

Mérésalapú halastavi tápanyag-gazdálkodási rendszer kidolgozása, és környezeti hatásainak felmérése

A projekt során intelligens tápanyag-gazdálkodási rendszer alapjait dolgoztuk ki, amelyet in situ telepített szondarendszerrel nyomon követett vízkémiai változók anyagforgalmi kapcsolatának feltárására alapoztunk.

1. A projekt kontextusa

A tógazdasági akvakultúra mind kiterjedését, mind volumenét tekintve meghatározó szektora a halhús termelésnek Magyarországon. A mintegy 26.000 hektáron történő tógazdasági haltermelés tápanyag-gazdálkodásának fontos eleme a tavak trágyázása. A technológiában az előállított halhozam cca. 45-55%-át ez az ún. természetes hozam biztosítja a tavi táplálékhálózaton keresztül. Az abraktakarmány – takarmányhozam – a természetes táplálékot egészíti ki. A halastavi akvakultúra mai gyakorlatában a tápanyag-gazdálkodás alapvetően az üzemeltetői tapasztalatokon, szokásokon és üzemeltetői „ökölszabályokon” alapul. Kontrollját jobb esetben is csak a zooplankton időszakos mennyiségi becslése adja, de általános, hogy hatékonyságát mindössze az alkalmanként elvégzett próbahalászat (a termelt halak tömeggyarapodásának becslése) biztosítja. A nem jól kontrollált, alacsony hatékonyságú tápanyagbevitel a rosszabb termelési eredmények (takarmánykonverzió, növekedés) mellett a halastavi rendszerekből elfolyó víz minőségének romlását és a befogadó víztest fokozott eutrofizálódását is okozhatja.

A projektben végzett tevékenység egy hosszabb távú kutatási munkába illeszkedik, amelynek célja a hazai tógazdasági akvakultúra gazdasági és környezeti fenntarthatóságának növelése a takarmányozási és trágyázási műveletek „smart” (adatvezérelt) alapokra helyezésével. A MATE HAKI víziója a kutatás során az, hogy szenzorok alkalmazásával, valamint a prediktív modellek fejlesztésével és használatával a tápanyagbevitel hatékonyabbá tehető a jelenleg alkalmazott módszereknél. A fenti kihívást szem előtt tartva kutatásunk során olyan hidrobiológiai monitorozó és modellező rendszer alapelveit fektetjük le, amely támogatja a halastavi termelőket abban, hogy a halastavi termelők a tápanyag-gazdálkodást mind a bevitt mennyiség, mind annak ütemezése szempontjából optimalizálni tudják.

2. Elvégzett munkák

a. Adatok, kísérleti beállítások

A HAGF/4/2021. sz. projekt keretében két különböző halastavi kísérletben generáltunk adatokat a későbbi folyamatelemzésekhez.

2021.05.10 és 2021.09.09. között 2 db egyhektáros halastóban a következő beállítások mellett végeztünk egy kísérletet elsősorban a szervestrágyázás hatásainak azonosítása céljából:

- Csak előkészítő trágyázással kezelt halastó, 100 kg/ha kétnyaras pontykihelyezéssel. A kihelyezés után már nem vittünk be tápanyagot (sem szervestrágyát, sem takarmányt) a tóba.
- Előkészítő és fenntartó trágyázással kezelt halastó, 200 kg/ha kétnyaras pontykihelyezéssel. A szezon folyamán további 3 alkalommal, összesen 11 t/ha mennyiségben alkalmaztunk trágyázást.

A kísérlet beállítása során törekedtünk arra, hogy az egyik kezelés során ne vigyünk be a kihelyezést követően szerves anyagot, így csökkentve a tápanyagforgalom modellezése során a paraméterezést zavaró, ismeretlen koefficienseket/változókat tartalmazó folyamatok számát és felmérjük a bentikus szervezetekben, az előkészítő trágya kioldódásában meglévő tápanyagforgalmi bizonytalanságot. A kísérlet során 34 db időpontban nyertünk adatot 38 db vízkémiai és tápláléklánc változóra vonatkozóan, és ezen felül a szezon folyamán háromszor üledékvizsgálatot is végeztünk. Így mintegy 1200 adapontból álló adatbázist hoztunk létre, amelyhez való hozzáférést nyílttá tesszük az „open science” tudományos gyakorlathoz illeszkedve. Az adatokat jelenleg az alábbi linken elérhető felhőplatformon tároljuk.

https://unimatehu-my.sharepoint.com/:f/g/personal/gya7910_uni-mate_hu/EtSexQq6c59Bi9_IX8B8bLwB_fgTuMfVUwTYIwLrjbfkw?e=0UY9Qh

A mappa 3 fájlt tartalmaz. A „Mintavételek és labormérések” fájlban megtekinthetők rendre az egyes füleken a következő adatok a trágyával kezelt illetve a kezeletlen kísérleti tó vonatkozásában.

- Telepített biomassza (kg) és halak mennyisége (db). Próbahalászatok alkalmával mért össztömeg (kg) és halak száma (db), illetve látható elhullott halak száma (db)
- Vízkémiai paraméterek meghatározása kézi műszerrel való méréssel (hőmérséklet, °C; oldott oxigén, mg/l; pH; vezetőképesség, μ S; redox potenciál, mV)
- Vízkémiai paraméterek meghatározása akkreditált laboratóriumban végzett méréssel (pH; vezetőképesség, μ S/cm; KOI, mg/dm³; BOI, mg/dm³; NH₄ (ion), mg/dm³; NH₄-N, mg/dm³; NO₃ (ion), mg/dm³; NO₃-N, mg/dm³; NO₂ (ion), mg/dm³; NO₂-N, mg/dm³; TIN, mg/dm³; TON, mg/dm³; TN, mg/dm³; PO₄ (ion), mg/dm³; PO₄-P, mg/dm³; TP, mg/dm³; TSS, mg/dm³; Chl-A, mg/dm³; Feopigment, mg/dm³)
- Üledék tápanyagtartalma, akkreditált laboratóriumba vitt mintából meghatározva
- A vízszint feljegyzett ingadozásai (párolgás és pótlóvíz)
- Feljegyzett elhullások
- A trágyakezelések során kivitt mennyiségek és azok időpontja

Egy másik excel fájlban található az adatok a modell futtatásához szükséges meteorológiai adatokról (a tavaktól légvonalban 1,2 km-re levő meteorológiai állomásról származó mért adatok a levegő hőmérsékletre, a relatív nedvességtartalomra, szélesebbesre, csapadéokra és

radiációra.) Egy harmadik excel fájlt mutatja a zooplankton mintázás során mért mennyiségeket taxononkénti bontásban.

	Víz hőm °C	pH	Fajl. et. Vízminőség µS/cm	KOIK mg/dm ³	BOIS mg/dm ³	NH4-N (ion) mg/dm ³	NH4-N mg/dm ³	NO3-N (ion) mg/dm ³	NO3-N mg/dm ³	NO2-N (ion) mg/dm ³	NO2-N mg/dm ³	TIN mg/dm ³	TON mg/dm ³	TN mg/dm ³	PO4-P (ion) mg/dm ³	PO4-P mg/dm ³	TP mg/dm ³	TSS mg/dm ³	Chl-a mg/dm ³	Feopigment mg/dm ³	Víz hőm °C	pH
20210510	19.9	8.08	321	11		0.167	0.129	1.697	0.383	0.075	0.023	0.536	1.874	2.41	0.131	0.049	0.05	7	9.5	21.7	19.9	8.08
20210512	24.1	8.92	578	24		0.246	0.191	0.319	0.072	0.064	0.019	0.283	1.727	2.01	0.131	0.043	0.12	17	18	7.3	23.9	8.54
20210514	22.1	8.72	569	21		0.189	0.147	0.304	0.069	0.026	0.008	0.223	0.584	0.81	0.129	0.042	0.08	5	5.3	13.3	21.8	8.14
20210518	20.5	8.18	551	24		0.268	0.208	0.285	0.064	0.1	0.03	0.303	0.673	0.98	0.316	0.103	0.15	11	4.2	1	20	8.22
20210525	22.9	8.64	523	11	5.1	0.211	0.164	0.059	0.013	0.095	0.029	0.206	1.67	1.88	0.272	0.089	0.16	3	19	2.5	22.4	8.25
20210528	21.4	8.36	555	23	6.5	0.287	0.223	0.032	0.007	0.134	0.041	0.271	12.63	12.9	0.482	0.157	2.04	36	20.1	6.66	21.3	8.38
20210601	22.4	8.4	566	25	5.1	0.288	0.224	0.059	0.013	0.098	0.03	0.267	2.05	2.32	0.403	0.131	0.206	22.4	35.9	9.37	22.4	8.23
20210604	21	8.62	585	23	2	0.197	0.153	0.256	0.058	0.059	0.018	0.229	0.46	0.69	0.414	0.135	0.159	7.14	15.9	4.94	21.1	7.32
20210608	24.9	8.58	606	24	4.5	0.314	0.243	0.287	0.065	0.072	0.022	0.33	1.4	1.73	0.486	0.158	0.165	10	10.6	5.03	24.6	8.33
20210611	24.3	8.57	631	23	4.8	0.291	0.226	0.214	0.048	0.081	0.025	0.399	1.49	1.79	0.355	0.116	0.179	6	15.9	2.71	23.9	8.52
20210615	23	8.59	662	23	3.6	0.236	0.183	0.144	0.033	0.058	0.018	0.234	0.69	0.93	0.342	0.112	0.209	41	15.9	8.66	23.5	8.61
20210618	25.6	8.6	632	25	3.9	0.304	0.236	0.261	0.059	0.116	0.035	0.33	2.14	2.47	0.773	0.252	0.23	8.57	18	5.06	25.2	8.62
20210622	28	7.8	661	27	8.7	0.172	0.133	0.384	0.087	0.083	0.025	0.245	2.07	2.32	0.36	0.118	0.245	68.57	13.7	11.51	27.5	8.49
20210625	30.3	8.46	673	25	5.1	0.675	0.524	0.134	0.03	0.085	0.026	0.581	0.55	1.13	0.608	0.198	0.25	15.71	14.8	8.97	29.7	8.43
20210629	29.2	8.56	687	25	5.9	0.171	0.133	0.125	0.028	0.3	0.091	0.252	2.41	2.66	0.282	0.092	0.235	27.27	21.1	4.86	28.6	8.17
20210702	24.1	8.58	670	27	7	0.214	0.166	0.129	0.029	0.251	0.076	0.272	0.85	1.12	0.48	0.157	0.247	94	28.2	13.41	24.3	8.52
20210706	25.9	8.55	686	28	4.5	0.172	0.134	0.28	0.063	0.321	0.098	0.295	0.58	0.87	0.294	0.096	0.184	30	11.6	12.14	25.9	7.71
20210709	28.3	8.55	682	28	5.1	0.111	0.087	0.711	0.161	0.097	0.03	0.277	1.85	2.13	0.295	0.096	0.136	26.67	12.7	5.89	28.3	7.58
20210713	29.1	8.71	668	41	16	0.119	0.093	0.15	0.034	0.036	0.011	0.138	1.29	1.43	0.344	0.112	0.171	47.14	91.6	15.35	28.5	8.39
20210716	27	8.81	677	20	9	0.133	0.103	0.099	0.002	0.062	0.019	0.124	3.2	3.32	0.339	0.11	0.149	35.29	82.5	16.34	26.9	8.13
20210720	25.3	8.64	678	38	7.3	0.145	0.113	0.224	0.051	0.035	0.011	0.174	1.51	1.68	0.26	0.085	0.192	61.67	57.1	22.4	25.1	8.4
20210723	26.3	8.93	631	24	10.7	0.426	0.331	0.079	0.018	0.097	0.03	0.378	1.34	1.72	0.418	0.136	0.163	24	102.5	23	26.2	7.47
20210727	28.6	9.12	591	64	31.4	0.117	0.091	0.042	0.01	0.003	0.001	0.102	3.37	3.47	0.12	0.039	0.3	60	272.7	40.74	27.6	7.89
20210730	27.7	8.81	570	76	11.8	0.117	0.061	0.014	0.007	0.056	0.018	0.116	3.11	3.13	0.207	0.068	0.204	48	108.0	70.8	27.5	7.78

1. ábra A kísérlet során mért adatokat tartalmazó excel fájl a megosztott mappában

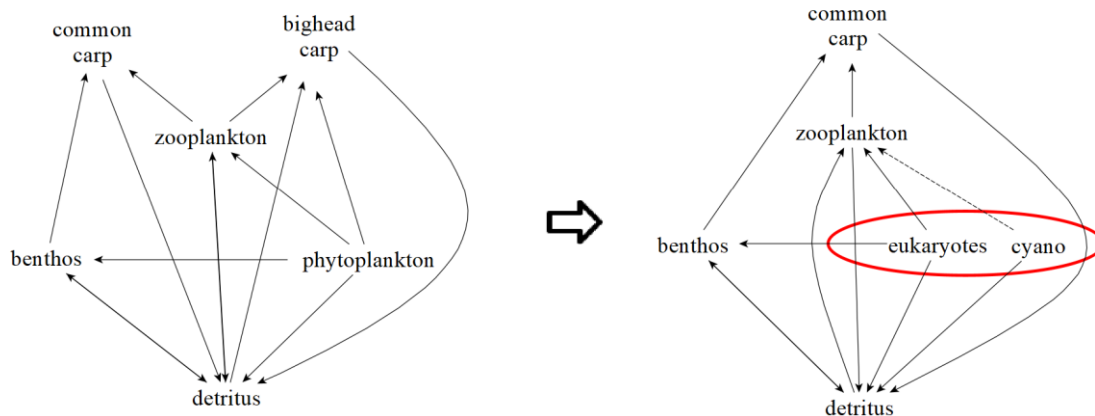
A 2021-es adatgyűjtésre épülően a 2022. évi tógazdasági szezonban is beállítottunk egy kísérletet 3 db egyhektáros tóban további összefüggések feltárása érdekében. Az új kísérleti a 2021. évitől eltérő tápanyagterhelésnek vannak kitéve a tavak, takarmányozást és az egyik tóban műtrágyát is alkalmazunk. Ezt a tevékenységet (tóbérlet, vízminták költségei) 2022.05.31-ig jelen (HAGF/4/2021) projekt, 2022.06.01-ét követően felmerült költségeket pedig a HAGF/11/2022 projekt finanszírozza. A részletes beállításokat utóbbi projekt jelentésében írjuk le. A gyűjtött adatok a következő megosztott fájlban érhetőek el:

https://unimatehu-my.sharepoint.com/:x:/g/personal/gya7910_uni_mate_hu/EQngqkzBxMxIsgEMdZYxaTsB0bNSbsp-76ofDYIYnmiadQ?e=VBB2oe

Eltérés az előzetes munkatervhez képest, hogy a vízminőség szenzoros monitorozását csak a 2022. évi kísérletek során tudjuk elvégezni, a szenzorok beszerzésének nehézségei miatt. (A 2021. év során nem voltak szenzorok felszerelve a halastavakon.) A költségek a tervezetthez képest csak kis mértékben módosultak; „Laborszolgáltatások költsége” soron 19 980 Ft-tal, „Tóbérleti díj” soron ugyanennyivel kevesebbet számolunk el. Ennek indoka az előbbi tétel pontosan nem tervezhető összege, az előzetesen számoltnál több mintát vittünk az akkreditált laboratóriumba.

b. A tápanyagdinamikát előrejelző modell fejlesztése

A mérési adatokra alapozva kezdtük meg a modell továbbfejlesztését. A fejlesztés során struktúra- és paraméter-módosításokat egyaránt végeztünk abból a célból, hogy a projekt céljaihoz (okos tápanyaggazdálkodás) közelebb kerüljünk. A struktúra-módosítás lényege, hogy a fitoplankton csoportot kétfelé bontottuk a csoportot nagyrészt jellemző eukarióta, illetve a hőmérséklet függvényében gyorsabban szaporodó, a tavakban nem kívánatos cyanobaktérium csoportra. Ennek megfelelően a modell generálás alapjául szolgáló hálózatléírásban módosítottuk a food-web-re vonatkozó fogyasztási irányokat, az 1. ábra szerint.



1. ábra: A modell struktúrájának módosítása

A food-web ábra a jobb oldalon látható módosított struktúrán a cyano → zooplankton közötti szaggatott nyíl a cyano-baktérium zooplankton általi korlátozott fogyasztására utal. A cyano részarányának növekedésével ugyanis a zooplankton teljes fitoplankton fogyasztása csökkenni kezd, mivel nem képes az eukarióta és a cyano szétválogatására. Az eukarióta/cyano kezdeti arányát 99%-1%-al becsültük.

A projektben generált adatok alapján a korábbi modellhez képest a 3. táblázatban összefoglalt folyamatokra vonatkozóan végeztünk módosításokat az összefüggésekben illetve azok paramétereiben.

3. táblázat: Módosított paraméterek

Folyamat neve	Paraméter	Érték	Dimenzió	Forrás
t_cyano	ufmax	2.5	1/nap	Eredeti értéke a cikkben: 3.
	topt	28	°C	becslés
	tmin	9		
	tmax	36		
t_eukaryotes	ufmax	2.5	1/nap	Eredeti értéke a cikkben: 3.
	topt	24	°C	becslés
	tmin	9		
	tmax	34		
fertilizer decomp	beta	0.002	dimenziómentes	Eredeti értéke: 0.2

A t_cyano és t_eukaryotes folyamatokat leíró egyenleteknél az ufmax (maximális növekedési ráta) paramétert megváltoztattuk a meteorológiai adatok ismeretében. Jelen fejlesztés során a radiációs adatok rendelkezésre álltak, ezért ezek ismeretében a fotoszintézis modelljét úgy módosítottuk, hogy az az aktuális napi radiációs adatokat használja minden időlépésben, az (1) egyenlet szerint:

$$L = L_0 * \exp(-K * PhotDepth) \quad (1)$$

ahol

L_0 a meteorológiai adatokból származó aktuális napi radiáció, $W m^{-2}$,

K az ún. fénykioltási együttható, a vízben lévő aktuális fitoplankton és detritusz koncentrációtól függően, m^{-1} ,

$PhotDepth$ az átlagos mélységre utal, ahol a fotoszintézis folyamata lezajlik, m

A tényleges mérési értékekkel való számolásra való átállást követően a paraméter pontosítása során az ufmax értéket 2.5-re állítottuk. A fejlesztés jelen fázisában a t_cyano és t_eukaryotes

folyamatokra vonatkozóan egyaránt 2.5-ben határoztuk meg az értéket. Mivel a modell meglehetősen érzékeny erre a paraméterre, további vizsgálatokat érdemes folytatni a két paraméter egymáshoz viszonyított arányára vonatkozóan. A 2022. évi kísérletek során a telepített szonda rögzíti a cianobaktériumra vonatkozó adatokat, így ebben tovább lehet lépni. A módosított táplálékhálózatban az eukaryotes és cyano csoportok a zooplankton táplálékát képezik, eltérő mértékben. A hőmérséklet emelkedésével nagyobb ütemben szaporodó cyano csoport jelenléte csökkenti a zooplankton teljes fitoplankton csoportra vonatkozó fogyasztását, mivel szétválogatni nem tudja. Ezt a folyamatot a modellben az alábbi függvénnyel vettük figyelembe, az eukaryotes és cyano csoport fogyasztását leíró egyenletekben:

$$Factor = 1 - (FC / (FE + FC)) \quad (2)$$

ahol

FC a cianobaktérium koncentrációja, kg/ha

FE az eukaryotes csoport biomasszájának koncentrációja, kg/ha

A havonta történő szervestrágya kijuttatás modellezéséhez a tényleges beadagolási időpontokban (havi egy alkalommal) a trágya a detrituszba kezd bomlani, a (2) egyenlet szerint:

$$DD = Beta * Fert * Area * DT \quad (2)$$

ahol

Beta a szerves trágya detrituszba való bomlásának paramétere, dimenziómentes

Fert a tóban lévő aktuális koncentráció a szerves trágyára vonatkozóan, kg/ha

Area a terület, ha

DT a modell időlépése, nap

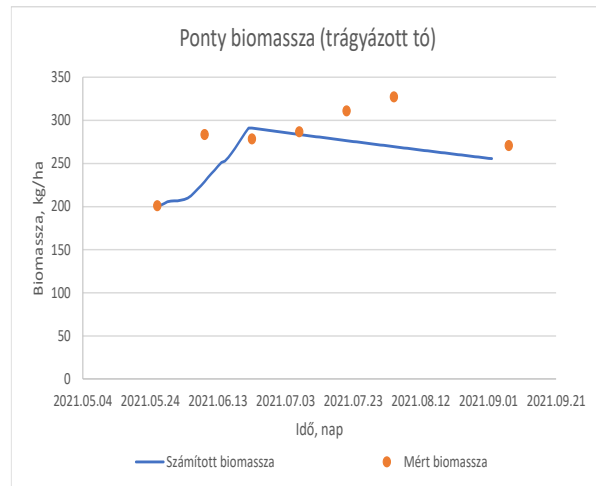
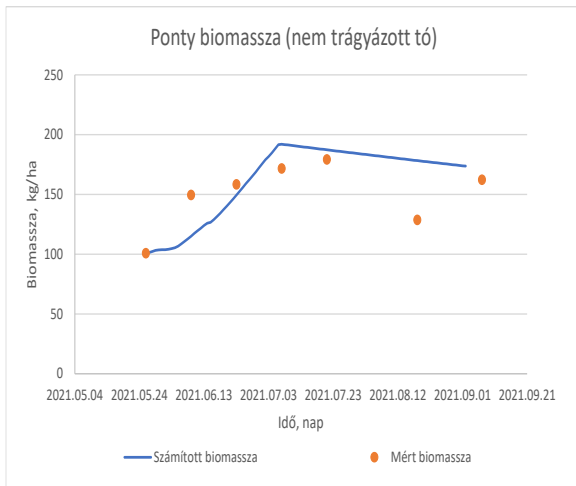
A relatíve magas mennyiségű szervestrágya bomlása a modellben több helyen okozott a valóságban nem tapasztalható viselkedést, az alábbiak szerint:

- a detritusz biomassa ugrásszerű növekedése;
- a detritusz zooplankton számára tápanyagként való hasznosulása a zooplankton biomassa hirtelen növekedését eredményezte;
- az illuzórikusan nagy detritusz biomassa még több N-t és P-t juttat a vízbe;
- ugyanakkor a fitoplankton képződést és a fotoszintézis folyamatát gátolja a megnövekedett detritusz koncentráció miatti árnyékoló hatás;
- ezzel párhuzamosan lecsökken az oxigénszint.

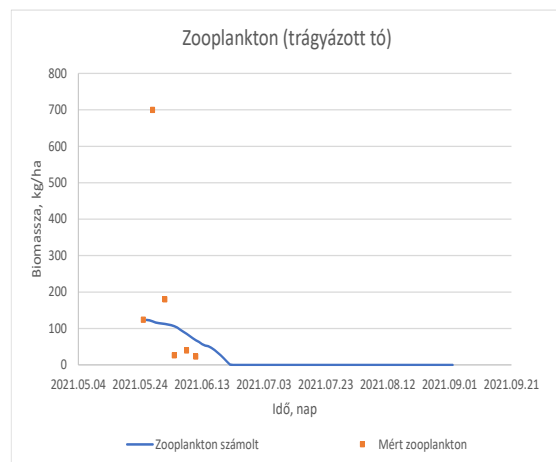
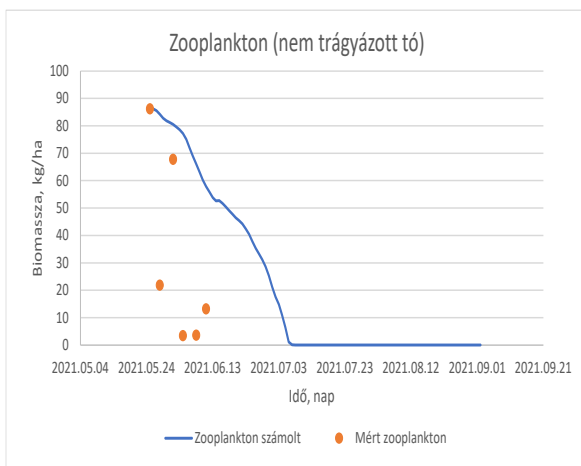
A módosított modell többlépcsős identifikálásának első lépésében a Beta paramétert két nagyságrenddel csökkentve a modellben kiküszöböltük a szervestrágya bejuttatás utáni hirtelen bomlási folyamatot, ami a fenti anomáliák megszűnését eredményezte. Ezzel egyidejűleg a modell által számolt N és P értékek helyett a ténylegesen mért értékeket vettük figyelembe minden időlépés során, ld. 8 és 9. ábra), és az identifikálást a táplálékhálózat elemeit leíró paraméterekre fókuszáltuk. A 2022. évi adatok alapján majd a a detritusz és a szervestrágya bomlás modelljének fejlesztését végezzük el, ami a jelenleg használt modell egyenletek teljes felülvizsgálatát/cseréjét jelenti.

A modell számítások eredménye az identifikálás első lépése után

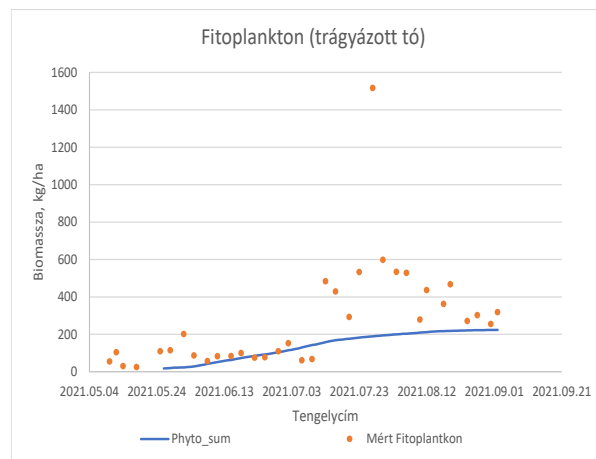
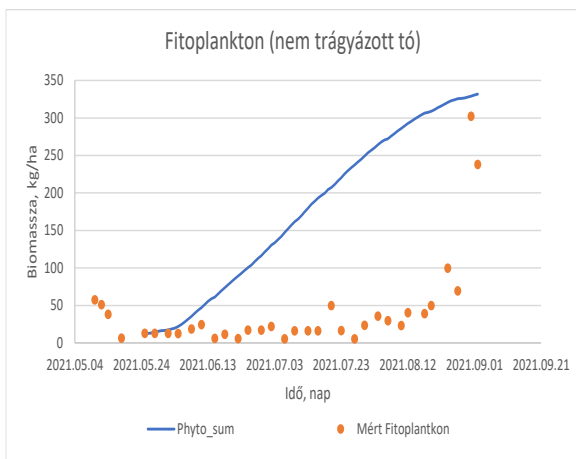
Az alábbi diagramokon a továbbfejlesztett modell pillanatnyi verziójával mért és azámított értékek hasonlíthatók össze.



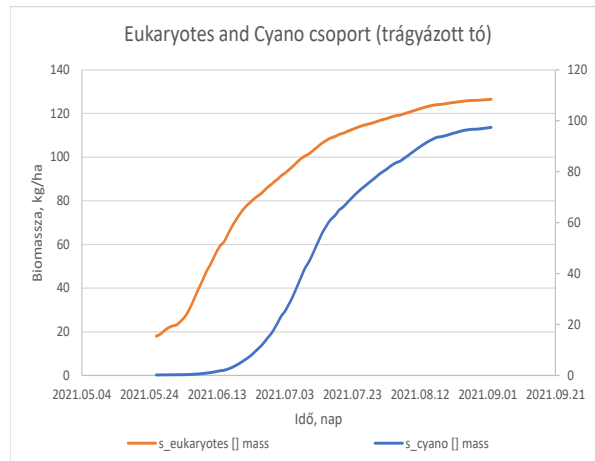
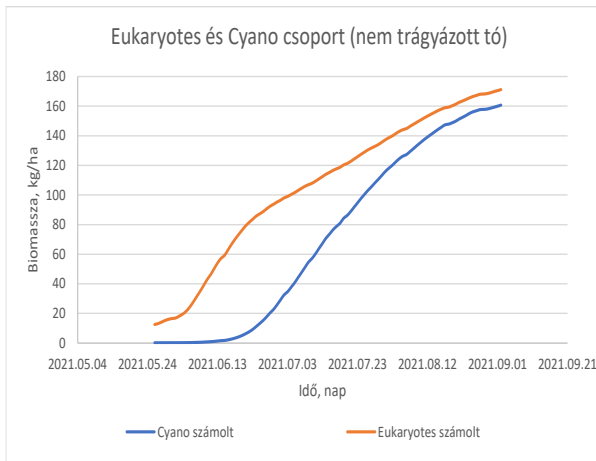
2. ábra. Számított és mért ponty biomassza



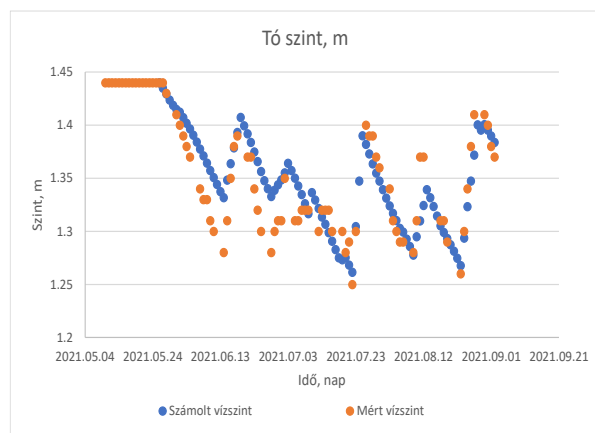
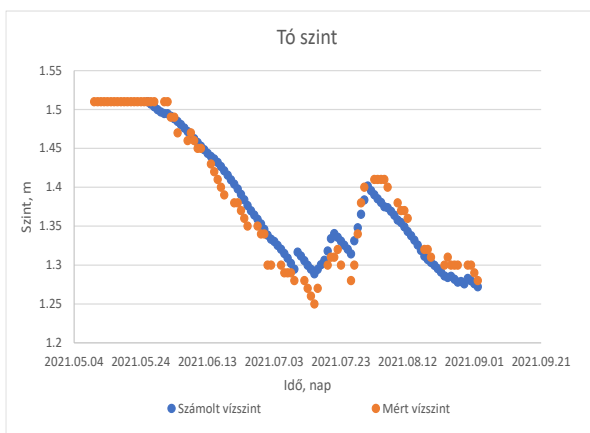
3. Számított és mért zooplankton biomassza



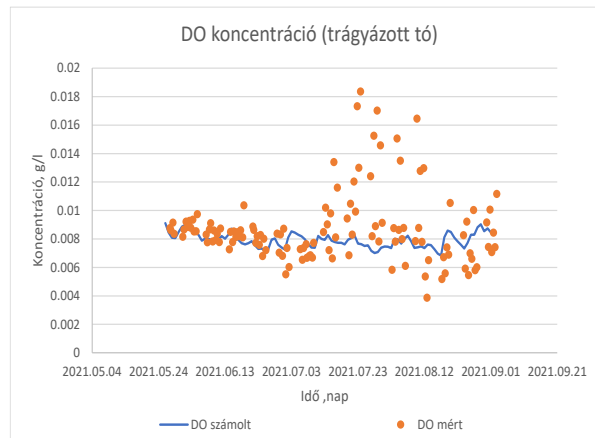
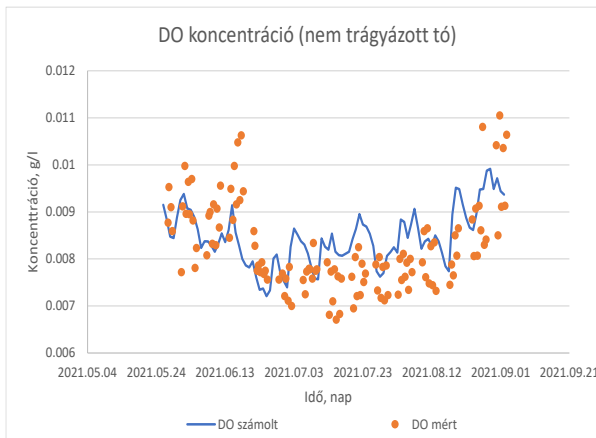
4. ábra Számított és mért fitoplankton biomassza



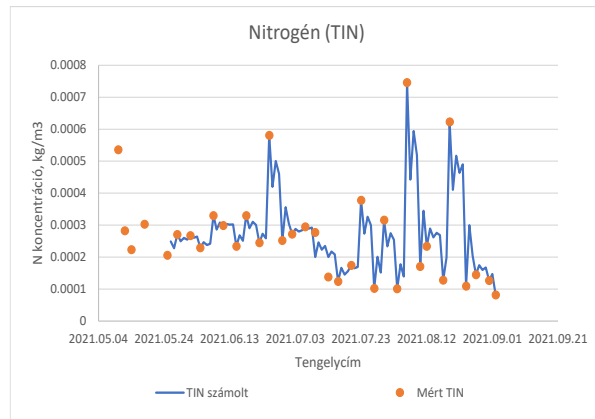
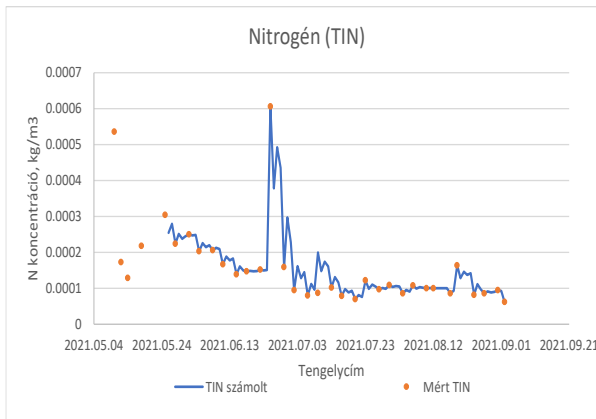
5. ábra Számított eukarióta és cyanobaktérium csoportok biomasszája



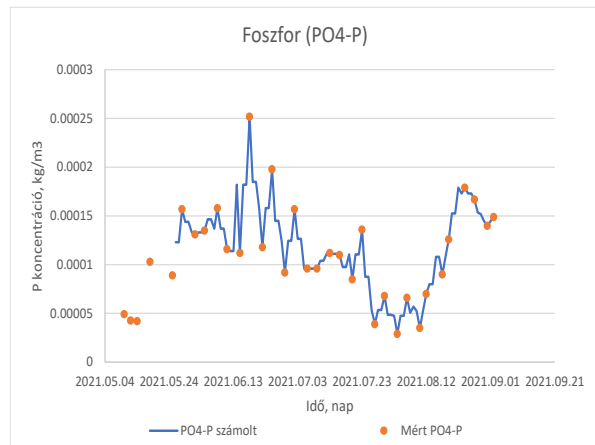
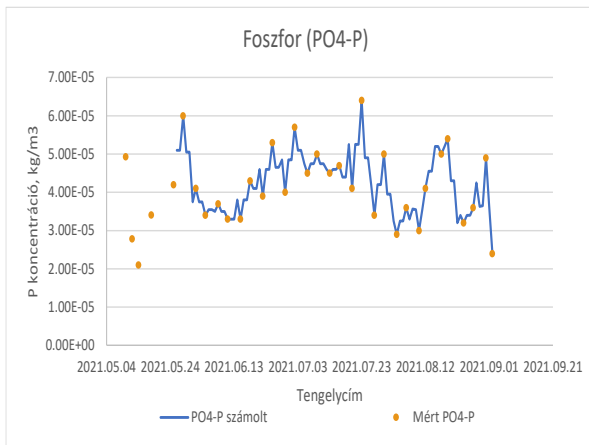
6. Számított és mért vízszint



7. Számított és mért oldott oxigén koncentráció



8. A többlépcsős identifikálás során rögzített, a mérések alapján beépített nitrogén koncentráció



9. A többlépcsős identifikálás során rögzített, a mérések alapján beépített foszfor koncentráció

A modellfejlesztéshez kapcsolódó fájlok, illetve a jelen állapot szerinti eredmények egy onedrive mappában érhetők el.

https://unimatehu-my.sharepoint.com/:f:/g/personal/var7240_unimate_hu/EvqlpQ5jMzRGpjeLvH6v1cMBgvt8kzjLREA8WWmZXdVAKQ?e=ne76VK