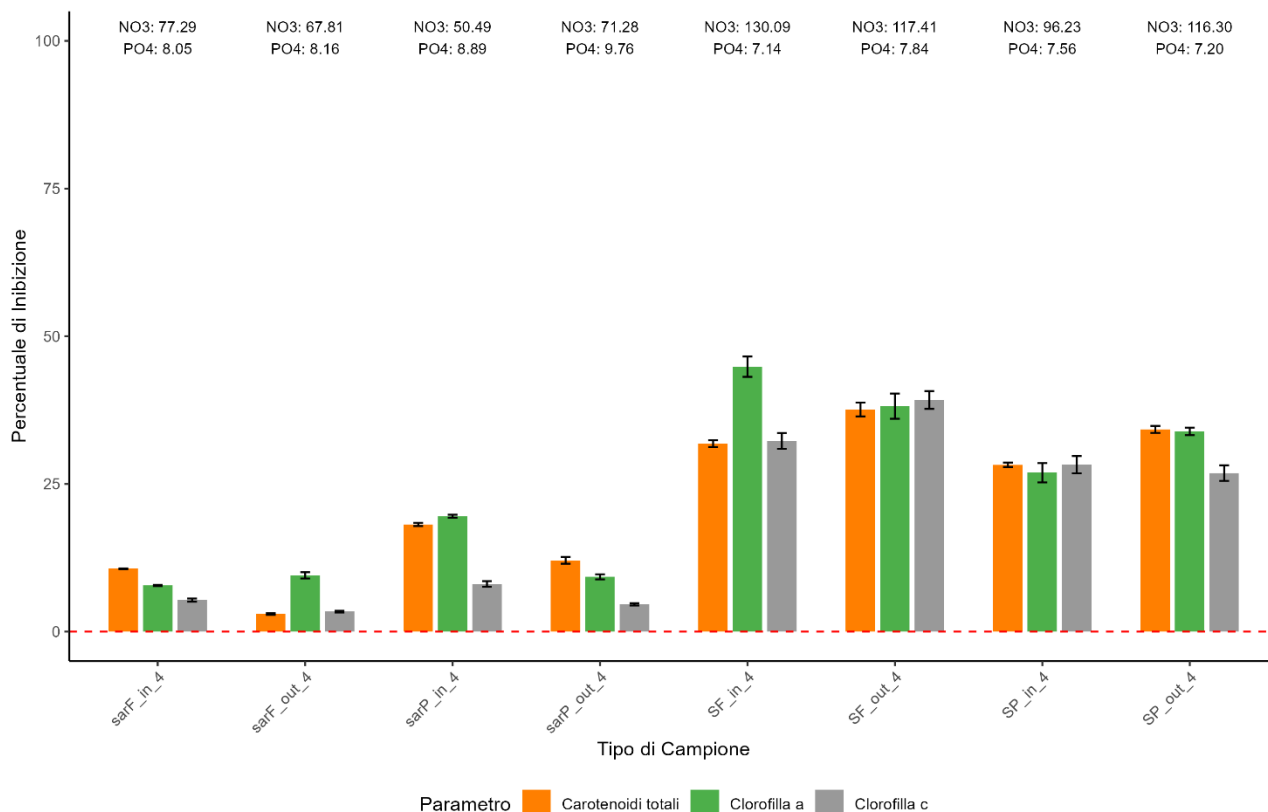
Tretje **vzorčenje**, izvedeno sredi **septembra 2024**, kaže prve rezultate po zamenjavi Ulve s *Sarcocornio* (slika A-14). Pomembno je omeniti, da podatki o delu rastline, namenjenem gojenju *sarkokornije*, niso na voljo, saj je bila linija šele zagnana. Nova linija *Sarcocornia* (sarF) kaže najvišje stopnje inhibicije, z vrednostmi, ki dosegajo 65-70% za klorofil a in skupne karotenoide ter približno 50% za klorofil c. Te vrednosti ustrezajo visokim koncentracijam hranil (NO3: 224-229 mg/L, PO4: 12,30-14,40 mg/L). Linija *Salicornia* predstavlja bolj zmerno in enakomerno inhibicijo med pigmenti, z vrednostmi okoli 50% za vse tri parametre. Koncentracije hranil v tem delu so vmesne (NO3: 134–192 mg/L, PO4: 11,80–13,20 mg/L).



Slika A-14 – Odstotek inhibicije pigmentov (skupnih karotenoidov, klorofila a in klorofila c) pri *I. galbana*, izpostavljenih vzorcem vode, vzeti iz različnih točk akvaponičnega sistema (september 2024). Višina stolpcev predstavlja odstotek inhibicije pigmenta. Spodnji stolpci kažejo manjšo inhibicijo, kar kaže na dobro stanje fiziološkega zdravja organizma. Nasprotno pa višje stolpce predstavljajo visok odstotek inhibicije, znak pomembnega fiziološkega stresa, ki moti normalno proizvodnjo fotosintetskih pigmentov.

Odstotek inhibicije pigmentov *I. galbana* – četrto vzorčenje

Rezultati **četrtega vzorčenja**, opravljenega sredi **oktobra 2024**, poudarjajo pomemben razvoj akvaponičnega sistema, za katerega je značilno znatno **zmanjšanje inhibicije na vseh točkah vzorčenja** (slika A-15). To izboljšanje je še posebej očitno pri novi liniji *Sarcocornia*, kjer je bila inhibicija zmanjšana na vrednosti med 5% in 20%, skupaj s stabilizacijo koncentracije hranil (NO3: 67-77 mg/L, PO4: 8,05-9,76 mg/L). Linija *Salicornia* ohranja nekoliko višje stopnje inhibicije, z vrednostmi okoli 30-45% in višjimi koncentracijami dušika (NO3: 96-130 mg/L).



Slika A-15 – Odstotek inhibicije pigmentov (skupnih karotenoidov, klorofila a in klorofila c) pri *I. galbana*, izpostavljenih vzorcem vode, vzetih iz različnih točk akvaponičnega sistema (oktober 2024). Višina stolpcev predstavlja odstotek inhibicije pigmenta. Spodnji stolpci kažejo manjšo inhibicijo, kar kaže na dobro stanje fiziološkega zdravja organizma. Nasprotno pa višje stolpce predstavljajo visok odstotek inhibicije, znak pomembnega fiziološkega stresa, ki moti normalno proizvodnjo fotosintetskih pigmentov.

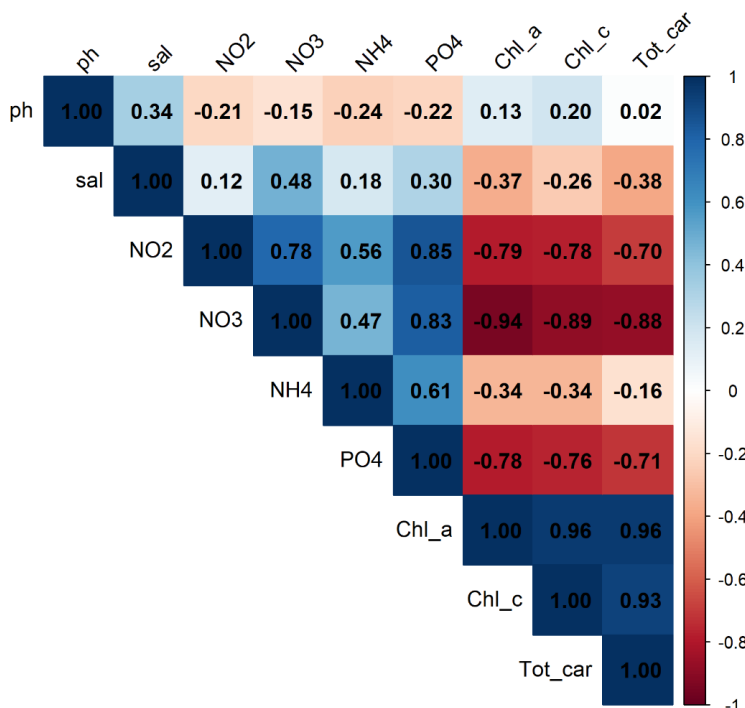
Korelacijska analiza

Spearmanova korelacijska matrika (slika A-16) je poudarila zanimiva razmerja med parametri, spremljanimi v akvaponskem sistemu. Še posebej pomemben je korelacijski vzorec **med različnimi hranili**, ki kaže močno pozitivno povezavo, kar kaže na **usklajeno kopičenje** teh spojin v sistemu. Zlasti nitrati in fosfati kažejo najmočnejšo korelacijo (0,83), kar kaže na vzporedno dinamiko kopičenja. Pomemben vidik izhaja iz analize korelacije med fotosintetskimi pigmenti. Skoraj popolna korelacija med klorofilom a in c (0,96), skupaj z močnimi korelacijami s skupnimi karotenoidi (0,96-0,93), kaže na usklajen fiziološki odziv *I. galbana* na okoljske razmere. To kaže, da **stres, ki ga povzročajo hranila, sistemsko vpliva na celoten fotosintetski aparat alge**.

Najpomembnejši vidik izhaja iz **negativnih korelacij med hranili in pigmenti**, kar pomeni obratno razmerje med spremenljivkami. Nitrati kažejo najmočnejše negativne korelacije z vsemi pigmenti (-0,88 do -0,94), sledijo pa jim fosfati in nitriti s podobnimi vzorci. **Ko se hranila povečajo, opazimo progresivno zmanjšanje koncentracije fotosintetskih pigmentov**. Te močne negativne korelacije potrjujejo zaviralni učinek hranil na biosintezo pigmentov, s še posebej izrazitim vplivom nitratov.

Vzporedno sta pH in slanost pokazala šibko korelacijo z večino parametrov, kar kaže na to, da ti dejavniki niso pomembno vplivali na opazovani biološki odziv. Ti podatki kažejo, da je

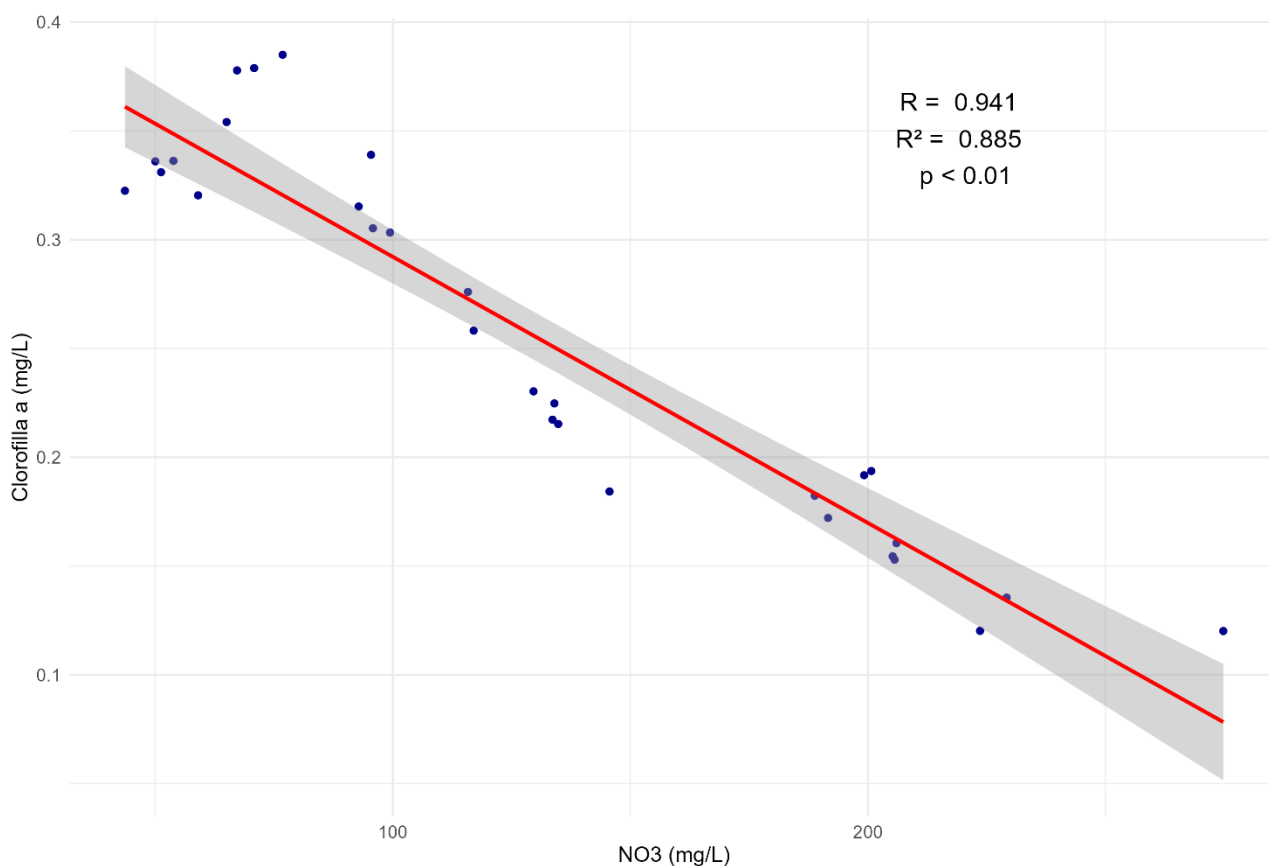
mogoče spremembe v sintezi pigmenta pripisati predvsem neposrednemu učinku hranil in ne spremembam v splošnih kemijsko-fizikalnih pogojih vode.



Slika A-16 – Spearmanova korelacijska matrika za fizikalno-kemijske parametre (pH, slanost, NO₂, NO₃, NH₄, PO₄) in fotosintetske pigmente (klorofil a, klorofil c in skupni karotenoidi), izmerjene v testih z *I. galbana*. Intenzivnost barve in številčne vrednosti označujejo moč in smer korelacije: modra za pozitivne korelacije, rdeča za negativne korelacije.

Regresijska analiza med NO₃⁻ in klorofilom a

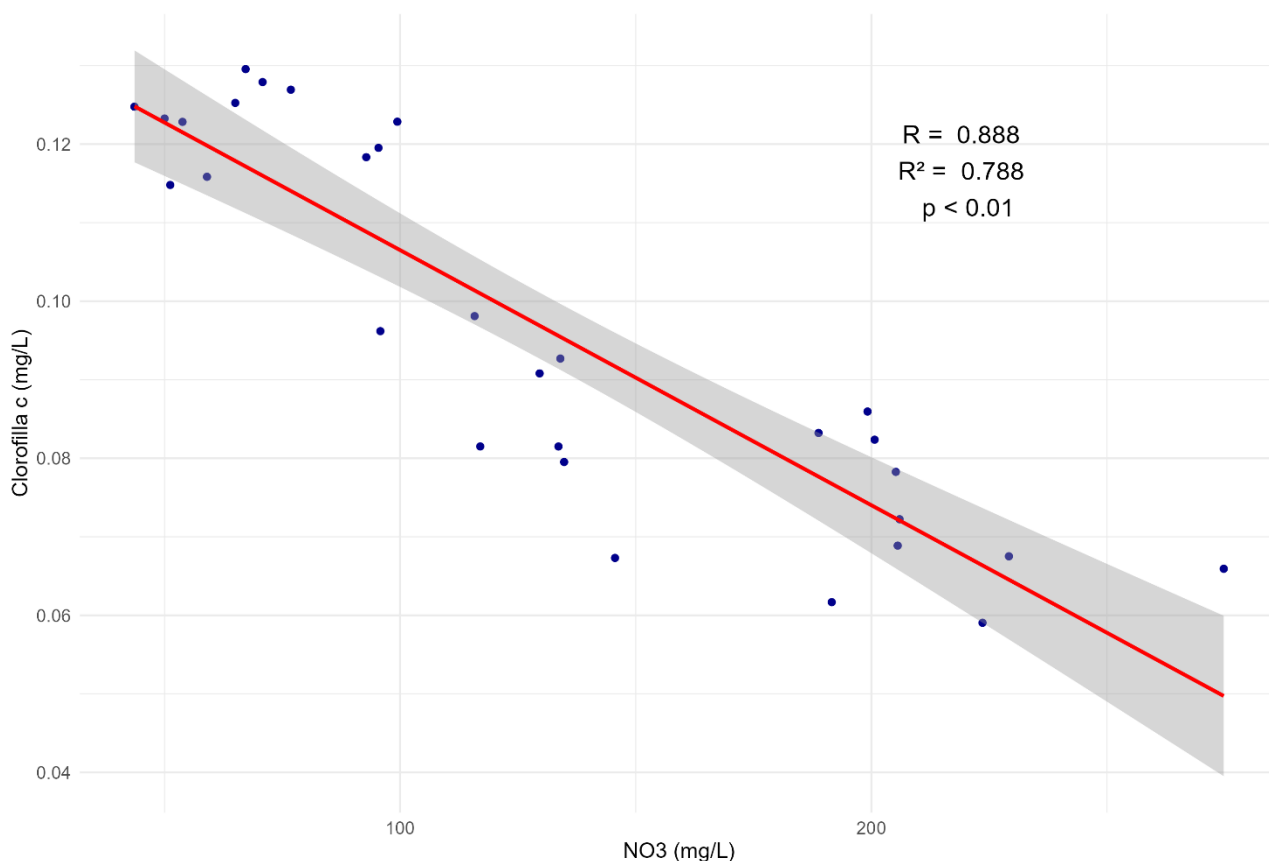
Regresijska analiza **med nitratom (NO₃⁻) in klorofilom a** kaže **močno negativno korelacijo** ($R = 0,941$), statistično značilno ($p < 0,01$). Koeficient determinacije ($R^2 = 0,885$) kaže, da je 88,5 % variabilnosti koncentracije klorofila a mogoče pojasniti s koncentracijo nitrata (slika A-17). Regresijska črta kaže jasen negativen linearni trend, pri čemer so točke relativno enakomerno porazdeljene okoli regresijske črte. Sivo območje, ki predstavlja 95-odstotni interval zaupanja, je relativno ozko, kar kaže na dobro zanesljivost napovednega modela. Opaženo je, da s **povečanjem koncentracije nitrata pride do postopnega in stalnega zmanjševanja koncentracije klorofila a**. Zlasti, ko vrednosti NO₃⁻ presežejo **200 mg/L**, koncentracija klorofila a pade pod 0,2 mg/L, kar kaže na močan zaviralni učinek nitrata na sintezo tega fotosintetskega pigmenta. To poročilo zagotavlja jasne dokaze o negativnem vplivu kopičenja nitrata na fiziologijo *I. galbana* v akvaponskem sistemu.



Slika A-17 – Regresijska analiza med koncentracijo nitrata in koncentracijo klorofila a v l. galbana.

Regresijska analiza med NO₃⁻ in klorofilom c

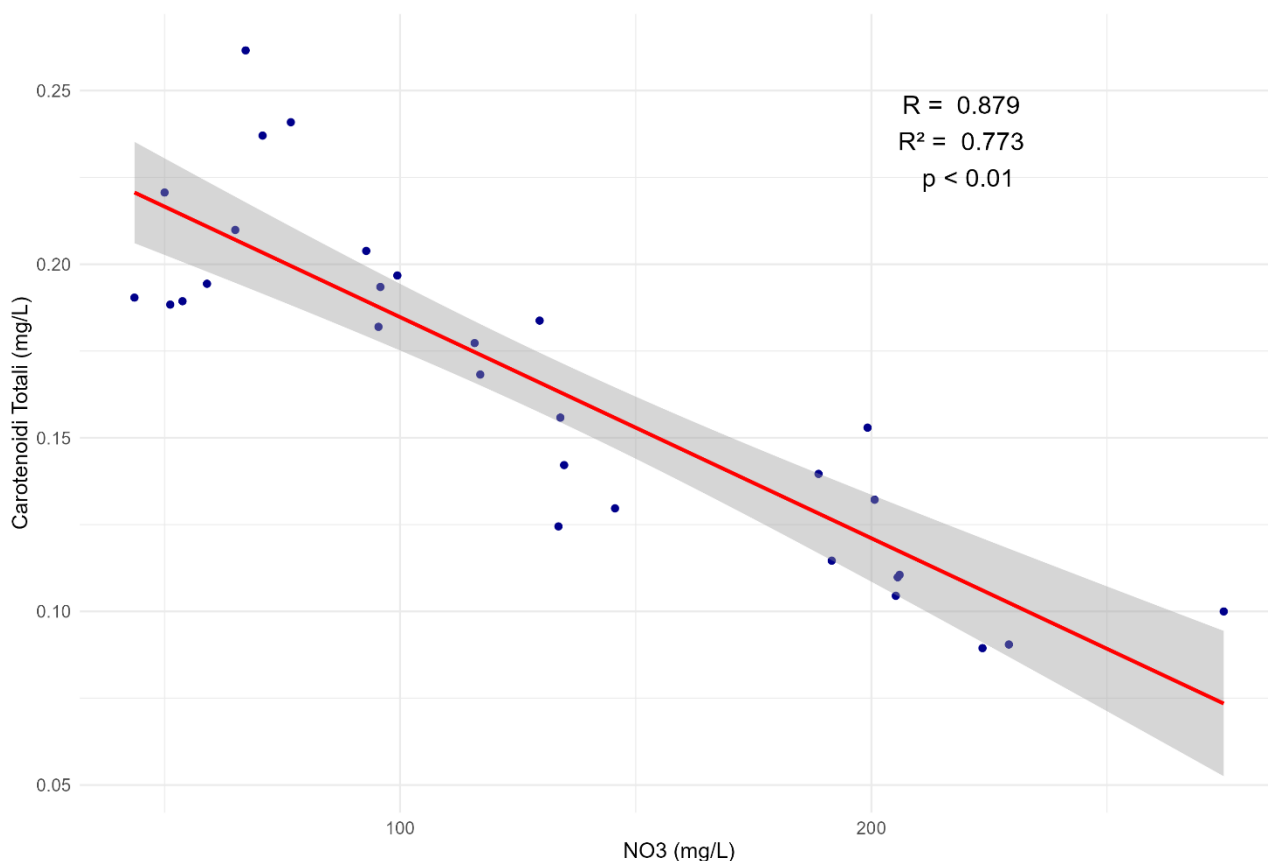
analiza **med nitratom (NO₃⁻) in klorofilom c** kaže **močno** ($R = 0,888$) in statistično pomembno ($p < 0,01$) negativno korelacijo. Koeficient determinacije ($R^2 = 0,788$) kaže, da je 78,8 % variabilnosti koncentracije klorofila c mogoče razložiti z variacijami v NO₃⁻ (slika A-18). Regresijska premica kaže negativno linearno razmerje, čeprav točke kažejo nekoliko večjo disperzijo, kot jo opazimo za klorofil a. Interval zaupanja (sivo območje) se zdi širši, zlasti pri visokih koncentracijah NO₃⁻, kar kaže na večjo variabilnost odziva. Opaženo je, da **ko koncentracija NO₃ narašča, se koncentracija klorofila c postopno zmanjšuje** in gre od približno 0,12 mg/L do koncentracij, nižjih od 0,06 mg/L, ko nitrati presežejo **200 mg/L**.



Slika 18 – Regresijska analiza med koncentracijo nitrata in koncentracijo klorofila c pri *I. galbana*.

Regresijska analiza med NO_3^- in skupnimi karotenoidi

analiza med nitrati NO_3^- in skupnimi karotenoidi kaže **močno negativno korelacijo** ($R = 0,879$), statistično značilno ($p < 0,01$). Koeficient determinacije ($R^2 = 0,773$) kaže, da je 77,3 % variabilnosti celotne koncentracije karotenoidov mogoče pojasniti z variacijami v NO_3^- (slika A-19). Regresijska črta kaže jasno negativno linearno razmerje z dokaj enakomerno porazdelitvijo točk vzdolž trendne črte. Interval zaupanja (sivo območje) ohranja razmeroma konstantno širino v celotnem razponu koncentracij NO_3^- , kar kaže na dobro zanesljivost napovednega modela. Opaženo je, da **ko se koncentracija nitratov poveča, se koncentracija skupnih karotenoidov postopno zmanjšuje** in gre od približno 0,22-0,25 mg/L do koncentracij, nižjih od 0,10 mg/L, ko nitrati presežejo **200 mg/L**. Ta odziv je podoben tistemu, ki so ga opazili pri klorofilih, kar potrjuje splošen zaviralni učinek nitratov na sintezo fotosintetskih pigmentov pri *I. galbana*. Vzorec odziva karotenoidov, skupaj z vzorcem klorofilov, kaže na sistemski vpliv nitratov na fotosintetski metabolizem alge.



Slika A-19 – Regresijska analiza med koncentracijo nitratov in skupno koncentracijo karotenoidov v *I. galbana*.

SKLEPI

Študija je poudarila učinkovitost kombinirane uporabe dveh **bioindikatorjev**, morskega ježka *Paracentrotus lividus* in enocelične alge *Isochrysis galbana*, pri spremljanju kakovosti vode akvaponičnega sistema. Organizma sta pokazala komplementarne in skladne odzive na kopičenje hranil v sistemu, ki sta vedno delovala **pod pragom akutne toksičnosti**, kar dokazuje dejstvo, da tudi v nerazredčenih vzorcih (kot so) nikoli ni bila dosežena 100-odstotna inhibicija.

Preskusi oploditve z morskim ježkom *P. lividus* so pokazali jasno **odvisno od odmerka razmerje med koncentracijami hranil in zaviranjem reproduktivne sposobnosti**, s posebno močno korelacijo z nitrati ($R^2 = 0,956$, $p < 0,01$). Ta odziv je bil še posebej očiten pri drugem vzorčenju, kjer so povečane koncentracije hranil povzročile znatno povečanje odstotka neoplojenih jajčec.

Vzporedno je enocelična alga *I. galbana* pokazala **znatne spremembe v sintezi fotosintetskih pigmentov**, pri čemer vzorec odziva odraža razvoj rastline v štirih vzorčenjih. Močna negativna korelacija med hranili in pigmenti ($R = -0,93$ za NO_3^- proti klorofilu a) potrjuje občutljivost tega organizma kot indikatorja **stresa s hranili**. Z metodološkega vidika ima razviti protokol nedvomne prednosti: hitrost izvedbe, ponovljivost rezultatov, ekonomska vzdržnost in enostavnost implementacije, zaradi česar je privlačen tudi za **majhne proizvodne obrate**. Pravzaprav uporabljeni instrumenti, osredotočeni na prenosni terenski spektrofotometer, predstavljajo široko uporabljeno napravo pri spremljanju ribogojstva z

nizkimi stroški, ki imajo obroben vpliv na celotno naložbo. To orodje, ki se že pogosto uporablja za analizo hranil, se lahko uporablja na enak način za vrednotenje fotosintetskih pigmentov, kar omogoča nizke operativne stroške in naredi protokol dostopen in trajnosten.

Pristop z več organizmi, uporabljen v tej študiji, je omogočil ovrednotenje učinkov hranil na različne biološke končne točke in spremljanje časovnega razvoja sistema. Ti rezultati zagotavljajo pomembne indikacije za **optimizacijo upravljanja akvaponičnih sistemov**, pri čemer poudarjajo pomen integriranega biološkega spremljanja za zagotavljanje trajnosti teh sistemov. Sposobnost teh organizmov, da se občutljivo in predvidljivo odzovejo na subletalne spremembe v okoljskih pogojih, jih naredi posebej primerne kot sisteme **zgodnjega opozarjanja**, ki omogočajo prepoznavanje morebitnih kritičnih težav, preden lahko ogrozijo delovanje rastline.