



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

**A VÍZMINŐSÉG MONITOROZÁSA A FÉNY
SPEKTRÁLIS TULAJDONSÁGAINAK
FELHASZNÁLÁSÁVAL**

Doktori értekezés tézisei

Barczy András

DOI: 10.54598/003700

Gödöllő

2023

A doktori iskola

megnevezése: Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága: Műszaki tudományok

vezetője: Prof. Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Műszaki Intézet

témavezető: Dr. Géczy Gábor
habilitált egyetemi docens, PhD
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Környezettudományi Intézet

.....

.....

Az iskolavezető jóváhagyása

A témavezető jóváhagyása

Tartalomjegyzék

1.	A munka előzményei, célkitűzések.....	3
1.1.	A téma időszerűsége.....	4
1.2.	Célkitűzések	8
2.	Anyag és módszer	11
2.1.	NIX Color Pro, NIX Color Sensor Pro.....	11
2.2.	DJI AIR S2	13
2.3.	További képképző eszközök	15
2.3.1.	SJCAM 4000.....	15
2.3.2.	Canon 6D.....	16
2.3.3.	iPhone SE	16
2.3.4.	Xiaomi Mi 8	17
2.4.	További mérőeszközök.....	17
2.4.1.	Exact iDip.....	17
2.4.2.	Meteorológiai paraméterek mérése	19
2.5.	Akkreditált laboratóriumok	19
2.6.	A mintázás és a mérési folyamatok bemutatása	20
2.6.1.	A vízminták gyűjtése, feldolgozása.....	20
2.6.2.	A minták tárolása, megsemmisítése	21
2.7.	A mérések során használt szoftverek, metódusok	21
2.7.1.	Adobe Photoshop, Adobe Lightroom.....	21
2.7.2.	Microsoft Excel	23
2.8.	További pilóta nélküli légi járművek	24
2.9.	Mérési helyszínek.....	25
2.9.1.	Párhuzamos bioreaktorok	25
2.9.2.	Az isaszegi tórendszer 4. számú nevelőtava.....	26
2.9.3.	A gödöllői szennyvíztelep és annak anoxikus reaktora.....	27
2.9.4.	Validálásra használt további helyszínek.....	28

2.10.	Vizsgálati folyamatára.....	29
3.	Eredmények és azok megbeszélése.....	30
3.1.	A víz színezete és a TN tartalom összefüggés-vizsgálatának eredményei	30
3.2.	A víz színezete és a PO ₄ tartalom összefüggés-vizsgálatának eredményei	36
3.3.	A szennyvíztelep anoxikus reaktorában lévő szennyvíz színérzékelése távérzékelés segítségével.....	42
3.4.	Pilóta nélküli légi járművek forgószárnyai által keltett hullámok okozta bizonytalanság	48
3.5.	A pilóta nélküli légi járművek magasság általi feltételezett színérzékelés torzulásának vizsgálata.....	54
3.6.	További 8-bites CMOS érzékelőkkel rendelkező képrögzítők vizsgálata és kiértékelése a színhelyesség és színpontosság szempontjából.....	59
4.	Következtetések és a javaslatok	64
4.1.	Víztestek össznitrogén koncentrációjának a becslése	64
4.2.	Víztestek foszfátion koncentrációjának a becslése.....	66
4.3.	Anoxikus szennyvízreaktorok foszfátion koncentrációjának a becslése.....	67
4.4.	Pilóta nélküli légi járművek forgószárnyai által keltett légmozgás okozta bizonytalanság becslése	68
4.5.	Pilóta nélküli légi járművek magasság által feltételezett bizonytalanság becslése.....	70
4.6.	További 8 bites CMOS érzékelővel ellátott képrögzítő eszközök vizsgálata, színmérés lehetőségének vizsgálata	71
5.	Új tudományos eredmények	73
6.	Értekezéshez kapcsolódó kiemelt publikációk.....	76

1. A munka előzményei, célkitűzések

*„A legfontosabb kérdés, hogy mit minek a függvényében vizsgálunk.”
(Dr. Csizmadia Béla)*

Az ember számára a víztestek nemcsak az egészség, élelem, jövedelem és energia forrását, a jelentős közlekedési útvonalakat és rekreációs helyeket jelentik: a víz nélkülözhetetlen az életünkhöz. A víz, különösen az édesvíz megléte, állapota és használata életünk egyik legfontosabb tényezője. Mivel a víz nem áll korlátlan mennyiségben rendelkezésünkre, ha biztosítani akarjuk, hogy a jövőben is mindenki hozzáférjen a tiszta ivóvízhez, és hogy a folyók és tavak továbbra is tájunk és életünk kulcsfontosságú elemei maradjanak, erőfeszítéseket kell tennünk a felszíni és felszín alatti vizek védelmére és állapotának javítására. A folyók, patakok, tavak és felszín alatti vizek nemcsak természeti, hanem gazdasági szempontból is hatalmas jelentőséggel bírnak, hiszen jövedelemszerzési és ráfordítási lehetőségeket kínálnak, ebből kifolyólag állaguk megóvása elengedhetetlen és aktuális feladat.

A vízhasználatnak azonban ára is van: az urbanizáció, a népességnövekedés és a növekvő emberi tevékenység egyik következménye, hogy a keletkező szennyvíz mennyisége – és így a kezelendő szennyvíz mennyisége is – növekszik. A háztartási szennyvíz mennyisége és minősége az emberi életmóddal együtt folyamatosan változik. A szennyezett víz káros anyagokat tartalmaz, többek között betegségeket okozó baktériumokat, vírusokat, szerves hulladékokat, szerves anyagokat (sók, savak, nehézfémek), szerves növényi tápanyagokat (nitrátok, foszfátok), szerves vegyületeket (olajok, mosószerek, rovarirtók). A vízszennyezés a vizet részben vagy

teljesen alkalmatlanná teszi az emberi használatra, és károsítja a természetes vízi életfolyamatokat. A vízminőség biztosítása érdekében ezért prioritást élveznek a vízellátó rendszerekben történő folyamatos mintavételek, valamint a vízszennyezés kimutatására irányuló részletes analitikai és mikrobiológiai vizsgálatok. Környezeti szennyeződés esetén a vizsgálatokat ki kell terjeszteni az vízforrás körüli felszíni vizekre és talajra is, lehetővé teszi a szennyezés útjának nyomon követését. Annak érdekében, hogy vízhasználatunk fenntartható legyen, és ezáltal elegendő mennyiségű és minőségű ivóvizet tudjunk biztosítani a jövő generációi számára, a potenciális vízszennyezést már a keletkezésénél kell megszüntetni (Csósz, 2019).

A magyarországi vízgazdálkodás alapvető szabályait a vízgazdálkodásról szóló - többször módosított - 1995. évi LVII. törvény tartalmazza. Ez adja az állami és önkormányzati környezetvédelmi tevékenység általános rendszerének alapját, ugyanakkor meghatározza a környezetgazdálkodási rendszer felépítését és a társadalom egészének felelősségét a környezet védelméért az egyének felelősségén keresztül.

1.1. A téma időszerűsége

A fenntartható vízgazdálkodás mind az ipari, mind a háztartási vízfelhasználóktól erőfeszítéseket igényel. A globális éghajlatváltozás hatásaihoz való alkalmazkodás a vízgazdálkodás és a vízhasználat tekintetében is szükséges (Takács, 2019). A vízszennyezés korunkban rengeteg formában van jelen, bár kontinensenként, országonként, régióként ezen szennyezési módok nagysága, formája meglehetősen különböző, mégis van egy közös kapocs: maga a víz, az életető elemünk. A víz nem kizárólag hidratálásra hasznosítható, kiváló higiénés vegyület, óriási gazdasági és

energiapotenciállal rendelkezik (halászat, hajózás, vízerőművek) és bár a pufferkapacitása óriási, azért nem végtelen. Más-más eljárást igényel egy óceánszennyezés felszámolása, vagy egy éppen megtörténő eutrofizációs folyamat fékezése, esetleg megállítása vagy visszafordítása. Mivel a lélegzésünkhöz szükséges oxigén 50-80%-át a bolygónk kontinenseit összekötő óceánokban lévő algák állítják elő (Chapman, 2013; Witman, 2017), a tenger- vagy óceánparttal nem rendelkező országok sem vonhatják ki magukat a szennyezéssel kapcsolatos erőfeszítések alól, a felelősség sokkal kiterjedtebb. Az is tény, hogy a víztestek elhanyagolása vagy kisajátítása akár nemzetközi konfliktusok forrása is lehet.

A mesterséges tisztítási technológiák ellenőrzésére szolgáló műszerek fejlődése a tápanyagok eltávolításának különböző módjait, a kisebb térfogatú szennyvíztisztítás fejlesztését és intenzívebbé tételét, valamint a nehezen lebomló vagy a befogadó vizekre veszélyes mérgező szennyező anyagok hatékonyabb visszatartását jelentette. Valamennyi technológia kisebb-nagyobb mértékben a szennyező anyagok "természetessé tételére" irányuló biológiai folyamatokon alapul. A vízfelületek monitorozása a fejlett országokban jellemzően kémiai gyorsesztekkel zajlik, amelyek tárolása és az alkalmazásuk is egyaránt komoly odafigyelést kíván. Sajnálatos módon – az okokat nem igazán értve – a gyorsesztek a felhasználásuk után ritkán kerülnek a veszélyes hulladéktárolóba, sőt, akár a szavatossági idő lejártá után is használják még őket, aminek következtében pedig torzul(hat)nak a mérések során kapott adatok.

A szennyvíztelepek monitorozását szondákkal oldják meg. Szintén sajnálatos tény, hogy gyakran tapasztalni elhanyagolt állapotú, kalibrálatlan szondák alkalmazását, amely eljárási módnak egyenes következménye, hogy a

szennyvíztelep hatásfoka is csökken a torz adatokra történő beállítások következtében. Ez a kialakult állapot azonban nem feltétlenül hanyagság vagy igénytelenség miatt jön létre: az üzemeltetési költségek alacsonyan tartása miatt nem áll módjukban újabb vagy több szondát vásárolni. A fejlődő országokban ennél sokkal rosszabb a helyzet: a népesség növekedése és az iparosodás gyorsabb, mint a hozzá kapcsolható szennyvíz kezeléséhez szükséges új infrastruktúra kiépíthetősége. Még manapság is előfordul, hogy a szennyvizet magába a vízfolyásba vezetik; még ha a vízellátás fúrt kútból származik is, vagy ha vezetékes is, a szennyvízrendszer nem feltétlenül van kiépítve, azaz nincs gyűjtőrendszer. Ugyanakkor a szennyvíz kezelése nemcsak a mennyiséget növeli, hanem a vízellátást is sokkal kiszámíthatóbbá teszi, mivel a szennyvíz keletkezése jórészt független az időjárástól. Afrikában, Dél- és Délkelet-Ázsiában a tengerek és óceánok szennyezettsége nagyon erős, ugyanakkor elegendő tőkeinjektálás hiányában ez a helyzet évről évre csak romlik, ahogy a világgondolkodásunk és politikai nézeteink is egyre bipolárisabbak. Ennek a környezetvédelem látja a kárát: a fejlődő és fejlett országok egymást hibáztatják az okozott környezeti terhelésekért, és a vita hevében elmarad a megoldásra való törekvés (Barczy és Géczi, 2018).

A jövőben sokkal nagyobb figyelmet kell fordítani a szennyező anyagok vízbe jutásának korai szakaszban történő csökkentésére, máskülönben a hatékony szennyvíztisztítás már nem biztosítható. Bár az EU országai viszonylag problémamentesek a szennyvíz összegyűjtése és kezelése terén, a világ országainak 80%-ában még szennyvíztisztító telepek sincsenek, így a vízszennyezés továbbra is napi szintű probléma. (Kümmerer et al., 2018)

A szennyvízkezelés aktuális környezetvédelmi kérdés, mivel a jogszabályok arra kényszerítik az ipari szennyezőanyag-kibocsátókat, hogy új technikákat

alkalmazzanak nemcsak értékes termékeik visszanyerése, hanem szennyezőanyag-kibocsátásuk csökkentése érdekében is. Ennek alapján a szükséges szennyvíztisztítás mértékét a befogadó telephelyen uralkodó körülmények, a tisztítandó szennyvíz mennyisége, a tisztított szennyvízzel a befogadó telephelyre juttatható szennyező anyagok mennyisége, gazdasági megfontolások és az egyes országokban hatályos vízvédelmi jogszabályok által meghatározott kezelési határértékek befolyásolják (Postel, 2000). Azokat a kezelési eljárásokat kell előnyben részesíteni környezetvédelmi megfontolások alapján, amelyek önmagukban csekély környezetterheléssel és minimális hulladékproduktummal járnak (Appels et al., 2008).

Ugyancsak jelenünk aktualitáshoz kapcsolódik az a tény, hogy azáltal, hogy a szennyvízhálózatot szinte mindenki használja, ezzel a módszerrel gyorsan és olcsón lehet reprezentatív egészségügyi információhoz jutni, és az így keletkező adatok támogatást és egyben segítséget jelentenek megfelelő döntések meghozatalában (Pándics et al., 2021) ahogy mindez meg is valósult a Covid-19 járvány idején.

Smalley (2005) már 1986-ban egyetemi előadásaiban arra hívta fel a figyelmet, hogy a víz szerepel a tíz legnagyobb globális probléma között, még hozzá a második helyen. Úgy vélte, hogy amíg a vízzel és vízgazdálkodással kapcsolatos kérdések és kihívások nem rendeződnek, a további kilenc globális probléma (sorrendben: energetika, víz, élelmiszer-hozzáférés, környezetszennyezés, szegénység, háború és terrorizmus, betegségek és járványok, demokratikus értékek fenntartása, populációs kérdések) sem oldható meg.

A távérzékelés használata a mezőgazdaságban és a környezetvédelemben is egyre nagyobb teret nyer. A vizsgálat tárgya lehet a mezőgazdasági

növénytermesztésre használt szántóföld, valamint az élővizek és szennyvizek megfigyelése. Ezért nemcsak a műholdas adatgyűjtés, hanem a repülőgépek, drónok stb. által végzett adatgyűjtés is fontos szerepet játszik a precíziós mezőgazdaságban és a környezetvédelemben egyaránt. A folyamatos és nagy pontosságú helymeghatározás (GPS/GNSS), a térinformatikai támogatás (GIS) és a távérzékelés kombinációja lehetővé teszi például a mezőgazdasági munkák automatizálását, valamint a növényzet és a környezeti károk folyamatos nyomon követését. Továbbá az észlelt eltérések és az okozott károk feltérképezésére is használható. Mindezek együttesen növelhetik a mezőgazdasági termelést, javíthatják a környezetvédelmet, és nem utolsósorban költséghatékonyabbá tehetik mindezen tevékenységeket.

1.2. Célkitűzések

A disszertációm szakirodalmi részében tudományos könyveket, folyóiratcikkeket és internetes tanulmányokat tekintettem át, korábbi doktori dolgozatokkal és konferencia-kiadványokkal egészítettem ki meglévő tapasztalataimat, valamint áttekintettem a területre vonatkozó releváns jogszabályokat is. Ebből kifolyólag a szakirodalomban külön fejezetben járom körül a vízminőség, a fény és a távérzékelés témakörét. A vízminőséggel foglalkozó részben feltárom az élővizekkel, a szennyvízzel, illetve a vízben élő indikátor szervezetekkel, algákkal kapcsolatos klasszikus és friss releváns tudományos megállapításokat, kutatási eredményeket. A fényről szóló fejezet esetében a fény fizikai tulajdonságain túl a színelméletet, a színérzékelést, valamint a digitális képkeltetés technológiáját veszem górcső alá. A távérzékelés fejezetben pedig annak a környezetvédelemben betöltött szerepét fejtem ki. Az Anyag és módszer egységben egyrészt részletesen

bemutatom a mintavételi mérések során alkalmazott eszközöket, valamint a mérési helyszíneket. A kutatásom empirikus részében prezentálom az eredményeket, az azokból levont következtetéseket. Az új tudományos eredmények egy külön fejezeteiben kaptak helyet.

Mivel azt tapasztaltam, hogy a szennyvízkezelés terén a fejlesztések meglehetősen lassúak, célom egy olyan, a fény spektrális tulajdonságán alapuló vízminőség meghatározási eljárás kifejlesztése volt, ami segíti az élővizek karbantartását és/vagy rehabilitációját, illetve a szennyvíztelepek működtetését. Ezen eljárás megvalósításakor mindenképpen szem előtt kívánom tartani a pontosságot, a könnyen kezelhetőséget, a gyors reakcióidőt, valamint az alacsony üzemeltetési költségeket. Kutatásom alapvető célja tehát nem más, minthogy tudományos eredményekkel elősegítsem a vízminőség meghatározást, és gyorsíthassam a megfigyelési technológiákat, illetve az esetleges beavatkozást.

A doktori disszertációmban mérési eredményekre támaszkodva vizsgálom különböző tulajdonságú víztestek színösszetételének a változását, illetve a távérzékelési lehetőségek korlátait, valamint ezen korlátok csillapítási lehetőségeit. Ez a célkitűzés azon a feltevésen alapszik, hogy a víz színezete, illetve a vízben élő szervezetek színezete korrelációban van a víz esetleges terhelőivel, azok fizikai tulajdonságaival.

A monitoringrendszer kifejlesztését adatokkal való alátámasztással és matematikai egyenletek felállításával kezdem. Elsősorban az agrárszektorból és a szennyvízkezelésből érkező terhelésekre koncentráltam, ezért esett a választásom a víz foszfát (PO_4) és össznitrogén (TN) tartalmára. Továbbá azt is célul tűztem ki, hogy a szín-monitorozás lehetőségét kiterjesszem: meg kell ismernünk a kiterjesztés lehetséges határait és zavaró tényezőit.

Feltételezésem szerint a képrögzésre alkalmas eszközök alkalmazása környezetvédelmi célok érdekében még nem érte el a csúcspontját, a technológiai fejlődéssel újabb lehetőségek nyílnak ezen a területen is, így, a későbbiekben részletesen ismertetett, a képrögzésre alkalmas eszközök birtokában végeztem el a kutatás empirikus részét.

Összességében megvizsgáltam a vízben élő indikátorszervezeteket, a többféle víztest színezetét, fizikai/kémiai tulajdonságaikat. A képrögző eszközök között leírható különbségeket, a távérzékelési lehetőségeket, a távérzékeléskor felmerülő zavaró és beavatkozó tényezőket figyelembe véve olyan modellt állítottam fel, ami hatékony információt képes szolgáltatni a fejleszteni kívánt monitoring rendszer számára, nem mellékesen gyorsan és meglehetősen költséghatékonyan is egyben.

Kutatási kérdések:

K1: Van-e összefüggés a víz színezete és a minőségét befolyásoló kémiai paraméterei (TN, PO₄) között?

K2: Milyen pontossággal lehet meghatározni a víz pillanatnyi minőségét a színelemzés által?

K3: Milyen zavarótényezők léphetnek fel az alacsony magasságú távérzékelés során?

K4: Milyen szintű bizonytalanság léphet fel CMOS érzékelők esetén, színelemzési alkalmazáskor?

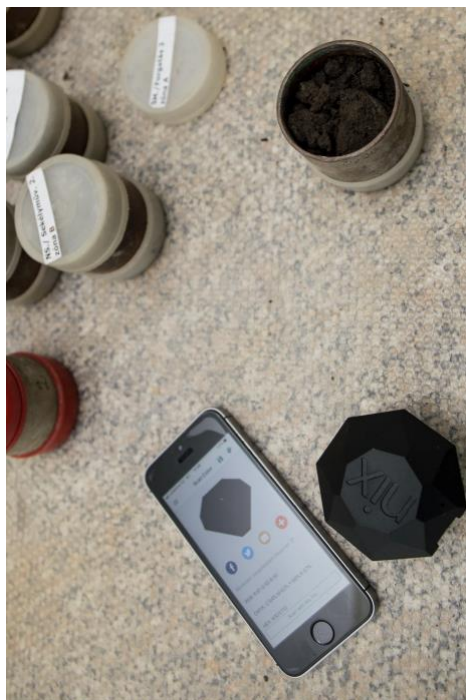
2. Anyag és módszer

Ebben a fejezetben ismertetem a mintázásra és mérésre használt eszközöket, képrögzítő eszközöket, továbbá az adatelemzésre használt metódusokat, illetve a leíró statisztikai módszereket. Ismertetem a kalibrációs eljárásokat, majd bemutatom a kísérleti helyszíneket, ahol a méréseket végeztem. Végül egy folyamatábrán keresztül mutatom be, hogy a vizsgálataimat miként végeztem el, mit minek a függvényében, és milyen területen vizsgáltam.

2.1. NIX Color Pro, NIX Color Sensor Pro

A kutatási sorozat elindulásakor CMOS érzékelővel ellátott kamerákat terveztem kizárólag használni, azonban az első pár mérés után beigazolódott, hogy a természetes fényváltozások, az időjárás, a mérési időpont mind-mind torzítja az eredményeimet, így szükség volt egy olyan eszközre, ami ezen zavaró tényezőket kizárja, és egzakt, behatásmentes számszerű adatot tud adni a mért színről. Természetesen nem adtam fel az alapvető tervemet, hogy mindenki számára elérhető metódust fejlesszek, ugyanakkor a színméréssel nem helyettesíteni szerettem volna a CMOS érzékelőket, hanem az összehasonlítás által matematikai egyenletet leírni a különbségre, hogy a metódus alkalmazható lehessen további kameratípusokra.

A kanadai Nix Sensor Ltd. fejlesztő cég NIX COLOR PRO és NIX COLOR SENSOR PRO nevű alig 8 x 8 x 8 centiméteres briliáns alakú eszközét használtam a pontos színmérésre. A termék a leírás alapján olyan eszköz, ami az élelmiszer minőségellenőrzésére, festékvizsgálatra, festékkalibrálásra lett fejlesztve (1. ábra).



*1. ábra: A NIX Color Pro talajszín vizsgálat közben.
Forrás: saját kép*

Az eszköz kisméretű, mobil, könnyen tárolható. Többszörös mérés után is pontos értékeket mutat, így az általa generált adathalmaz megbízhatónak minősül. Működését tekintve elmondható: az eszköz létrehoz egy kisebb zárt teret a mérendő terület felett, nem aggályosak az oldalról jövő egyéb fényforrások, amit mérésekkel igazoltam is; a színmérőt színkártyára helyeztem, majd különböző Kelvin értékekkel bíró fényforrásokat helyeztem, először messzebb, majd egyre közelebb a színmérőhöz, miközben az nem mozdult el a helyéről.

2020-tól a színmérésekhez NIX COLOR SENSOR PRO eszközt rendszeresítettem, ami bár külalakjában hasonlít a korábbi verziójára, tudásában sokkal magasabb szintet képvisel. Maga a színmérés is – a cég állítása szerint – pontosabb lett, illetve a szoftver fel tud venni referencia

értékeket, így az adatokat nem csak táblázatban, hanem azonnal például LAB koordinátarendszerben lehet ábrázolni. Így például egy több ismétléses mérésnél is poligon értékeket lehet elemezni, és később a vizuálisan megállapított sokszögek számadatai individuálisan analizálhatók. A két eszközt párhuzamosan használtam, így biztos lehettem a színmérés pontosságában.

A NIX COLOR PRO-val, vagy a NIX COLOR SENSOR PRO-val történő mérések során a színhelyesség biztos volt, azonban a folyadékok mérésének esetén azt javasolta a cég, hogy a színtelítettségben 35 vagy 50%-ban kompenzáljam a kapott értékeket (fehér háttér esetében), illetve amennyiben nem fehér a háttér, akkor vegyem fel a háttér színét, és azzal kompenzáljak lefelé 35 vagy 50%-ot.

2.2. DJI AIR S2

A víztestek mérésére felszíni kamerarendszer telepítése sokszor alkalmatlan; konkáv alakú tó, vagy éppen egy szennyvíztelep anaerob biológiai reaktorának részei gyakran nem látszanak a felvételeken. A Környezettechnika laboratórium megközelítőleg 1m² vízfelületű reaktorainál ez nem jelentett gondot, de az ennél nagyobb felület már problémát okozhat.

2018-ban sikeres drónpilótavizsgát tettem, és 2021 júniusában vásároltam egy saját DJI AIR S2 (2. ábra) típusú drónt, ami 2021-ben a legjobb felvételező drónnak számított a piacon.



2. ábra: DJI Air S2 drón.

Forrás: <https://dji-official-fe.djicdn.com/cms/uploads/ead2358fecb94ceb86d412f4ca4b67d.png>

Akár 18,5 km hatótávolság jellemzi, repülési magassága elérheti a tengerszint feletti öt km-t, azonban a magyar és EU-s törvények szerint ezekkel az eszközökkel maximum 120 m magasba lehet emelkedni, hogy a légitörvények ne legyen veszélyeztetve. Minimális repülési/lebegési magassága 0,5 m (alsó távolságmérő szenzorokkal mérve), ezalatt a gép automatikus landolási manőverbe kezd. Egy akkumulátorral – széljárástól függően – 25-30 percet lehet a levegőben tartózkodni, a végsebessége 70 km/h, és a stabilizáló rendszer 10,7 m/s sebességű szellőkésig képes tartani a magasságot és az irányt. A LiPo 3S akkumulátor 3500 mAh teljesítményű, 42,42 Wh fogyasztású. A jármű 595 g súlyú (akkumulátorral), repülésre felkészített állapotban 180 mm x 253 mm x 77 mm méretű. A kamera a három tengelyű gimbal-stabilizálón helyezkedik el, 90 és -24 fok között buktatható, a vibrációs kilengés 0,01° alatt van. Az 1" CMOS érzékelő 20 MP (5472×3648; 3:2 képarány esetében) méretű állókép rögzítésére alkalmas 2,4 µm pixelméret mellett, jpeg vagy RAW (*.DNG) formátumban. A lencse 88°-ot zár be (széleslátószög, a full-frame megfelelője 22 mm), a rekesze fix f/2,8. 10-bites színmélység jellemzi (a vizsgálatokhoz 8-bites módot választottam), így a színek pontosak, ezáltal a dinamikus elválasztásuk könnyen lehetséges. Sorozatmódban másodpercenként két-három *.DNG kép elkészítése lehetséges.

2.3. További képkalkoló eszközök

2.3.1. SJCAM 4000

A kamerák kiválasztásakor a szenzor érzékenysége, a rögzített kép színmélysége volt mérvadó, de fontos szempont volt, hogy automatikusan ismétlődő fotósorozatot tudjon készíteni a kamera akár víz alatt is, hogy a képkezelés befejeztével egymás után vetítve ún. time-lapse videón keresztül gyors-idődimenzióban lehessen látni a színváltozást. A SJCAM 4000 kamera (3. ábra) 12 MP (4032*3024 - 4:3 képarány) nagyságú képek készítésére alkalmas 2.2 µm pixel mérettel az 1/3" méretű az AR0330 típusú szenzor, amelyeket *.jpeg formátumba tömörít 10-bites színmélységgel (a vizsgálatokhoz átállítottam 8-bites színmélységre).



3. ábra: SJCAM4000.

Forrás: <https://www.sjcammagyarország.hu/img/41446/ep-sjcam-sj4000-wifi/ep-sjcam-sj4000-wifi.jpg>

A kamerák 900 mAh akkumulátorának maximális felhasználási ideje sorozatfelvétel esetében három-négy óra körül van, mozgókép rögzítésnél ez csupán 70-90 percre tehető, ami a méréshez viszont nem elegendő. A vízhatlan tok módosításával Micro-USB porton keresztül külső forrásra csatlakoztattam a kamerát, így a felvétel a MicroSD kártya megtelítéséig folytatható. A kamera maximum 64GB tárhelyű MicroSD kártya fogadására

alkalmas, megközelítőleg öt napig tudott rögzíteni megállás nélkül, ami képmérettől függően 6800-7200 képet jelent.

2.3.2. Canon 6D

Ez a digitális tükörreflexes fényképezőgép (DSLR - Digital Single-Lens Reflex) full-frame méretű (24 mm x 36 mm) CMOS érzékelővel rendelkezik, ami 20.2 MP képpont rögzítésére képes 5472 x 3648 képpontban, 6.54 µm képpont mérettel. Képrögzítési módjai között szerepel a manuális, a távvezérelt, de az időpontra időzített rögzítés is. A fényképező rendelkezik beépített GPS-el is, így az újrapozicionálás nem okozott gondot. A mérések alkalmával Canon EF 16-35 mm f/2.8L II USM típusú zoom lencsét helyeztem fel a vázra. A lencse vízszintes látószöge 98°–54° között változtatható. Színmélysége 8-bit.

2.3.3. iPhone SE

Ezt a készüléket azért választottam, mert hasonló típusú szenzorral rendelkezik (bár az elnevezése más), mint a 2.3.1. pontban részletezett SJCam4000, így az itteni különbséget csak a lencsetagok, illetve a képfeldolgozó szoftver okozhatja. A szenzor típusa: Backlit Sony Exmor RS IMX315, ami 12.2 MP (4032 x 3024) nagyságú képek rögzítésére alkalmas, 1.22 µm pixelmérettel, 8-bites színmélységgel. A lencsetagokat beépített IR filterrel ellátták, és ezen lencsetagok rögzített rekeszértéke f/2.8.

2.3.4. Xiaomi Mi 8

A Xiaomi Mi 8 okostelefon szenzor típusát a gyártó nem teszi közzé. Maga a szenzor 12 MP (4000 x 3000) nagyságú képek rögzítésére alkalmas, 1.4 μm pixelmérettel, színmélysége 8-bit. A lencsetagok rögzített rekeszértéke f/2.2.

2.4. További mérőeszközök

2.4.1. Exact iDip

A kémiai és fizikai paraméterek mérését az egykori Szent István Egyetem Épületgépészet, Létesítmény-, és Környezettechnika Tanszék tulajdonában lévő eXact iDip fotométerével végeztem. Az eszköz elsősorban medencék, akváriumok, tavak, ivóvizek mérésére alkalmazható, de szennyvíztelepen végrehajtott képrögzítéskor is méréseket végeztem (azzal együtt, hogy pontos mérési adatokat kaptam a gödöllői szennyvízteleptől), megbizonyosodva az eszköz pontosságáról. A fotométerrel a következő kémiai paraméterek vizsgálatát végeztem:

- pH,
- kalcium (Ca),
- réz (Cu),
- nitrit (NO_2),
- nitrát (NO_4)
- össznitrogén (TN),
- összes foszfátion (PO_4).

A bioreaktorban megvalósult mérések során a pH, nitrit, nitrát és foszfát értékek minden alkalommal mérésre és rögzítésre kerültek, a réz és kalcium mérések csak hetente egy-egy alkalommal.

A fotométer okoskészülékre írt applikáción keresztül vezérelhető. Az eszköz négy ml-es tartállyal rendelkezik, a minta betöltése itt történik. A mérés ideje alatt a fotométer tartályára fedés kerül, így a mérést nem befolyásolja semmilyen külső fényforrás. A tartályon belül – modelltől függően – található egy 525 nm hullámhosszú fényforrás, amelynek 11 mm a terjedési távolsága. Az eszköz rendelkezik LCD kijelzővel is, ahonnan leolvasható a tesztek neve és az eredmény, de ezek az adatok applikáción keresztül is hozzáférhetők. Az eXact iDip 4 db AAA elemmel működik és Bluetooth-on keresztül kommunikál az okoseszközökkel. Valamint mindegyik mérhető paraméterhez tartoznak teszt csíkok, amelyek közül néhány a 4. ábrán látható.



4. ábra Az eXact iDip műszerhez tartozó tesztcsíkok.
Forrás: saját kép

A minta betöltése után az applikáción keresztül kiválasztottam, hogy melyik paramétert szeretném vizsgálni, illetve elővettem az adott paraméterhez tartozó tesztcsíkot. A READ gomb megnyomása után 20 másodperces

visszaszámlálás indul, ami alatt a tesztsíkot a mintába kell áztatni. Ha ez lejárt, az eszközre fel kell helyezni a fényzáró kupakot, ekkor történik a mérés.

A méréseket hármas ismétléssel hajtottam végre, a mért eredmények átlagát rögzítettem Excel táblázatban. Amennyiben a szórás 10%-on felüli értéket mutatott, még egy mérést végeztem, és a legmagasabb szórással rendelkező adatot helyettesítettem az újonnan kapott mérési eredménnyel.

2.4.2. Meteorológiai paraméterek mérése

A 3.1. és 3.2. mérések folyamán hőmérséklet, a 3.4. mérés folyamán szélsébség mérés történt adatrögzítéssel. A hőmérsékletet mérést EBI 300 (EBRO, Németország) hőmérsékleti adatgyűjtővel végeztem. Az EBI 300 mérési tartománya -30C° és $+60\text{C}^{\circ}$ fok közt van (pontosság: $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), összesen 40000 értéket tud tárolni, a mérési idő intervallumot (illetve a kiolvasást) USB porton keresztül lehet végezni Ebro® online konfigurátor segítségével.

A szélsébség mérést FVAD 15 (Ahlborn, Németország) szárnykerekesszélsébségmérővel végeztem. A szélsébségmérő mérési tartománya 0,2 m/s és 40m/s között van, 0,01 m/s felbontással. Ezt a mérőeszközt csatlakoztattam ALMEMO ZA9909-AK1U csatlakozón keresztül egy ALMEMO-2490-4 (Ahlborn, Németország) adatrögzítőhöz.

2.5. Akkreditált laboratóriumok

A 3.1. és a 3.2. pontban ismertetett mérési sorozatok identifikációja után a validálást több alkalommal nem saját magam által mért paraméterrel, hanem akkreditált laboratóriumban készült vizsgálattal végeztem el. A KVI-Plusz

Kft. (Eurofins KVI-Plusz Kft., Budapest, Szállító u. 6, 1211) által végrehajtott vízanalitikai mérések a következő paramétereket fedték le:

- Összes oldott anyag
- Összes oldott só
- Kémiai oxigén igény (KOI, COD)
- Foszfát (PO₄)
- Össznitrogén (TN)
- pH
- Szabad Klór (DPD-1)
- E. Coli szám
- Coccus szám

Továbbá a 3.3. pontban ismertetett mérési sorozat identifikáló és validáló eredményei is laboratóriumi vizsgálat eredményei, amiket a gödöllői szennyvíztisztító bocsátott a rendelkezésemre.

2.6. A mintázás és a mérési folyamatok bemutatása

Mintázáskor fontos szempont volt számomra, hogy a környezetbe a legkisebb módon avatkozzak be, és mindig az elégséges mennyiségű mintával dolgozzak. Szem előtt tartottam a biztonsági és egészségügyi előírásokat. A mintázás során semmilyen védett növény és semmilyen állat nem sérült meg.

2.6.1. A vízminták gyűjtése, feldolgozása

A vízmintákat 0,2 l űrtartalmú PET palackba gyűjtöttem, háromszoros helyszíni vízzel való öblítés után, igyekeztem a víz kézzel elérhető mélyebb

régeit is mintázni. A mintákat visszaszállítottam a Környezettechnológia Laboratóriumba, ahol 30 másodperc rázás után cseppentővel mintát vettem, majd fehér csempére kiteve a színmérővel felvettem a cseppek színadatát. Ezután rögvest letöröltem a csempét, és megismételtem ezt háromszor.

A lehető legkevesebb PET palackot igyekeztem használni a mérésekhez, szem előtt tartva a PET környezetre rovo terhet.

2.6.2. A minták tárolása, megsemmisítése

A minták tárolására nem volt szükség, mert a minták feldolgozása és az adatkinyerés azonnali volt. A vízminták esetén a csatornahálózatot használtam, mivel alkalmanként kevesebb, mint 0,5 l mintáról volt szó, ami nem tartalmazott magas koncentrációban a környezetre veszélyes komponens.

2.7. A mérések során használt szoftverek, metódusok

2.7.1. Adobe Photoshop, Adobe Lightroom

Képfelkészítésre Adobe Photoshop, és több ismétlődő kép esetén Adobe Lightroom szoftvereket használtam.

A képek importálása után ezekben a programokban kezdtem meg a feldolgozást. A programok egyikében történt fehéregyensúly beállítás (WB), a felvételi hisztogram alapján a képek expozíciós értékek korrekciója.

A felvételek ezután exportálásra kerültek, tartva a képek eredeti tömörítésmentes formátumát: a drón esetében *.DNG, az kézikamera esetében *.CR2, illetve *.tiff formátumban.

Vizsgálattól függően a korábban exportált képek újra importálásra kerültek PS-ban, nem külön fájlként, hanem rétegenként, így az átlagolást sokkal könnyebben el lehetett végezni, megírt PS-Script segítségével a fájlban lévő összes képrétegre alkalmazható volt az átlagolás.

Átlagoláskor poligonnal vettem fel a target-területet, belenagyítva a képekbe a lehető legpontosabb kijelölésért. A poligonnal kijelölt területre pixel alapú átlagolást alkalmaztam; ez a script a kijelölt terület összes pixelét elemzi, majd színsávonkénti (R, G, B) átlagolást hajt végre, és az így kapott színt megjeleníti (5. ábra).



5. ábra: A bal oldali képen a tó fényképe látható, a jobb oldali képen pedig a tó poligonnal történő körbe jelölése utáni átlagszínnel történt kitöltés.

Forrás:

2.7.2. Microsoft Excel

Az mérési eredmények rögzítésére és kiértékelésére Microsoft Excel programot használtam. Az általam használt jelentős függvények az átlagolás „=ÁTLAG()”, a mozgóátlagolás, a bővülő átlagolás, a szórás „=SZÓRÁS()”, a minimum „=MIN()” és a maximum keresés „=MAX”, a korreláció keresés „=KORREL()”, illetve a lineáris regresszió illesztés „=LIN.ILL()”.

RGB vizuális megjelenítésére és elemzésre leggyakrabban oszlopdiaagramot vagy pontdiagramot használtam, míg a CieLAB vizuális ábrázolását pontdiagram-koordináta-rendszerben hajtottam végre.

Szintén Excelben hajtottam végre a trendvonal illesztést, ahol a lineáris trendvonalat választottam, itt is irattam ki az egyenes egyenletét, és az R-négyzet értékét.

Továbbá itt végeztem a kerekítéseket is, mert az RGB kódolásban természetes számok jelenhetnek meg (0-255), a CIELAB kódolásban az L érték (0-100) és az A-B értékek (-128-+128) között vehetnek fel kéttizedesjegyig tartó tört értéket a 8-bites színmélységű szenzorok miatt. Ezek az értékek dimenzió nélküli értékek, nincs mértékegységük.

A matematikai modellek identifikációjának ellenőrzéséhez és a validálás kiértékeléséhez a méréstartományra vetített relatív hibát (hc) alkalmaztam (Géczi et al., 2019; Kicsiny, 2018, 2017; Kline, 1953; Székely et al., 2021).

$$hc = \frac{\overline{H_c}}{C_{mért_max} - C_{mért_min}} [\%] \quad (1)$$

ahol:

- $\overline{H_c}$ – modellezett koncentráció abszolút hibájának átlaga,
- $C_{mért}$ – mért koncentráció,

- C_{mod} – modellezett koncentráció,

A modellezési abszolút hiba átlag ($\overline{H_C}$) a mért koncentráció ($C_{\text{mért}}$) értékek és a modellezett koncentráció (C_{mod}) értékek közötti különbségek átlagaként számítom ki:

$$\overline{H_C} = \frac{|C_{\text{mért}_1} - C_{\text{mod}_1}| + |C_{\text{mért}_2} - C_{\text{mod}_2}| + \dots + |C_{\text{mért}_n} - C_{\text{mod}_n}|}{n} \quad (2)$$

ahol:

- n – mérések száma.

Megjegyzés: pilótánélküli légi járművek zavaró hatásainak vizsgálatakor ugyan ezt az eljárást alkalmazom, azonosítva a (\overline{H}) átlagos abszolút hibát, $C_{\text{mért}}$ helyett – $SZ_{\text{mért}}$, mint mért színezet, és C_{mod} helyett – SZ_{mod} , mint modellezett színezet jelölésekkel.

2.8. További pilóta nélküli légi járművek

A drónmérések feltételeztem, a drón önmaga által keltett légmozgás zavaró hatásainál nem kizárólag egy típusú drónt vettem igénybe, hanem méréseket végeztem további két géptípussal.

Az első géptípus a DJI Mini 2 pilóta nélküli légi jármű. A géptípus 249 g össztömegű, 58 km/h sebességre képes gyorsulni, lemagasabb elérhető magassága 4000 méter. Legnagyobb emelkedési sebessége 5 m/s, legnagyobb süllyedési sebessége 3,5 m/s. Levegőben tartózkodási ideje 27-31 perc. A géptípussal nem készítettem képfelvételeket.

A második géptípus a DJI Mavic Pro volt. Ez a géptípus 734 g tömegű, 65 km/h képes gyorsulni, maximum 5000 méter magasságig képes emelkedni. Levegőben tartózkodási ideje 21-24 perc. Maximális emelkedési sebessége 5 m/s, maximális ereszkedési sebessége 3 m/s. Ezzel a géptípussal sem készítettem képfelvételt.

2.9. Mérési helyszínek

2.9.1. Párhuzamos bioreaktorok

Az egyetemünk Környezettechnika laboratóriuma területén létrehozott két darab kísérleti medencében (továbbiakban bioreaktorok) kétszer hathónapnyi mérést hajtottam végre. A két reaktor egyforma anyagokból és borítással épült, egyforma csövezéssel, így azonosnak mondhatók. Méretük 140 cm x 75 cm, így a vízfelület $1,05 \text{ m}^2$, a reaktor alja a felszíntől 50 centiméterre található, a víz technológiai magassága 35 centiméter, így a technológiai űrtartalom $0,3675 \text{ m}^3$ reaktoronként. Nem használtam technológiai fedést, így teljesen szabadtéri kísérletekről van szó. A bioreaktorok egymás mellett helyezkednek el, így a környezeti kitettségük is azonos (6. ábra).



6. ábra: A bioreaktorok és kitétségük.

Forrás: saját kép

A bioreaktorok párhuzamosan működtek egymás mellett, minden mérés párhuzamosan lett elvégezve. Az elnevezésük:

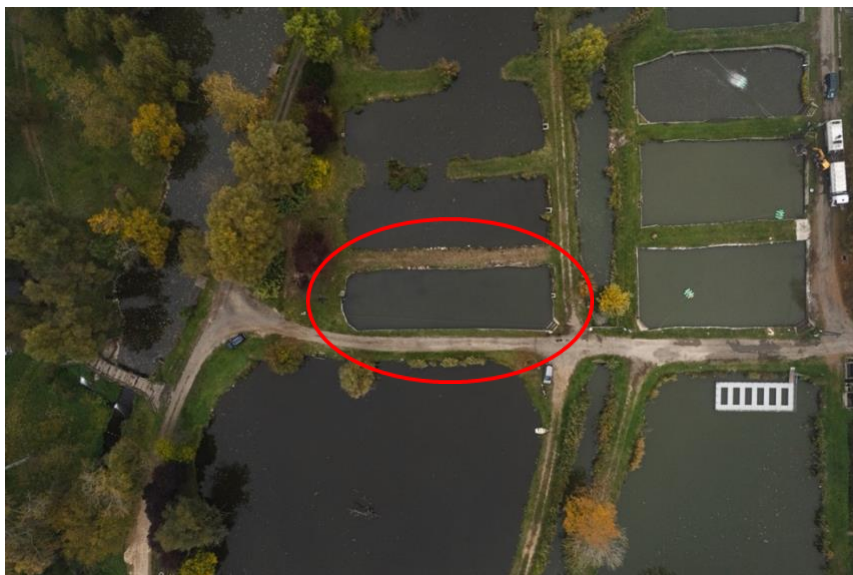
1-es: aktív vagy kísérleti reaktor: itt zajlottak a vegyszeradagolások

2-es: referencia vagy kontroll reaktor: ez a reaktor ugyanazt a vizet kapta, ugyanazon környezeti hatásoknak volt kitéve, azonban vegyszeradagolás itt nem történt.

A kísérleti reaktorokban az algaképződés különbségek kizárása miatt feltöltés után a vizek keverésre kerültek, így mindegyik mérési sorozat homogén víztesttel, hasonló fizikai és kémiai paraméterekkel indult.

2.9.2. Az isaszegi tórendszer 4. számú nevelőtava

Élővíz méréshez az Aranypony Zrt. által üzemeltetett isaszegi horgásztavak 4. számú nevelőtavát jelöltem ki (7. ábra). A tó körülbelül 50 méter hosszú, 15 méter széles, kelet-nyugati irányú, 120 centiméteres átlag üzemi mélységgel, megközelítőleg 900 m³ vízzel operál.



7. ábra: A 4. számú nevelőtó a környezetben.
Forrás: saját kép

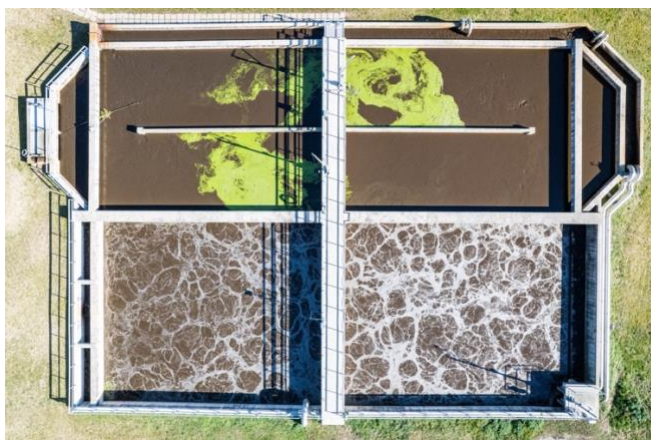
A tó kapcsolódik az isaszegi horgásztavak rendszeréhez, amit a visszaduzzasztott Rákospatak táplál, megközelítőleg 15 m^3 víz cserélődik óránként, így a teljes vízcsera megközelítőleg három napot vesz igénybe. A tó a gödöllői szennyvíztelep kifolyójának befogódója előtt nyeri a vizet.

2.9.3. A gödöllői szennyvíztelep és annak anoxikus reaktora

Egyeztetve a szennyvízteleppel (8. ábra) 15 alkalommal készítettem légifelvételeket a szennyvíztelep anoxikus reaktoráról (9. ábra). A reaktorban történő kémiai folyamatok adatait a gödöllői szennyvíztelep biztosította részemre. A felvételezést rögzített-programozott útvonalon hajtottam végre, hogy kizárhassam a magasságból adódó eltéréseket, illetve minden egyes repülési alkalmat délelőtt 11.00 és 12.00 óra közé ütemeztem.



8. ábra: A gödöllői szennyvíztelep, háttérben az isaszegi tórendszer
Forrás: saját kép



9. ábra: A gödöllői szennyvíztelep anoxikus (fenn) és aerob (lenn) reaktorai
Forrás: saját kép

2.9.4. Validálásra használt további helyszínek

A méréseim által számított modelljeim validálására egyrésztől párhuzamos méréseket hajtottam végre a 3.9.1. pontban ismertetett bioreaktorokban, másrésztől élővízteseteken hajtottam végre méréseket, hogy megismerhessem, hogy a mesterséges környezetben mérték mennyire felelnek meg a természetes, vagy táj-jellegű környezetnek.

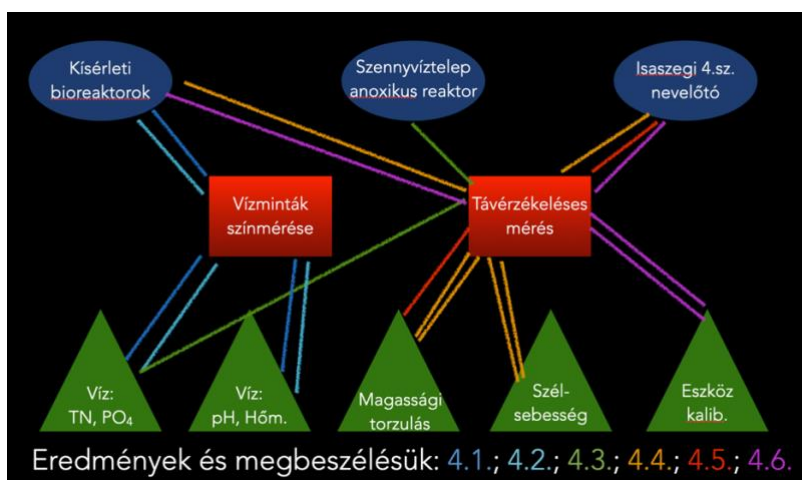
Az élővíztesteken történő validáló méréseket 2019 és 2022 közt hajtottam végre három helyszínen:

- Isaszegi 4-es számú nevelőtó (3.9.2.) (2019, 2020, 2021, 2022)
- Úrréti tó, Gödöllő (2019)
- Magán fürdőtó, Gödöllő (2020)

A méréseket hasonló módon hajtottam végre, mint a bioreaktorokban; hasonló módszerrel, és eszközparkkal, továbbá több esetben a mérések eredményeit a KVI-Plusz Kft. (Eurofins KVI-Plusz Kft., Budapest, Szállító u. 6, 1211) akkreditált laboratóriuma szolgáltatta.

2.10. Vizsgálati folyamatábra

Összegezvén, a vizsgálataimat összesen három helyszínen végeztem, ahol helyi színmérést és távérzékelést is alkalmaztam a kémiai vagy fizikai paraméterek mellett. A 10. ábrán szemléltetem a mérések folyamatát, amelyek a 3. fejezetben bemutatásra kerülő eredményekhez vezettek.



10. ábra: A vizsgálati folyamatábra

Forrás: saját szerkesztés

3. Eredmények és azok megbeszélése

Az Eredmények és azok megbeszélése fejezetben hat alpontban taglalom az általam végrehajtott mérések kiértékelését. Először a 2019-ben végrehajtott össznitrogén koncentráció és a víz színezetének összehasonlításával foglalkozom RGB szintérben, majd a 2020-ban végrehajtott foszfátion koncentráció és a víz színezetének kielemezését végzem RGB szintérben. Ennél a két vizsgálatnál figyelembe vettem a 10/2010 (VIII.18) VM rendeletet, ami határértékeket szab, ezzel definiálva a jó ökológiai állapotot. A harmadik alpontban a szennyvíztelep anoxikus reaktorait vizsgálom a víz színezete és a reaktorban található foszfátion aspektusából. A negyedik és ötödik alfejezetben vizsgálom a pilótanélküli légi járművek által keltett bizonytalanságot okozó tényezőket, illetve vizsgálom, hogy a nagyobb magasság befolyásolja-e az érzékelés színezetét. Végül további CMOS érzékelővel ellátott eszközöket vizsgálok, hogy a 8-bites érzékelők alkalmasak-e helyettesíteni egy kalibrált színmérőt, amennyiben a színmérést állapotmeghatározásra kívánjuk felhasználni.

3.1. A víz színezete és a TN tartalom összefüggés-vizsgálatának eredményei

A hazai vizeinkben az esetenként előforduló túlzott műtrágya használat, és az esetenként előforduló nem megfelelő szintű szennyvízkezelések gyakran okoznak nitrát terhelést, azonban a vizsgálatot nem szerettem volna lekorlátozni erre a vegyületre, így TN (Total Nitrogen; össznitrogén) szintet mértem. A méréseket 2019-ben hajtottam végre, 4 hónapon keresztül, heti

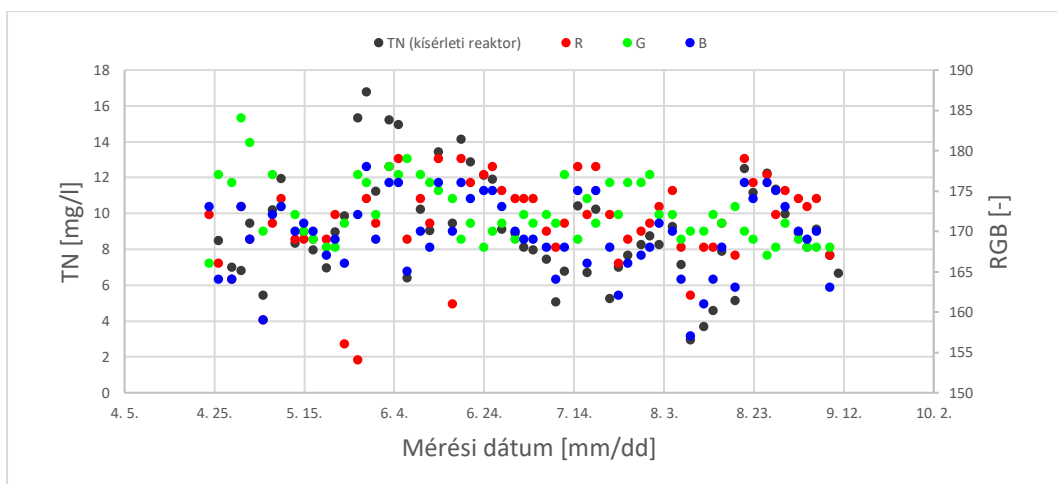
háromszori mintavétellel, az akkori Szent István Egyetem Gépészmérnöki Karának Környezettudományi laboratóriumában kiépített összehasonlító bioreaktorokban. Korábbi méréseim során összefüggést találtam a víz össznitrogén tartalma és az RGB szintér B sávja között, amit a későbbi korrelációkeresés is igazolt. A mérési sorozat 2019. 04. 23-án indult, és 2019.09.09-én fejeződött be. Ez alatt az időszak alatt heti háromszor történt mintavétel (hétfő, szerda, péntek), ahol minden alkalommal TN koncentráció mellett színmérést is végrehajtottam.

A mérési sorozatban a TN tartalom és a színelemzésen kívül mértem még víz hőmérsékletet, pH szintet, továbbá alkalmanként kötött- és szabad klórt, kalciumot és réz terhelést a hálózati víz alkalmazása miatt. A hőmérsékleti értékek és a TN tartalom között, továbbá a hőmérsékleti értékek és a mért színértékek között a korrelációkeresés nem mutatott egyezést, így a továbbiakban a hőmérsékleti értékeket csak intervallumként használtam, ahol a mérések történtek, illetve az új tudományos eredmények között erre a tartományra tudom igazolni megállapításaimat.

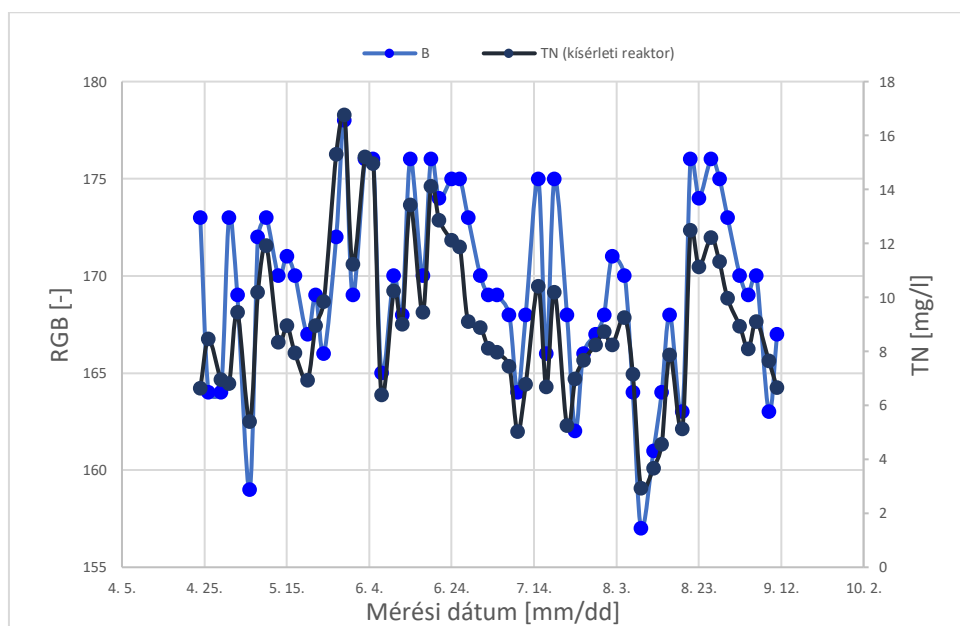
A szintér és a TN értékek korrelációkeresés eredményeit a 1. táblázat foglalja össze mind a két bioreaktor esetén, továbbá a kísérleti reaktor vizuális megjelenítését a 11. ábra, illetve a korrelációkeresés utáni B-sávra fókuszálást a 12. ábra (kísérleti reaktor) és a 13. ábra (kontrol reaktor) szemlélteti.

1. táblázat: A korrelációkeresés eredményei TN és szintér között mind a két kísérleti reaktorban.

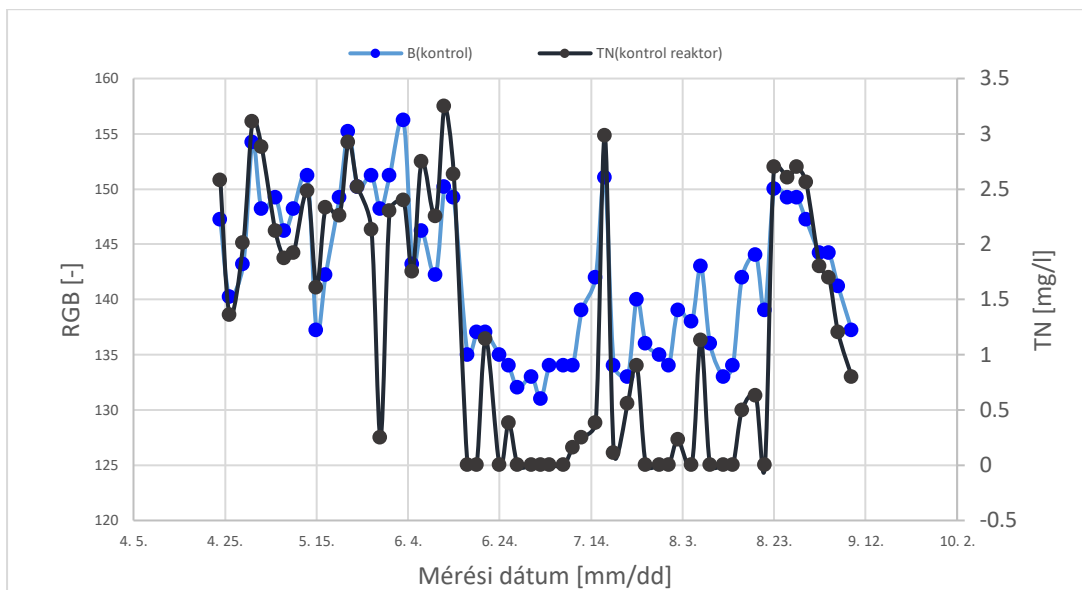
	R/TN korreláció	G/TN korreláció	B/TN korreláció	$R_{\text{kontrol}}/TN_{\text{kontrol}}$ korreláció	$G_{\text{kontrol}}/TN_{\text{kontrol}}$ korreláció	$B_{\text{kontrol}}/TN_{\text{kontrol}}$ korreláció
Korrelációs érték	0,43	0,05	0,85	0,18	0,24	0,87



11. ábra: A TN koncentráció és az RGB színtér megjelenítése a kísérleti reaktorban.



12. ábra: TN koncentráció és az RGB színtér B-sáv megjelenítése a kísérleti reaktorban



13. ábra: A TN koncentráció és RGB szintér B-sáv megjelenítése a kontrol reaktorban.

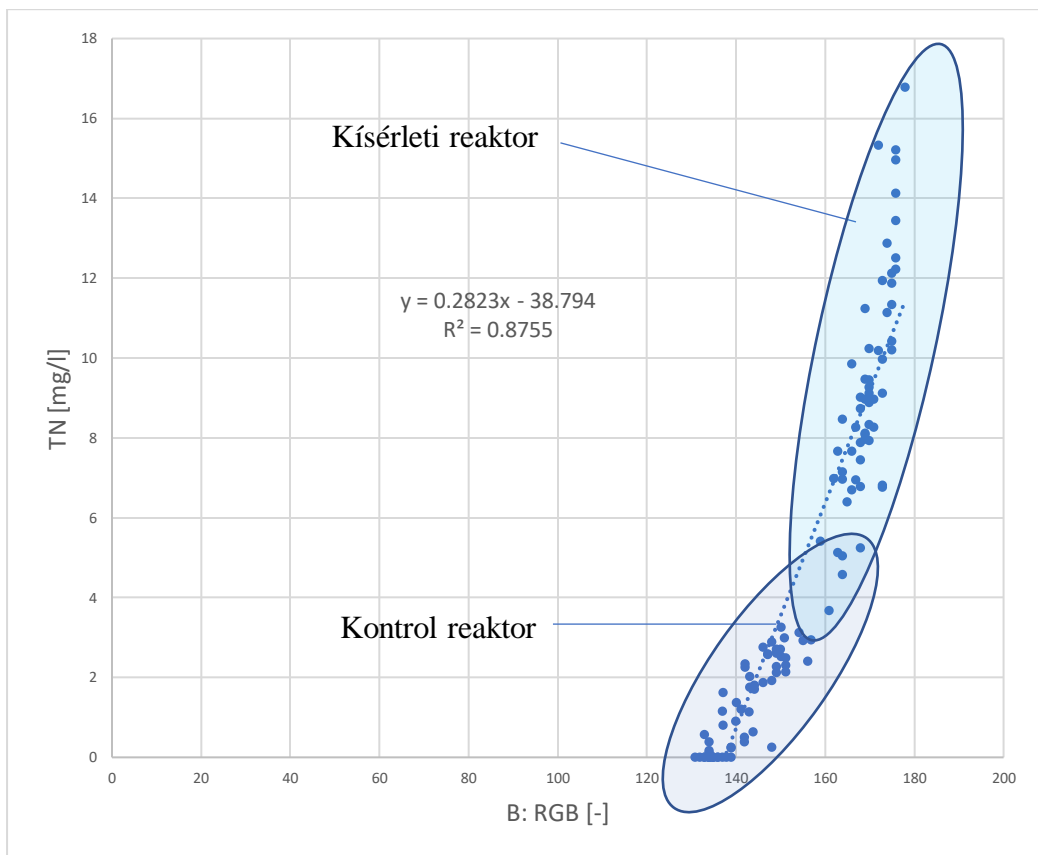
A B-sáv függvényében ábrázolva a mért TN értékeket, lineáris egyenes illesztés után a kísérleti reaktor R^2 értéke 0,71, a kontrol reaktor R^2 értéke 0,76. A két reaktor mért TN értékei között fellelhető átfedés miatt végül a két reaktor mért értékeit ugyanabban a koordináta rendszerben ábrázoltam, így az identifikáció nem 60, hanem 120 pontból jött létre.

Az így kapott lineáris egyenes R^2 értéke erősödött, 0,87 értéket vett fel (14. ábra). Az identifikáció egyenlete pedig a következő

$$TN = 0,2823B - 38,794$$

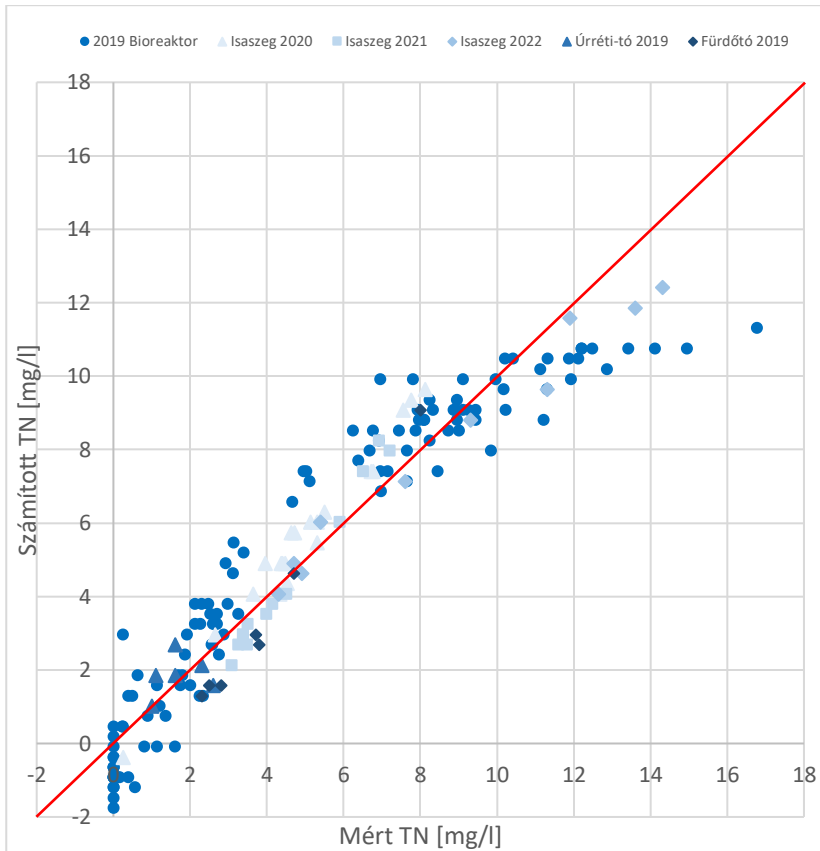
$$R^2 = 0,8755$$

(3)



14. ábra: Mindkét reaktor mért TN értékei az RGB színtér B sávjának függvényében az identifikációhoz.

A számított egyenletet felhasználva a számított TN értékek függvényében ábrázoltam a mért TN értékeket, majd további mérési sorozatokkal (összesen 53 tag, 5 mérési sorozat, amiből 4 élővíztest és egy mesterséges medence) validálást hajtottam végre, és ezt grafikusán ábrázoltam, így vizuálisan is meggyőződhettem a validálás sikerességéről (15. ábra). Az identifikációnál és a validálásnál is abszolút hiba (H_c) keresést, majd méréstartományra vetített relatív hibaelemzést (h_c) hajtottam végre. A számított lineáris összefüggés méréstartományra vetített relatív hiba eredménye: $h_c = 6\%$.



15. ábra: A TN számított értékei ábrázolása a mért TN értékek függvényében, illetve a validációs adatok.

A hibakeresés után megállapítottam, hogy a modell RGB B sáv 135 és 170 (\pm 3%) értékhatárok között képes pillanatnyi szín alapján TN koncentráció meghatározásra, efelett (TN koncentráció > 10mg/l) a színelapú becslés bizonytalansága növekszik. AZ RGB B sávja a mérések során minimum (TN=0mg/l esetén) 135 (\pm 3) értéket mutatott. A 10/2010 (VIII.18) VM rendeletben területtől és vízfolyástól függően a TN határérték 1,4 és 4 mg/l között van maximálva, így az eljárás költséghatékony, pillanatnyi határérték alapú minősítést valósít meg a víztest állapotát illetően, hogy szükséges-e laborméréseket végezni, illetve időszerű-e az esetleges beavatkozás a víztest ökológiai állapotának javítása érdekében.

3.2. A víz színezete és a PO₄ tartalom összefüggés-vizsgálatának eredményei

A hazai és EU vízfelületünk másik jelentős szennyezőjére, a PO₄-re koncentráltam a következő vizsgálatokkal. 2020-ban újra felállítottam a mérési sorozatot, a helyszín ismét a Szent István Egyetem Gépészmérnöki Karának Környezettudományi laboratóriumánál található kiépített összehasonlító bioreaktor-tér volt.

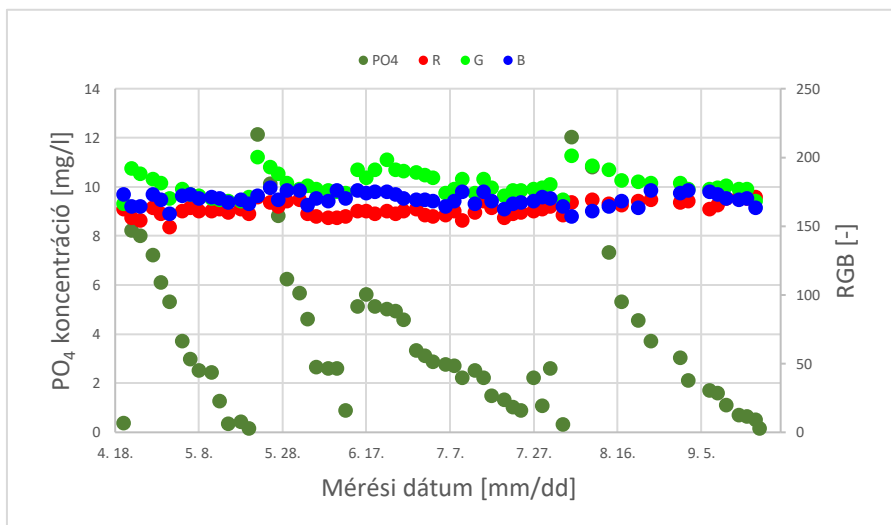
A mérési sorozat 2020. 04. 20-án indult, öt hónapon keresztül tartott (utolsó mintavétel 2020. 09. 18), heti háromszoros mintavétellel és méréssel. A mérést 4 alkalommal leállítottam, és a kísérleti reaktort kiürítettem, majd újra feltöltöttem hálózati vízzel. A két reaktor vizét ezután 2 órán keresztül egymásba cirkuláltattam, hogy a lehető leghomogénebb kiindulási állapot legyen. A mérési sorozatban a PO₄ tartalom és a színelemzésen kívül mértem még víz hőmérsékletet, pH értéket, továbbá alkalmanként kalciumot, és mivel hálózati vízzel töltöttem fel a medencét, réz terhelést. A hőmérsékleti értékek és a PO₄, illetve a hőmérsékleti értékek és a színtér nem mutatott korrelációt, így a továbbiakban ez csak a mérési sorozat intervallumát határoolja le, és az új tudományos eredmények között is csak intervallumként használom.

A színtér és a PO₄ értékek korreláció keresés eredményeit a 2. táblázat foglalja össze mind a két bioreaktor esetén, továbbá a kísérleti reaktor vizuális megjelenítését a 16. ábra szemlélteti.

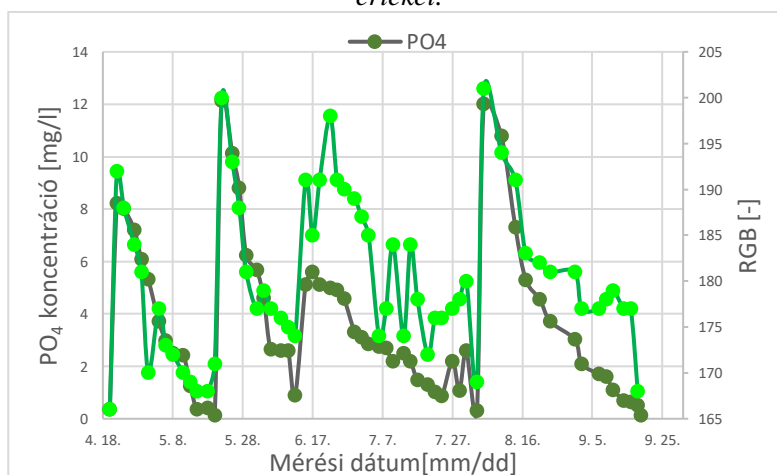
A korreláció keresés utáni G-sávra fókuszálást a 17. ábra (kísérleti reaktor) és a 18. ábra (kontrol reaktor) szemlélteti.

2. táblázat: A korrelációkeresés eredményei PO_4 és színtér között mind a két kísérleti reaktorban.

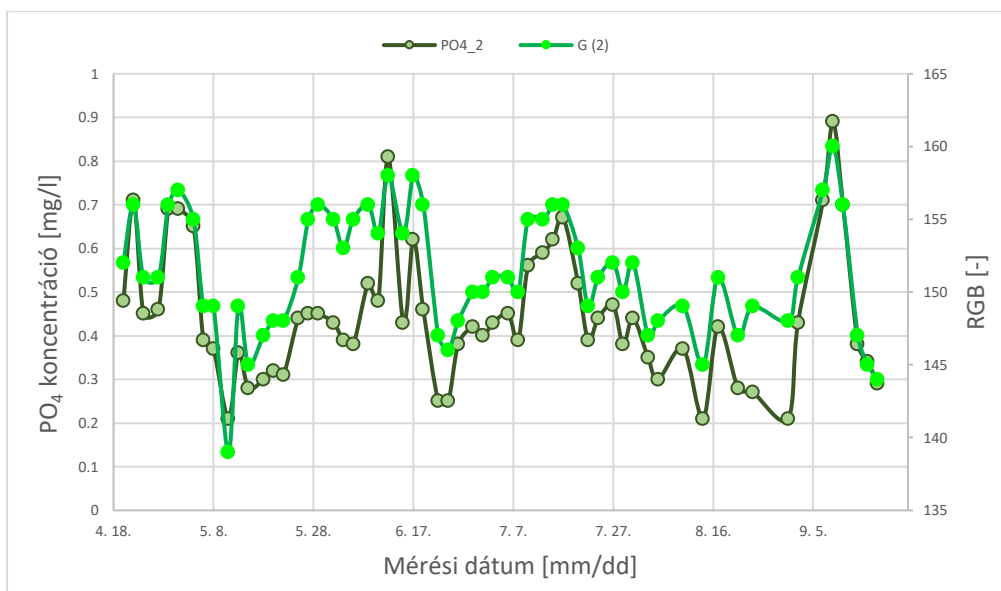
	R/ PO_4 korreláció	G/ PO_4 korreláció	B/ PO_4 korreláció	$R_{\text{kontrol}}/PO_{4\text{kontrol}}$ korreláció	$G_{\text{kontrol}}/PO_{4\text{kontrol}}$ korreláció	$B_{\text{kontrol}}/PO_{4\text{kontrol}}$ korreláció
Korrelációs érték	0,17	0,96	-0,09	0,22	0,87	0,16



16. ábra: A kísérleti reaktor PO_4 mért koncentrációja és az RGB színtér mért értékei.

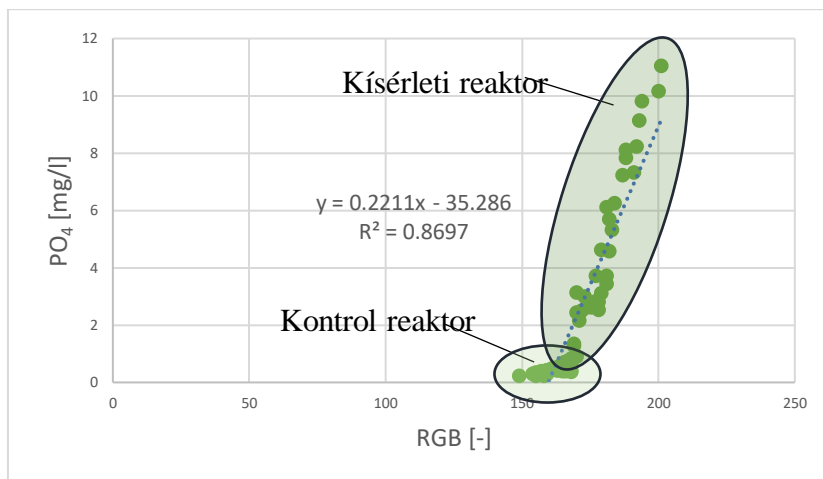


17. ábra: A kísérleti reaktor mért PO_4 értékei és az RGB színtér G sávja.



18. ábra: A kontrol reaktor mért PO₄ értékei és az RGB szintér G sávja.

A G-sáv függvényében ábrázolva a mért PO₄ értékeket lineáris egyenes illesztés után a kísérleti reaktor R² értéke 0,92, a kontrol reaktor R² értéke 0,75. A két reaktor mért PO₄ értékei között lévő átfedés miatt a két reaktor mért értékeit azonos koordináta rendszerben ábrázoltam, így nem 60, hanem 120 pontból identifikáltam a rendszert. Az így kapott lineáris egyenes R² értéke 0,87 értéket vett fel (19. ábra).



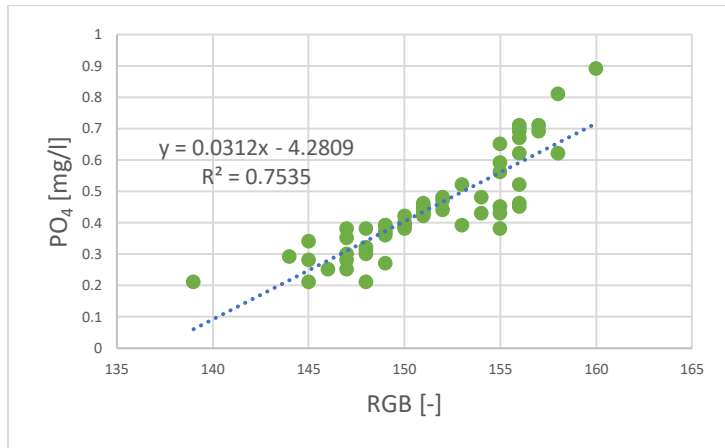
19. ábra: A PO₄ értékek ábrázolása az RGB színtér G sávjának függvényében, mindkét reaktor mért adataival

A kísérleti medence agresszív kezelése azonban nem volt összhangban a 10/2010 (VIII.18) VM rendelettel, a rendelet ugyanis sokkal kevésbé megengedő a PO₄ (illetve a TP) értékekkel, így a rendeletnek megfelelően, de a 3.1. ponttól eltérően hajtottam végre a modell alkotást. Továbbá a rendelet hatálya kiterjedt minden általam mért víztestre, a validáló adatok minden esetben határérték alattiak voltak. Kettéválasztottam az identifikációs értékeket, határérték alatti és határérték feletti halmazokat létrehozva, és ezeket külön identifikáltam, majd külön validáltam. Az határérték alatti halmaz identifikálását, hasonlóan az eddigiekhez, az alábbi lépésekkel hajtottam végre: a kontrol reaktorban mért PO₄ értékeket ábrázoltam az RGB színtér G sáv függvényében (20. ábra), lineáris regressziót alkalmaztam, majd a kapott egyenlettel számított PO₄ értékeket ábrázoltam a mért értékek függvényében (21. ábra). A számított egyenletet az alábbiakban mutatom:

$$PO_4 = 0,0312G - 4,2809$$

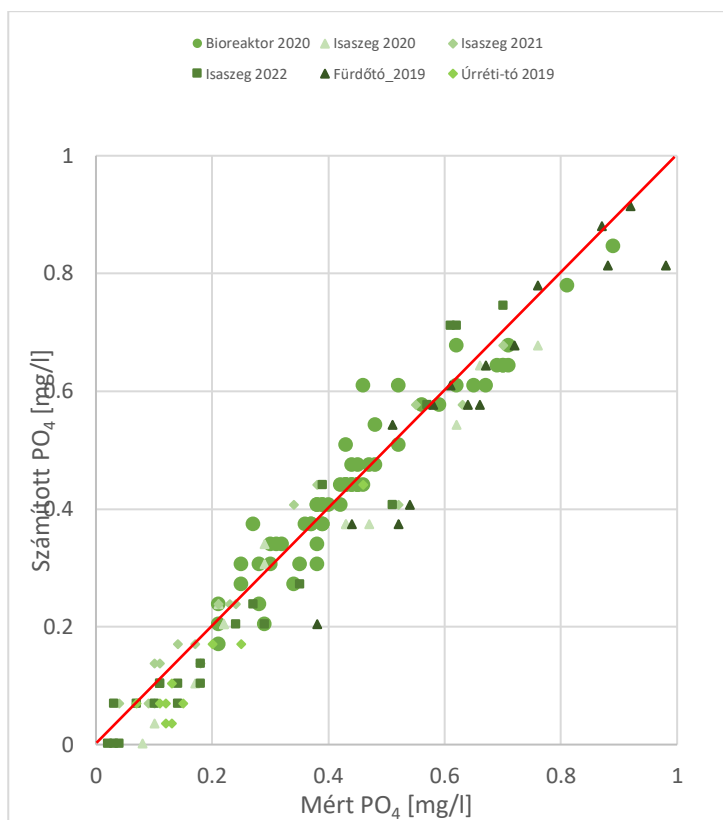
$$R^2 = 0,7535$$

(4)



20. ábra: A kontrol reaktor mért PO₄ értékek ábrázolása a G-sáv függvényében.

Ezután ráillesztettem a mért validáló értékeket, ahol a mért szintér értékekre illeszttem a korábban kapott egyenletet, megkapva ezzel a számított értékeket. A validáló adatokat öt helyszínről gyűjtöttem, így összesen 80 adattal validáltam a 60 tagú identifikált modellemet. A határérték alatti halmazt és validálását az 21. ábrán szemléltetem. Ezután az abszolút hiba abszolútérték keresést, majd méréstartományra vetített relatív hibakeresést hajtottam végre. A PO₄ < 1mg/l tartományban: hc= 4%.



21. ábra: A PO_4 számított értékei ábrázolása a mért PO_4 értékek függvényében, illetve a validációs adatok, 1 mg/l alatti tartományban.

Validálás és hibakeresés után megállapítottam, hogy a modell alkalmas RGB G sáv 138 és 163 ($\bar{x} \pm 2$) értékhatárok között pillanatnyi szín alapján történő PO_4 koncentráció meghatározásra. $G > 163$ ($\bar{x} \pm 2$) értékek esetén a víztest ökológiai állapota nem felel meg a 10/2010 (VIII.18) VM rendeletben meghatározottaknak, így laboratóriumi mérések szükségesek, és az ott mért értékek szerint érdemes az esetleges beavatkozást megkezdeni. A vizsgálat vége 2020 szeptemberében volt, ekkor pilóta nélküli légitáncművel is felvételeztem a területet, a felvételen szabad szemmel is jól látható a különbség; a kísérleti bioreaktor színezete jóval zöldesebb, mint a kontrol bioreaktoré (22. ábra).



22. ábra: A bal oldali kísérleti reaktor vízszínezete jóval zöldesebb (szabad szemmel is láthatóan), mint a jobb oldali referencia reaktor vízszínezete.

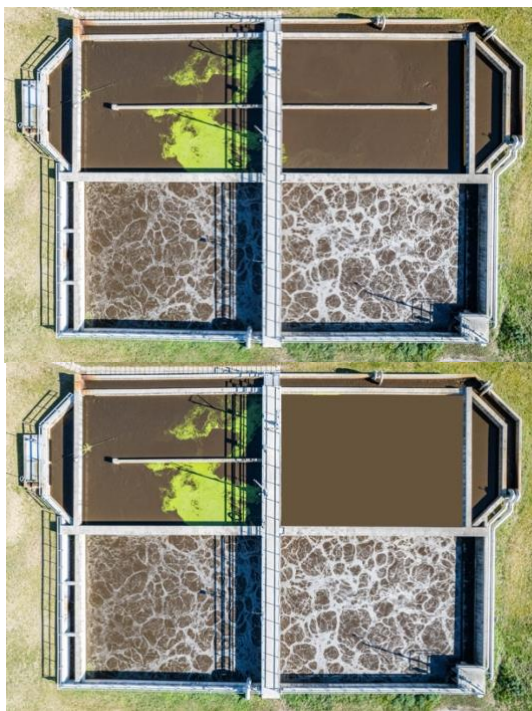
3.3. A szennyvíztelep anoxikus reaktorában lévő szennyvíz színérzékelése távérzékelés segítségével

Ennél a vizsgálatnál nem közvetlen színméréssel, hanem távérzékeléssel határoztam meg vízfelületek színét, és a mért PO_4 eredmények akkreditált laboratóriumból származnak. A vizsgálat 2021. szeptember 22-én indult, és 12 héten keresztül heti 1 alkalommal történt felvétel. Ezen felül 3 extra alkalommal látogattam meg a szennyvíztelepet, így összesen 15 mérés történt a közel háromhónapos mérési intervallumban.

Mivel távérzékelési eljárásról van szó, így a színpontosság kifejezetten fontos szerepet kapott a vizsgálatban, hiszen nem kalibrált színmérővel, hanem digitális CMOS érzékelővel és előtte lévő lencsetagokkal történt a képrögzítés. Az időjárási körülmények okozta természetes területmegvilágítási különbségeket hivatott enyhíteni a fehéregyensúly állítás,

ami egyrésztől színmérés szempontjából bizonytalan, másrésztől kevésbé foglalkozik a levegőben esetleg lebegő, vagy a levegőből esetleg érkező zavaró tényezőkkel (por, pollen stb.). Azért, hogy ezeket a zavaró tényezőket kiküszöböljem – fehéregyensúly állítás helyett – felszíni referencia színméréseket hajtottam végre a kalibrált színmérővel az anoxikus reaktorok szélén, és az ott kapott színátlagot adtam meg minden esetben referencia pontnak, így a színhelyesség a lehető legpontosabb volt.

Ezután levegőbe emelkedtem a pilóta nélküli légi járművel, és az első repülés alkalmával programozott GPS koordinátákra irányítottam a járművet (első alkalommal kézzel komponáltam a lehető legnagyobb fedést, később a légi jármű programozottan pontosan ide repült). A magasság 20 méter volt, a kamera nadír pontban az anoxikus és aerob reaktorok elválasztópontjára lett irányítva. Minden felvételkor 3 kép készült, 30 másodperc különbséggel. A színhelyesség beállítás után a képeken target területként kijelöltem az 23. ábrán látható jobb oldali reaktort, és szoftver segítségével átlagoltam a pixelértékeket, így a reaktorra jellemző színt kaptam. Mivel a reaktor technológiai keverés alatt áll, a tartalma homogénnek tekinthető, így a homogenizált-átlagolt szín jól jellemzi.



23. ábra: A gödöllői szennyvíztelep anoxikus reaktorának fényképe és átlagolt színelemzése.

Az adatok kiértékelése korrelációkereséssel indult, aminek az eredményét, a 3. táblázat foglalja össze. A táblázat jól szemlélteti, hogy az itt szereplő RGB színtér minden sávjánál az eddigi vizsgálatoktól eltérően mindenhol magas korreláció van jelen amikor a mért PO_4 értékek függvényében kerestem az összefüggést. Ahhoz, hogy ezt más aspektusból is megvilágíthassam, színteret váltottam, és CieLAB színkódolásban is korrelációkeresést hajtottam végre. Azért CieLAB színtérben, mert itt az egyik érték (L) az adott szín „világossági” értéke, és a másik két érték pedig egy koordináta rendszerben ábrázolja a kapott színt. Így teljesen más aspektusból közelíti meg ugyanazt a színezetet. A 4. táblázat megmutatja, hogy erős korreláció van a vizsgált terület PO_4 tartalma és a terület színezetének világossága közt.

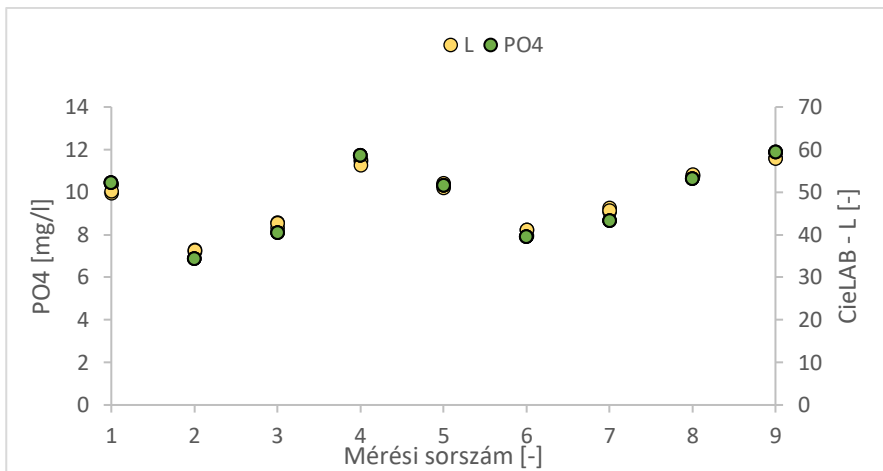
3. táblázat: A mért PO_4 és az RGB színtér korrelációs összefüggései.

	R/ PO_4 korreláció	G/ PO_4 korreláció	B/ PO_4 korreláció
Korrelációs érték	0,66	0,98	0,77

4. táblázat: A mért PO_4 és az CieLAB színtér korrelációs összefüggései.

	L/ PO_4 korreláció	A/ PO_4 korreláció	B/ PO_4 korreláció
Korrelációs érték	0,96	-0,71	0,42

A 4. táblázatra hivatkozva ennél a mérési sorozat további kielemezése a továbbiakban nem RGB színtérben, hanem CieLAB színtérben történt. A világosodásnak valószínűleg a nagyobb tápanyagtartalom miatti nagyobb biológiai aktivitás állhat a háttérben, ami mikrobuborékok, vagy akár habzás formájában is létrejöhet. A buborékok felületén megcsillanó fény a távérzékelést végző szenzorra érkeve világosabb területet hozhat létre (a szenzorra érkező többlet energia miatt), így az érzékelés átlagban világosabb szint mutathat. Az 24. ábra mutatja az PO_4 koncentráció és a CieLAB színtér L sávjának értékeit.



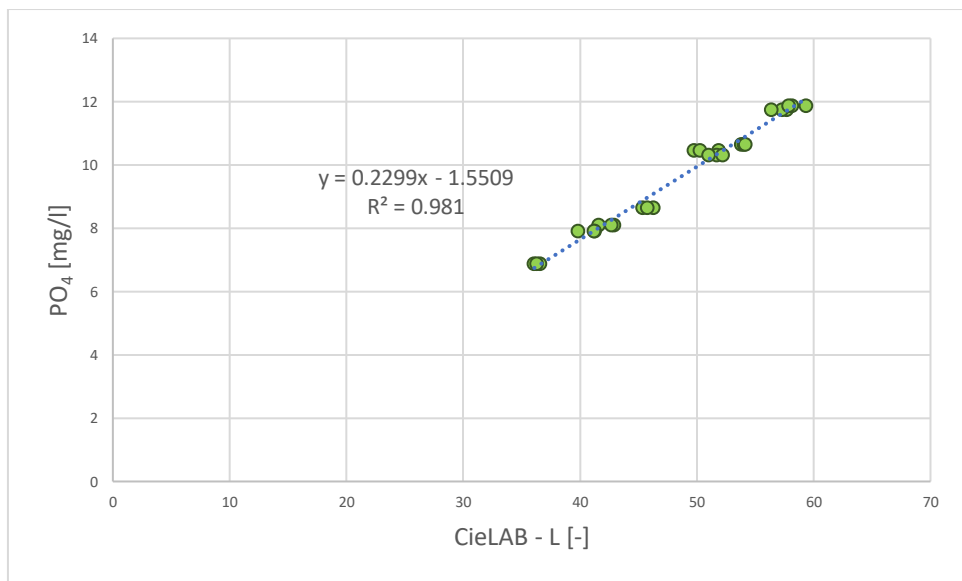
24. ábra: A mérések PO_4 és L értékei.

Az első két hónap méréseivel identifikáltam a modellt. Identifikációhoz először a mért PO_4 értékeket vizsgáltam a CieLAB színtér L sávjának függvényében (25. ábra). Lineáris regressziót alkalmaztam, és az alábbi egyenletet kaptam:

$$PO_4 = 0,2299L - 1,5509$$

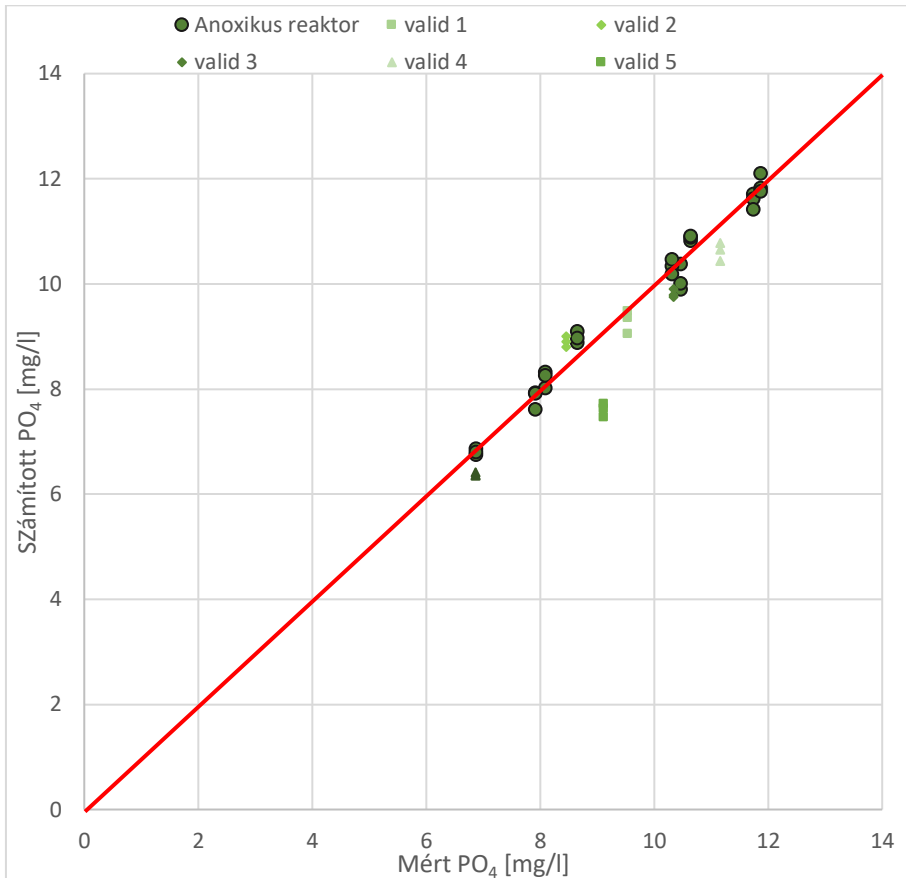
$$R^2 = 0,981$$

(5)



25. ábra: A mért PO_4 értékek ábrázolása a CieLAB színtér L sávjának függvényében.

A kapott egyenletet alkalmaztam a mért L értékekre, így számított PO_4 eredményeket kaptam, amit ábrázoltam a mért PO_4 értékek függvényében, majd ábrázoltam a további mért értékeket validációként, a validálást a további hat méréssel hajtottam végre (ebben a hatban benne van a három nem tervezett mérés is). Ezt az 26. ábrán demonstrálom.



26. ábra: A számított PO_4 értékek ábrázolása a mért PO_4 értékek függvényében, illetve a validáló értékek.

Az további távérzékelési mérések a 2022 februárjában háborúba torkolló, és hazánkat is érintő orosz-ukrán konfliktus okán ellehetetlenültek, a drón felszállások szigorítva voltak stratégiai pontok felett, így a szennyvíztisztítótelepek felett is.

3.4. Pilóta nélküli légitársítók forgószárnyai által keltett hullámok okozta bizonytalanság

Nyilvánvaló jelenség, hogy a pilóta nélküli légitársítókval történő repülés során a légitársítók forgószárnyai által generált légmozgás hatással van jármű alatti területre. Az ilyen eszközökkel történő távérzékelés még mindig terjedőben van, és elsősorban szilárd területek felett történik a felvételezés, például a mezőgazdaságban. Azonban vízfelületek esetén a célterület eltérő módon reagálhat a felette lebegő vagy elhaladó drónokra. Vizsgálatom céljával tűztem ki, hogy definiálható és leírható legyen a C1-es drónkategória által keltett légmozgás vízfelületre gyakorolt hatása.

A vizsgálatot a MATE Környezettudományi Laboratórium egyik, már korábban használt bioreaktorában kezdtem; Ahlborn FVAD 15 típusú szárnykerekű szélesség mérőt telepítettem a bioreaktorba a technológiai vízszint fölé (27. ábra).

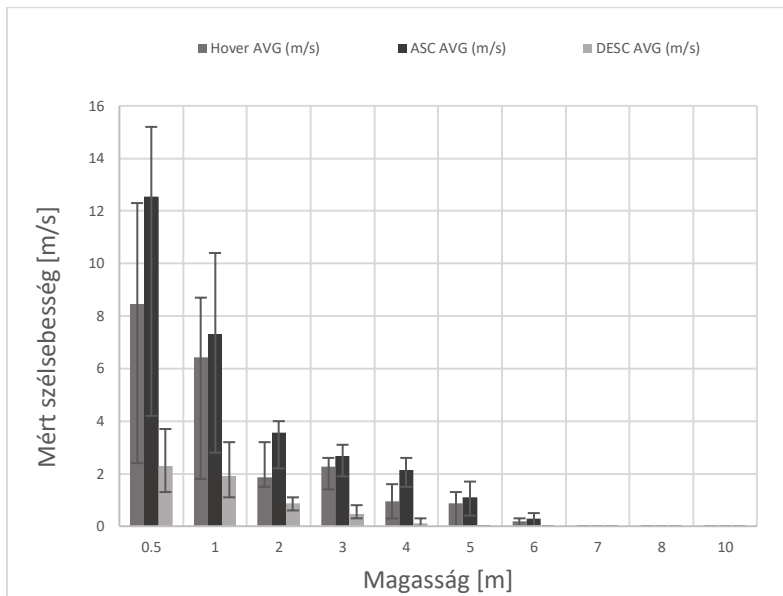


27. ábra: A medencébe helyezett szélességmérő, DJI AIR S2 drón által készített nadír fényképe 2 méter magasságról.

Magasság függvényében mértem a drón által keltett szélsébséget a víztest közvetlen közelében. A manuális irányítás azonban sokszor bizonytalanságot eredményezett, így a programozott röptetést választottam: a drónt beprogramoztam, hogy lebegjen 0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; és 10 méter magasságokban, a magasságváltásokat pedig a lehető legnagyobb sebességgel tegye; így külön mértem a három fő manővert: a lebegést (Hover), az emelkedést (ASC-Ascending) és az ereszkedést (DESC – Descending). A mérési sorozatot ötször ismételt meg DJI Air S2 típusú drónnal, illetve azért, hogy a kategóriáról átfogóbb képet kaphassak további két géptípussal (DJI Mavic Pro, DJI Mini 2) hasonlóan programozott módon megismételtem a mérési sorozatot öt-öt alkalommal, géptípusonként.

A mért eredményeket rögzítettem, és átlagoltam, majd a szórási értékekkel együtt ábrázoltam. Az 38. ábrán jól látható, kivehető, hogy alacsony magasságon a legintenzívebb a légmozgás, illetve a legnagyobb szórás is ebben a tartományban található. Továbbá az **Error! Reference source not found.** azt is demonstrálja, hogy 6 méter magasságban az ereszkedésnek (DESC) már nincs mérhető hatása, és a lebegés vagy az emelkedés is alacsony értékeket mutat, efelett pedig nem volt mérhető hatása semelyik általam röptetett pilóta nélküli C1 kategóriájú légi járműnek. Így a további, forgószárnyak által keltett zavaró hatást kimutató vizsgálataimat 6 méter magasságra maximáltam.

Az esetleges természetes szelet mint bizonytalanságot okozó tényezőt is figyelembe vettem, a kísérleti területtől mindössze három méterre lévő telepített szélsébségmérő adatait vizsgálva kimondható, hogy a mérési sorozatok alatt természetes légmozgás nem volt, vagy elenyésző mértékű (minden esetben 0,2 m/s alatt), így nem befolyásolhatta a mért eredményeket.

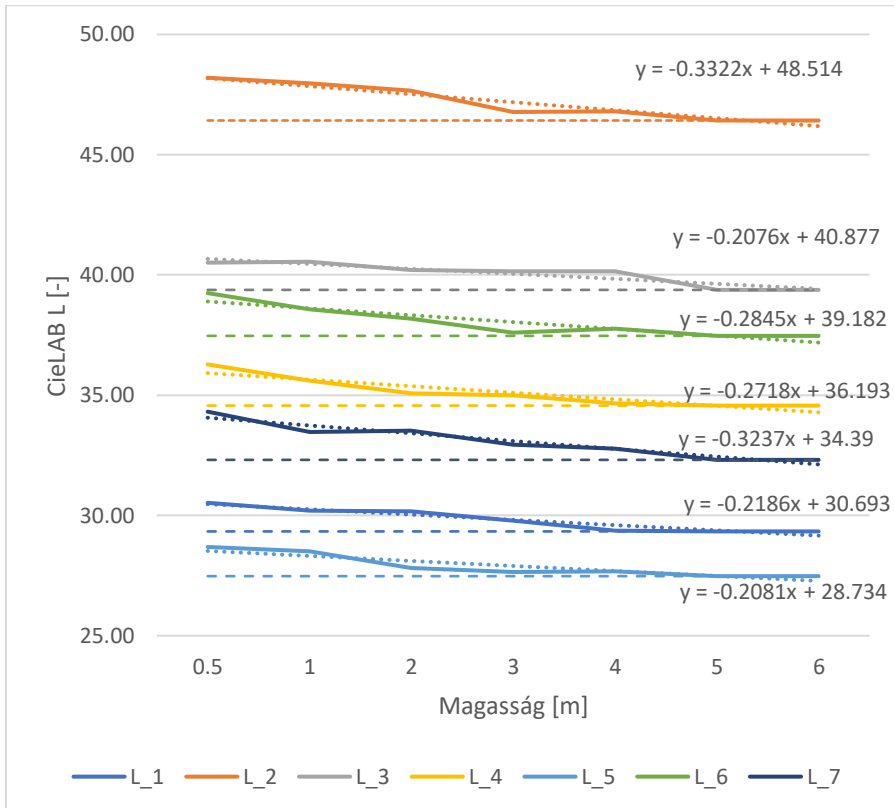


28. ábra: A CI típusú pilóta nélküli légi járművek forgószárnyai által generált légmozgás sebességének bemutatása magasságonként.
 Forrás: saját szerkesztés

A következő vizsgálati sorozatom arra irányult, hogy megismerjem, hogy a pilóta nélküli légi jármű által rögzített képre milyen hatással van a forgószárnyak által keltett légmozgás, amikor vízfelület a célterület. A DJI Air S2 típusú drónommal három helyszínen, összesen hét alkalommal ismételt meg a mérést. A helyszíneken nem szélsősebességet mértem, hanem a már korábban megismert magasságokon (0,5; 1; 2; 3; 4; 5; 6 méter) összesen négy felvételt készítettem a drón alatt lévő vízfelületről, ezeket a képeket színhelyesség igazítás után átlagoltam, és a kapott értékeket egymáshoz hasonlítottam. A forgószárnyak által generált légmozgás a vízfelület hullámozgását, fodrozódását okozza, így a szenzorra beérkező csillanások az átlagban is jelentkeznek. Mivel a csillanások a szenzoron „kiégett” pixelként jelentkeznek, és összességében „világosít” az átlagban, ezért ezen vizsgálat során CieLAB színteret tartottam megfelelőnek. Azért, hogy legyen összehasonlíthatóság a nyugalmi állapothoz, 2 méter, illetve 4 méter

magasságba emeltem a drónt egy létra és egy rúd segítségével forgószárnyindítás nélkül, és felvételeket készítettem a vízfelületről a forgószárnyak behatását elkerülve.

A 29. ábrán fókuszáltan jelenik meg az L-érték ábrázolása a magasságok függvényében; szaggatott vonallal jelöltem a nyugalmi L-értékeket is, illetve a L-érték csökkenést bemutató egyenletek is ábrázolva vannak. A 29. ábrán megállapítható, hogy a magasság növekedésével az L sáv értéke csökken, ugyanakkor az egyenesek meredeksége között nincs számottevő eltérés. Továbbá az is látható, hogy már öt méter magasságban a pilóta nélküli jármű által generált légmozgás nincs kimutatható hatással az alatta lévő vízfelületre.



29. ábra: A CieLAB értékek ábrázolása a magasság függvényében: az L érték csökkenése, a trendvonalak meredekségével ábrázolva, továbbá szaggatott vonallal a nyugalmi helyzetek bemutatása.

Öt méter alatti vízfelület felvételezéskor azonban a forgószárnyak által keltett légmozgás növeli a bizonytalanságot a rögzített képek elemzésekor, ami már 8-bites érzékelő esetén is kimutatható. Ezt kompenzálандó dolgoztam ki egy eljárási sort.

Az első része az eljárásnak, hogy a különböző magasságokban rögzített képek átlagai és a forgószárny behatás nélküli vízfelület rögzített átlagának különbsége magasságonként leírható. Ehhez a röptetés közben mért L értékeket ábrázoltam a nyugalmi L értékek függvényében, magasságonként elválasztva. Lineáris regressziót alkalmaztam, a kapott képletekkel számított L értékeket számoltam, majd végrehajtottam a méréstartományra vetített relatív hibakeresést. Így végeredményben magassági függvényt kaptam, aminek a mérésekkori R^2 értéke minden méréskor 0,98 fölött volt, hibakereséskor sem kaptam 2%-nál nagyobb eltérést ($hsz < 2\%$). Az így létrehozott magassági formulákat a **Error! Reference source not found.** foglalja össze, ahol a nyugalmi értékek L_{ny} a mért értékek pedig L_m jelöléssel vannak feltüntetve.

5. táblázat: Mért értékek korrekciós egyenletei a nyugalmi értékek meghatározására a magasság függvényében.

Magasság [m]	Eltérés egyenlete
0,5	$L_{ny} = 0,9794L_m - 0,7861$
1	$L_{ny} = 0,9564L_m + 0,6189$
2	$L_{ny} = 0,9703L_m + 0,2585$
3	$L_{ny} = 0,9937L_m - 0,1976$
4	$L_{ny} = 0,9801L_m + 0,3901$
5	$L_{ny} = L_m$
6	$L_{ny} = L_m$

A 5. táblázatban látható értékekkel kompenzálva a mért értékeket az CieLAB-L sávon megkapjuk a vízfelület nyugalmi értékét. A 5. táblázatban látható továbbá, hogy öt, illetve hat méter magasságon nincs érzékelhető eltérés, így ezeken a magasságokon nincs szükség kompenzációra.

Az eljárás második része a forgószárnyak által keltett légmozgás okozta hullámozgás véletlenszerűsége miatti szórás okozta bizonytalanság kiküszöbölése. A vizsgálathoz a felvételezést sorozatmódról állítottam, így három másodpercen belül tíz képet készítettem az adott területről. A kapott képeket HDR módban egymásra illesztettem, illetve kipróbáltam többféle blendelést (rétegösszeolvasztást), azonban az összeolvasztási módok csak felerősítették a képek közötti különbségeket, tehát a rétegolvasztás nem a kívánt, hanem annak az ellentétes hatását érte el: a célterület átlagszínezet-értékei egyre messzebb kerültek a nyugalmi helyzet színezetétől.

Növekvő tagú átlagolást használtam a bizonytalanság csökkentésére. A feldolgozott sorozatfelvételek már feldolgozott és átlagolt CieLAB-L értékeit alapul véve, mindig egy taggal bővítettem az átlagolást, és kerestem azt az értéket, amikor egy következő tag bevonása az átlagolásba már nem változtat az átlag kerekített értékén. Összesen 16 sorozatfelvétel készült a MATE Környezettechnológiai laboratóriumában kialakított bioreaktorok fölött. A mérések kielemezésekor a rögzített képek pixelátlagának szórása minden esetben 10% alatti volt (ellenőriztem CieLAB, illetve korábban RGB szintérben is). A 16 sorozat 10 tagból álló fényképeim végrehajtott növekvő tagú átlagolás során megállapítottam, hogy RGB szintér esetén a maximum hat tag után a következő hetedik tag már nem változtat a kapott átlagon, néhány esetben öt tagú átlagolás is elégségesnek bizonyult. Mivel az RGB szintér egész számokkal jellemezhető, ellenőriztem CieLAB szintérben is,

ahol a két tizedesjegyig történő felbontás miatt az átlagolás erősebben szórt, itt a nyolcadik tag után nem történt további változás.

Természetesen ezek az átlagolt értékek még nem a vízfelület valós színértékét fedik le, csak a keltett hullámok változatossága által okozott bizonytalanságot csökkentik. A vízszínezet valós értékét akkor kaptam meg, ha az átlagolással kapott színértéken végrehajtottam azt a magassági formula kompenzálást, amilyen magasságon a sorozatképek készültek. Így a komplex mérési sorozat után megállapítottam, hogy ezzel az eljárással már 8-bites színmélységű rögzítőeszköz esetén is csökkenthető a bizonytalanság, amit a pilóta nélküli légi járművek forgószárnyai által keltett légáramlás okoz.

3.5. A pilóta nélküli légi járművek magasság általi feltételezett színérzékelés torzulásának vizsgálata

A 3.4.-es számú alfejezetben ismertettem a pilóta nélküli légi járművek forgószárnyai által gerjesztett légmozgás okozta bizonytalanságot 10 méter alatti magasságban. Ebben az alfejezetben ismertetem a 10-120 méter között lévő feltételezett torzulás - és az ezáltal okozott mérési bizonytalanság - felismerésére tett méréseimet, és a mérések kiértékelését. A céloom továbbra is vízfelületek vizsgálata volt.

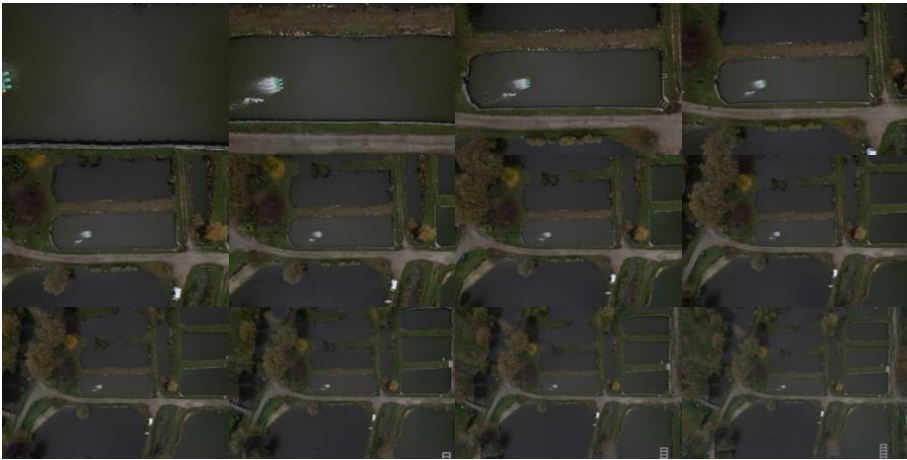
A vizsgálatot az isaszegi 4-es számú nevelőtő fölött hajtottam végre, programozott röptetéssel, hat különböző alkalommal, 12 magasságon (10 m, 20 m, 30 m, 40 m, 50 m, 60 m, 70 m, 80 m, 90 m, 100 m, 110 m, 120 m), ezt a 10 méteres magasságlépcsőt a **Error! Reference source not found.** mutatom be. A programozott röptetést a lehető leggyorsabbra programoztam, így 96-100 másodperc telt el összesen a legalacsonyabb és a legmagasabb

pont felvétele között, így a vízben bekövetkező változások elhanyagolhatóak voltak. A méréseket nadírpont fókusszal hajtottam végre, alkalmanként négyszer ismételt meg.

CieLAB színtérben hajtottam végre a mért adatok kiértékelését, mert a 3.4. alfejezetben leírt mérések során távérzékelésnél 8-bites érzékelő esetén is pontosabb eredményeket kaptam. Továbbá ennél a vizsgálatnál nem a vízszínezet változását kerestem, hanem az érzékelő esetlegesen szükséges kalibrációját a magasság függvényében, így a CieLAB színtér volt a legmegfelelőbb erre a vizsgálatra. A felvételek színpontossága érdekében felszíni mérést végeztem színmérővel a nevelőtó délkeleti sarkán kiépített beton műtárgyról, majd fehéregyensúly beállításához az itt megállapított szint adtam meg referencia értéknek; az esetleges légkörből származó zavaró tényezők (pl. por, pollen) ne befolyásolhassa a mérést.

A felvételek mérési szempontból ideális időszakokban készültek; a felhőtakarás ugyan eltérő volt, de sem csapadék, sem jelentős szél mennyiség volt jelen. A felvételek időpontja délelőtt 10:00 és délután 14:00 óra közt volt esedékes.

A színhelyesség beállítás után a képek kiértékelésekor a target területet körbe jelöltem, majd pixelátlagolást hajtottam végre. A 20 MP nagyságú képek képeknek köszönhetően a 120 méter magasságban rögzített felvételek is elég részletgazdagok voltak, így a kijelölés pontosan történhetett. A pixelátlagolás mint digitális homogenizálás azért volt itt célszerű, mert a tóban korábban telepített keverő rendszer a mai napig üzemel, így a tó vize homogénnek tekinthető.

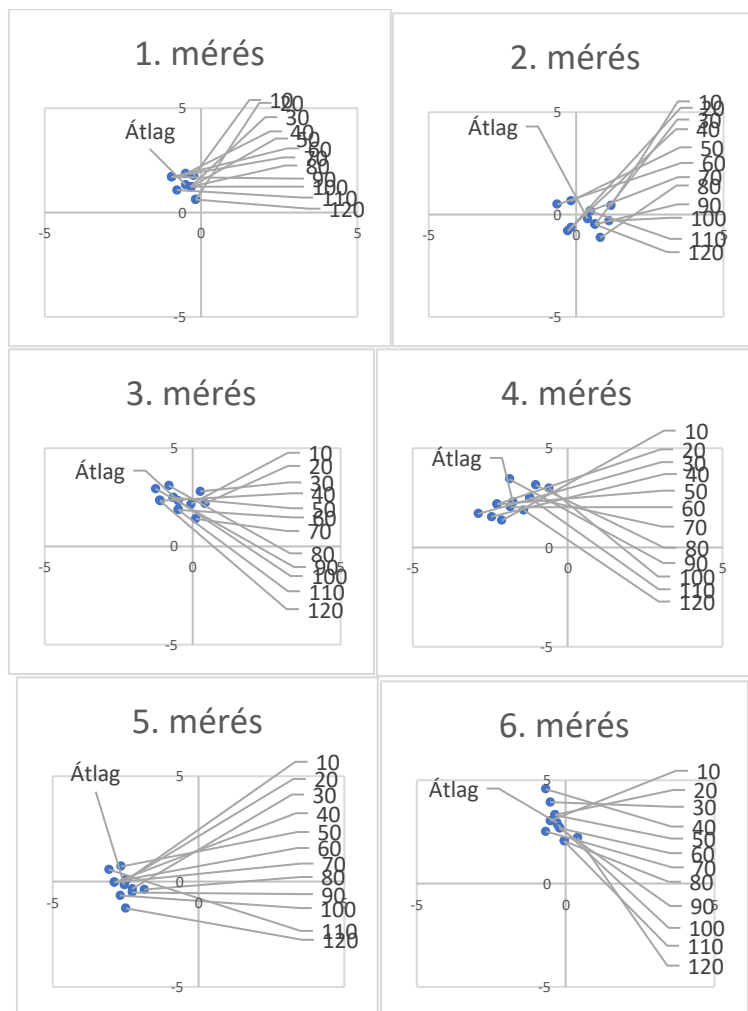


30. ábra: Drónfelvételek a 4. számú nevelőtóról 10-120 m magasságig, 10 méteres emelkedő magasságlépcsővel.

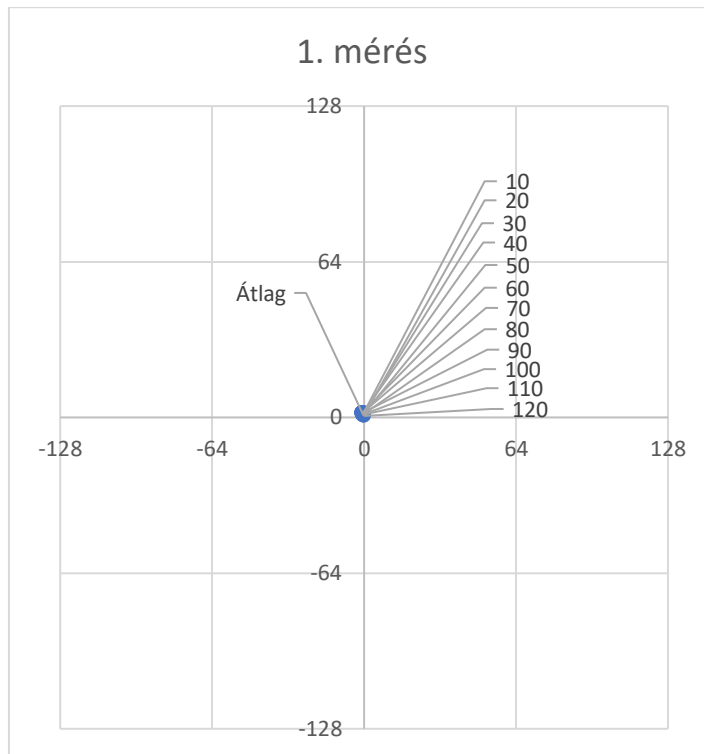
Az átlagok kiértékelését először koordináta rendszerben végeztem, hogy vizuálisan vizsgálhassam a kapott adathalmazt. A kiértékeléskor azonban bizonyosságot nyert az a megállapítás, hogy a magasságbeli különbségek elenyészőek és véletlenszerűek. Így mérésenként az összes magasságon (10 m – 120 m, 30. ábra) mért értéket átlagoltam, és vizsgáltam az eltérést, majd méréstartományra vetített relatív hibakeresést hajtottam végre. A méréstartományra vetített hibakeresés átlaga, minimuma és maximuma az alábbi 6. táblázatban látható. Az eltérések elhanyagolhatósága a koordináta rendszerben ábrázoltak során is bizonyosságot nyert, a 31. ábrán szemléltetem a hat mérés AB ábrázolását, ahol az A értékek az y-tengelyen, a B értékek pedig az x-tengelyen találhatók. Eltérések ugyan láthatók, azonban a skálázást a láthatóság kedvéért -5 és 5 értékek közé állítottam, azonban a 32. ábrán demonstrálom az első mérés értékeit valós (-128 és 128 tartomány) értéktartományban.

6. táblázat: A méréstartományi hibakeresések átlagos, minimum és maximum értékei.

	L	A	B
Minimum	0,2%	0,1%	0,2%
Maximum	0,5%	0,3%	0,3%
Átlag	0,3%	0,2%	0,2%



31. ábra: A hat mérés CielAB – AB értékeinek ábrázolása koordináta rendszerben ($A=Y$, $B=X$), szűkített tartományban.



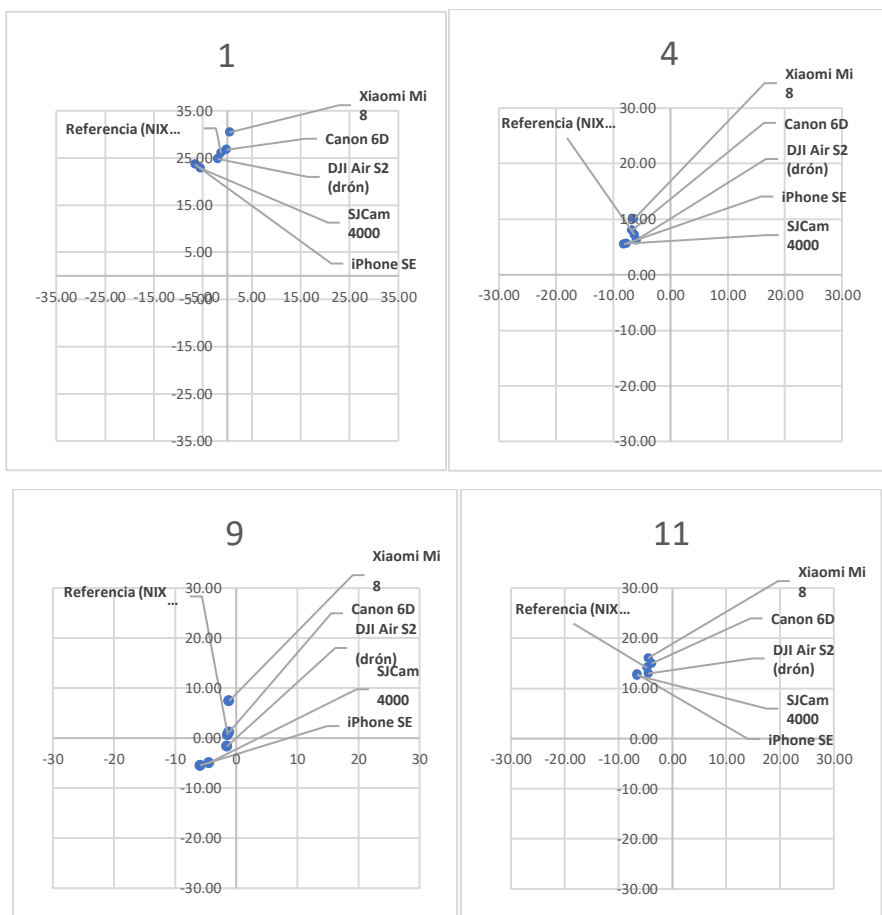
32. ábra: Az első mérés értékei koordináta rendszerben ábrázolva, valós értéktartományban ($A=Y$, $B=X$).

A mérések alapján megállapítható 8-bites érzékelővel ellátott alacsonymagasságú pilóta nélküli légi járművek távérzékelési felvételeinél nincs releváns, illetve matematikailag leírható különbség CieLAB színtérben. Ennek az eredménynek gyakorlati haszna lehet, nyitott vízfelületek felmérésekor egyetlen repülés alkalmával nagyobb területet lehet vizsgálat alá vonni, a vizsgálatra fordított idő így jelentősen csökkenhet, továbbá a pilóta nélküli légi járművekben az akkumulátor cserét és töltést is ritkábban szükséges elvégezni.

3.6. További 8-bites CMOS érzékelőkkel rendelkező képrögzítők vizsgálata és kiértékelése a színhelyesség és színpontosság szempontjából

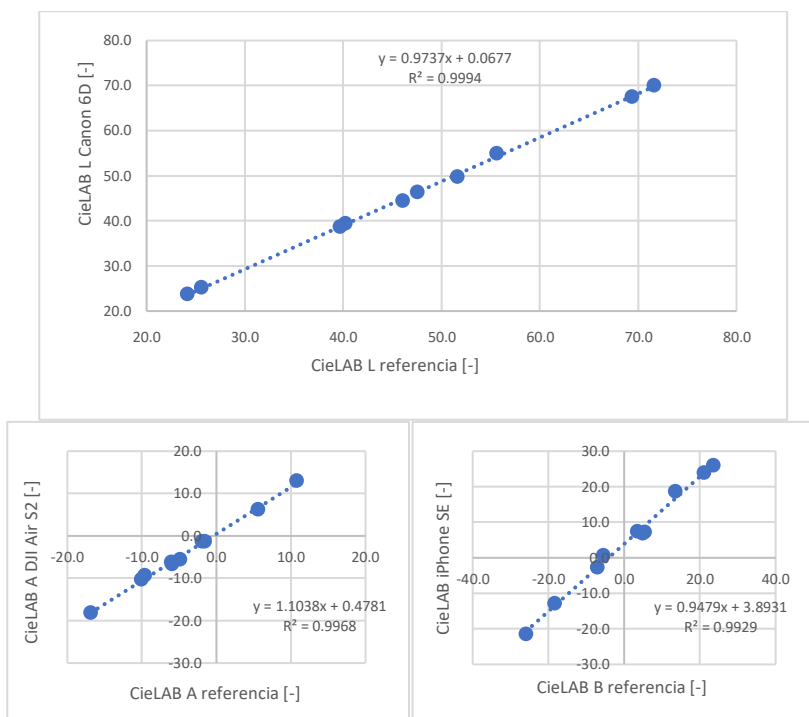
Célkitűzéseim között szerepelt egy alacsony költségvetésű rendszer megalkotása, így több CMOS érzékelővel ellátott eszközt kezdtem vizsgálni, hogy a színérzékeléskori értékek milyen szinten térnek el a kalibrált színmérő által mért értékekhez képest. A színmérést először bevilágított fotóstúdióban, színposztereken végeztem el, később homogén felületeken, majd vízfelületet vizsgáltam öt darab CMOS érzékelővel ellátott, 8-bit színmélységű eszközzel (Canon 6D, iPhone SE, Xiaomi Mi8, SJCam 4000, DJI Air S2). A kamerák látószöge (gyújtótávolsága) 24 és 28 mm közé esett, így a kép komponáláskor kialakult szenzortávolság nem volt elhanyagolható. Összesen 19 mérés történt, minden géptípussal háromszoros ismétléssel. A kiértékelést CieLAB színtérben végeztem, hiszen kalibrációs különbségkeresést hajtottam végre ennél a mérési sorozatnál, és erre a LAB kódolás sokkal kézenfekvőbb, mint az RGB színtér.

A kiértékelést koordináta rendszerben ábrázoltam, hogy vizuálisan is vizsgálhassam az eredményeket. A 33. ábrán mutatom be négy mérés (1,4,9,11) A=Y; B=X ábrázolását, és vizuálisan megerősíthető, hogy van eltérés, illetve az eltérések jellege hasonló minden esetben. Megállapítható továbbá, hogy a NIX Color Pro-val felvett referencia ponthoz a Canon 6D DSLR fényképezőgép és a DJI Air S2 felvételei állnak a legközelebb. Emellett szembeűnő az is, hogy az iPhone SE és az SJCam4000 minden esetben rendkívül közel van egymáshoz; ez kisebb internetes kutatás után értelmet nyert, mivel a két eszközben ugyanaz a típusú és gyártású szenzor került beépítésre, a különbséget a lencsetagok és a képfeldolgozó szoftver okozza.



33. ábra: Az 1-es, a 4-es, a 9-es és a 11-es számú mérések CieLAB – AB ábrázolása ($A=Y$, $B=X$).

Mivel a referenciaponttól való eltérések hasonlóak, ezért a képrögzítővel készített értékeket ábrázoltam a referencia értékek függvényében. Lineáris egyenest illeszttem a kapott pontokra, és egyenlet kiíratást, illetve az illesztés jóségának kiíratását állítottam be. A 34. ábrán szemléltetem a Canon 6D „L” sávját, a DJI Air S2 „A” sávját és az iPhone SE „B” sávját ábrázolom a referencia értékek függvényében. A 16 mérésből 10 mérést használtam azonosításra.

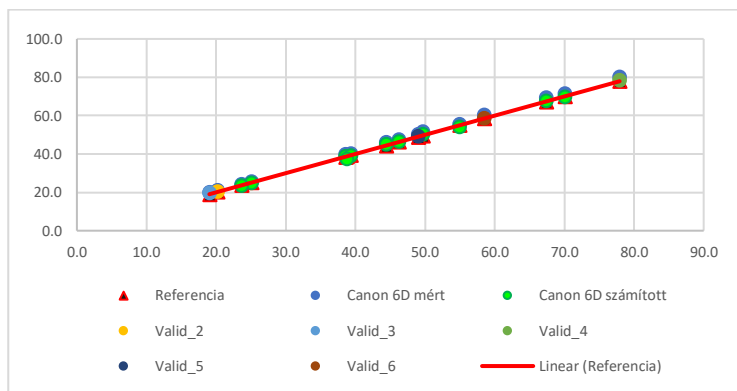


34. ábra: Néhány kiemelt ábra a képrögzítőekkel mért LAB értékek a referencia értékek függvényében.

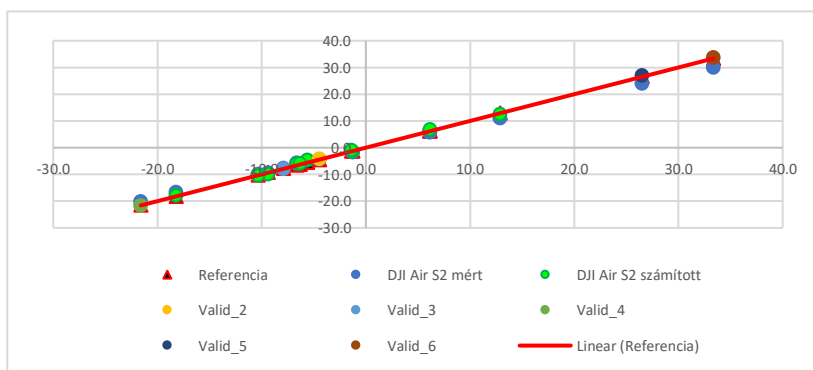
Ezek után a számított egyenlettel a mért értékekből számított értékeket számoltam és ábrázoltam őket egymás függvényében, majd hozzáadtam a validáló értékeket, illetve a valós színmérés (referencia) eredményeit (35. ábra, 36. ábra, 37. ábra). Az eljárással minden géptípusra identifikáltam, majd validáltam az adott egyenletet, amivel kompenzálva alacsonyabb bizonytalanságú, közelítő értéket kaptam a referencia értékhez. Ezeket az egyenleteket, illetve az illesztések jóságát a 7. táblázat szemléltetem, ahol a valós színérték $(L;A;B)_v$ jelölést, a mért szín pedig $(L;A;B)_m$ jelöléssel van ábrázolva. Látható a táblázatban, hogy az illesztés R^2 értéke mindig 0,97 feletti, és a későbbi validálás is alátámasztotta ezt.

7. táblázat: Az eszközökre számított színsávonkénti korrekciós egyenletei, illetve R^2 értéke. (Referencia: NIX Color Pro)

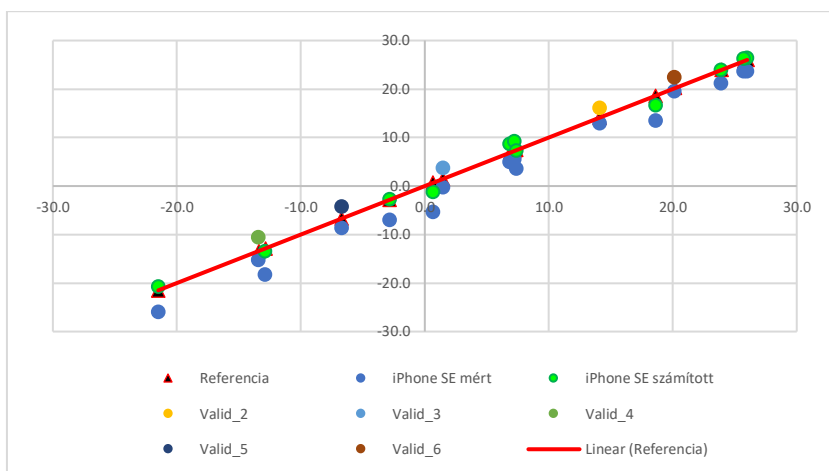
	L	R^2_L	A	R^2_A	B	R^2_B
Referencia	$y = x$	1	$y = x$	1	$y = x$	1
Canon 6D	$L_v = 0,9737L_m + 0,0677$	0,99	$A_v = 1,1170A_m + 0,1375$	0,99	$B_v = 1,0198B_m - 0,6086$	0,99
iPhone SE	$L_v = 0,9744L_m + 0,6319$	0,99	$A_v = 1,1851A_m + 4,1743$	0,97	$B_v = 0,9479B_m + 3,8931$	0,99
Xiaomi Mi 8	$L_v = 0,9765L_m + 0,1353$	0,99	$A_v = 0,9533A_m - 0,7895$	0,98	$B_v = 1,0292B_m - 4,6895$	0,97
SJCam 4000	$L_v = 0,9913L_m + 0,1451$	0,99	$A_v = 1,1386A_m + 2,7396$	0,98	$B_v = 0,9447B_m + 3,8460$	0,98
DJI Air S2	$L_v = 1,0409L_m + 0,189$	0,99	$A_v = 1,1038A_m + 0,4781$	0,99	$B_v = 1,0090B_m + 1,3582$	0,99



35. ábra: A mért CieLAB „L” értékek a számított CieLAB értékek függvényében a Canon 6D géptípus esetében, illetve a validáló értékek.



36. ábra: A mért CieLAB „A” értékek a számított CieLAB értékek függvényében a DJI Air S2 géptípus esetében, illetve a validáló értékek.



37. ábra: A mért CieLAB „B” értékek a számított CieLAB értékek függvényében a DJI Air S2 géptípus esetében, illetve a validáló értékek.

A 35. ábrán, a 36. ábrán és a 37. ábrán látható, hogy a számított kompenzációs értékeket a mért értékekre alkalmazva sokkal erősebb közelítő eredményt értem el. Így a kompenzációs értékekkel kialakítható egy alacsony számítású igényű, posztkalibrációs black box modell, ami már 8-bites érzékenység esetén is alkalmazható CMOS érzékelővel ellátott képrögzítőkre.

4. Következtetések és a javaslatok

Kétségtelen, hogy az in-situ vagy ex-situ színmérési eljárások – pontosságuknál fogva, főleg 8-bites érzékelők esetén – nem helyettesíthetik minden esetben az in-situ vagy ex-situ laboratóriumi méréseket.

Fontos a gyakorlatiasabb és/vagy pontosabb matematikai modellek kidolgozása az össznitrogén vagy foszfátion koncentráció leírására az élővizek jó ökológiai állapotának meghatározása kapcsán.

Az értekezésemben egyrészt összehasonlító vizsgálatot hajtottam végre agresszívan kezelt és kezeletlen bioreaktorokban, és valós élővíznél mért adatokkal validálva alacsony számítási igényű és könnyen használható modellt dolgoztam ki, ami alkalmas lehet víztestek pillanatnyi ökológiai állapotának becslésére.

Továbbá vizsgáltam a pilóta nélküli légi járművekkel történő alacsony magasságú távérzékelés általam feltételezett bizonytalanságot okozó tényezőit a színérés aspektusában 8-bites érzékelők esetében, illetve a 8-bites érzékelővel ellátott eszközök színeltérését vizsgáltam. Mind a két vizsgálatot a lehetőségeimhez mérten a legmagasabb számú eszközök bevonásával végeztem.

4.1. Víztestek össznitrogén koncentrációjának a becslése

A víztestek ex-situ színfelmérése során felfedezett összefüggést a víztest színezete és össznitrogén koncentrációja kapcsán validálással igazoltam, és az értéktartományra vetített relatív hibakeresés is alacsony százalékos hibát

mutatott. Azonban kétségtelen, hogy az általam kidolgozott és az értekezésben bemutatott és alkalmazott modell a jelenlegi állapotában elsősorban becslésre alkalmas, ami iránymutatást adhat például tógazdáknak a víz ökológiai állapotáról abban a minőségben, hogy a víz megfelelő minőségű (alacsony koncentrációval), mérsékelten megfelelő minőségű (határérték környékén lévő koncentrációval), vagy nem megfelelő minőségű (határértéket túllépő koncentrációval).

A modell alkalmazásával a nagyobb biológiai lábnyomot okozó laboratóriumi mérések nem szorulnak háttérbe, alkalmazásuk akkor válik szükségszerűvé, amikor az adott víztest állapotának a becslése is problémát jelez. Ezzel az alacsony számítási igényű, könnyen alkalmazható rendszerrel a vízfenntartás költségei csökkenhetnek, ami nem csak hazánkban és az EU-ban lehet jelentős, de olyan területeken, ahol a vízállapot meghatározás a mérésekhez való hozzáférés hiánya, illetve a tudásbéli különbségek miatt részben vagy egyáltalán nem történik meg, segítséget nyújthat az esetleges vízfelhasználást, és a feltételezett beavatkozást illetően, legyen itt szó tóról, folyóról vagy akár nyitott területen lévő wetland típusú szennyvízkezelésről.

Az eljárás kiterjesztés általi pontosítása azonban mindenképp szükséges a jövőben, hiszen a víz színezetét olyan kémiai komponensek is befolyásolhatják, amik az általam vizsgált bioreaktorokban és a validálásra alkalmazott víztestekben nem voltak jelen, így a víztest jó kémiai állapotát csak részlegesen lehet az eljárás jelenlegi formájával becsülni.

Továbbá érdemes a vizsgálatot nem csak össznitrogén, hanem az ökológiai állapotot meghatározó nitrit, nitrát vegyületekre is külön vizsgálni, ezzel segítséget nyújtva arra a területre, ahol a terhelés feltételezhetően szennyvíztechnológiai eredetű.

Ezen felül a vizsgálatot érdemes kiterjeszteni nem csak ex-situ, hanem in-situ mérésekre, például távérzékelési, alacsony magasságú távérzékelési eljárásokra is, amivel nagyobb kiterjedésű víztestek állapotát lehet egyben, vagy gridhálózat értékeléssel részletekben elemezni.

A képelemzéssel történő vízmonitoring ötlete már a kétezres évek elején felötlött, a NIKON és a SEALIFE közös projektjében, ahol NIKON Coolpix 885 és SeaLife Ecoshot kamerákat használtak, és 2000 felvételes timelapse képsorozat elemzésével figyelték meg a vízminőség változását (Goddijn-Murphy et al., 2009). A rendszer azonban nem volt képes pillanatnyi érték meghatározásra. Tavakoli és Gebbers (2019) nitrogén tartalmat mért RGB elemzéssel, azonban nem vízfelületeken, hanem haszonnövényeken, így a színmérés használása kibővítheti a felhasználhatóságot.

4.2. Víztestek foszfátion koncentrációjának a becslése

A foszfátion az eutrofizáció kulcsvegyülete, így a mérése elkerülhetetlen az adott víztest ökológiai állapotának megismerése érdekében. Az 5.1. fejezetben leírt előnyök és hiányosságok itt is érvényesek; jó közelítéssel lehet becsülni a modellel a megfelelő (határérték alatti koncentráció), a mérsékelten megfelelő (határérték közeli koncentráció), és a nem megfelelő (határérték feletti koncentráció) minősítésben, azonban a modell pontossága nem helyettesítheti az ex-situ laboratórium méréseket, főleg határérték feletti koncentráció esetén.

A modell által létrehozott becslés alkalmas lehet tógazdák számára információ szolgáltatással, és mivel egyszerűen használható, és alacsony számítási igényű a modell, ezért segítséget nyújthat olyan területeken lévő tógazdáknak,

vagy wetland típusú szennyvízkezelőknek, ahol az információ nyeres akadályokba ütközhet nap mint nap.

Ezt a vizsgálatot és modellt is célszerű kiterjeszteni alacsony magasságú távérzékelésre, illetve vizsgálni a vízszínezete és a foszfátion/nitrogénformák egyensúlya közötti összefüggést.

RGB alapú mérést végzett Godjin és White (2006): a Galway-öböl (Írország) vízminőségét elemezte akkori digitális technológiával. Ez a vizsgálat az akkori technológiai határok miatt kevésbé volt sikeres, a jelenlegi elterjedt 8-bites színmélység jóval pontosabb képalkotásra képes, mint az akkori 4-bites színmélységű képalkotás. Továbbá a vizsgálata a sótartalomra és a klorofill-*a* tartalomra fókuszált, nem pedig a mára ismert algásodást kiváltó ökológiai terhelőkre.

4.3. Anoxikus szennyvízreaktorok foszfátion koncentrációjának a becslése

Szennyvíztelepek anoxikus bioreaktorában mért foszfátiontartalom és a víz világosságának (CieLAB szintér, L sáv) az érzékelése erős korrelációban van egymással, a validált modell is erre enged következtetni; az erős korreláció mellett alacsony értékű volt a méréstartományra vetített relatív hibakeresés is.

Az eljárás megoldást nyújthat olyan területeken, ahol szennyvízkezelés ugyan zajlik, azonban hozzáférhetőség miatt nincs lehetőség szondák alkalmazására vagy az alkalmazott szondák helyes üzemeltetésére, karbantartására. Az eljárás természetesen kevésbé pontos, mint egy kalibrált mérőeszközpark, azonban sok esetben egy becselő pontosság is jóval kedvezőbb szennyvízkezelést eredményezhet a jelenlegi, többnyire ad-hoc becslésnél. Ez

esetben természetesen nem a pilóta nélküli légi jármű lenne az ideális megoldás, de egy elérhető árú és legalább 8-bites színmélységű képrögzítő, továbbá alacsony számítási igényű posztkalibrált értékcompenzáció jó közelítést adhat a víz pillanatnyi állapotáról, így a szennyvíztechnológia hangolhatóvá válik.

Ahhoz, hogy az általam alkotott modell alkalmazható legyen, érdemes kiterjeszteni a vizsgált területeket több típusú szennyvízkezelési eljárásra (intenzifikált eleveniszapos rendszerek, wetland, MBBR, FCR), illetve érdemes a mérési tartományt is kibővíteni.

Továbbá, csak feltételezett válaszom van arra vonatkozóan, hogy a magasabb foszfátion tartalom miatt okoz változást a víz világosságában, biológiai- és kémiai oxigénigény vizsgálattal, illetve irányított ex-situ laboratóriumi mérésekkel a változás mértéke alátámasztható lenne.

A szennyvíz színezettségét vizsgálta már Damirchi et al (2019), összehasonlítást végzett a spektrofotométer és a digitális kamera mért eredményei közt, azonban nem ökológiai szennyezőkre, hanem a triaril-metán egyik formájára a „brilliant green” ($C_{27}H_{33}N_2.HO_4S$) festék vegyületre koncentrált. Santiago és Sevilla (2022) a szennyvíz vizsgálatát dimetil-szulfidra (C_2H_6S) folytatta, digitális képrögzítést alkalmazva.

4.4. Pilóta nélküli légi járművek forgószárnyai által keltett légmozgás okozta bizonytalanság becslése

Ebben a mérési sorozatban először azt vizsgáltam, hogy a pilóta nélküli légi járművek forgószárnyai hatással vannak-e az alatta lévő vízfelületre, 8 bites érzékelővel ellátott érzékelés/színmérés esetén, és amennyiben igen, akkor ez

magasságonként milyen mértékű, illetve valamilyen alacsony számítású igényű modellel kompenzálható-e.

A modell használható 6 méter alatti vízfelület mérés kompenzálására, hiszen vizsgálattal kimutattam a zavarás tényét. Ennek a gyakorlati haszna ott kerül előtérbe, ha nehezebben megközelíthető, vagy valamilyen műtárgy által takart vízfelületet szükséges vizsgálni, és nem lehetséges a magasabbról történő mérés.

A modellt három különböző, de ugyanabba a kategóriába tartozó pilótanélküli légitárművel hajtottam végre, így átfogó képet kaptam a behatásról. Azonban javasolt lehet a vizsgálat kiterjesztése, egyrészt több modellre, hogy még pontosabb ismereteink lehessenek a forgó szárnyak által keltett bizonytalanság tényéről. Másrészt a pilóta nélküli légitárművel alkatrészeinek pontos megismerése, a motorok teljesítménye és az általuk létrehozott fordulatszám megismerése további információkkal szolgálhat, ami a drón tömegének ismeretével együtt a modell kiterjeszthetőségének a pontosságát javítaná.

Az ilyen magasságokban történt távérzékelést továbbá érdemes kiterjeszteni és összekapcsolni a 3.1., 3.2. pontban leírt vizsgálatokkal, hogy megfelelő ökológiai felmérést lehessen in-situ módon elvégezni.

A drónpropellerek által keltett feltételezhetően negatív környezeti hatását ugyan többen vizsgálták, azonban a fókusz elsősorban a forgószárnyak okozta zajterhelés, és az ez által okozott megfigyelői hatás növekedése volt. Liu et al (2023) a forgószárnyak aerodinamikai teljesítményét hasonlította össze, McKay et al (2021) pedig az ellentétesen forgó propellerek zajterhelését írta le, azonban légmozgás hatását a környezetre (ezen belül is vízfelületre) eddig még nem került vizsgálat alá.

4.5. Pilóta nélküli légi járművek magasság által feltételezett bizonytalanság becslése

Mérési sorozattal bizonyítottam, hogy pilóta nélküli légi járművek 10-120 méter magasságú röptetés alatt történő képrögzítéskor a színeltérés elhanyagolható, amennyiben felszíni mérések színézetéhez állítjuk a rögzített kép színézetének posztkalibrációját.

Ennek az eredménynek a gyakorlati haszna, hogy például egy tórendszer esetén 120 méteres magasságból kevés kép elkészítése is elegendő, hogy átfogó ismeretekre tegyünk szert a tórendszer pillanatnyi ökológiai állapotát illetően. Kevesebb röptetéssel, kisebb a felmérés biológiai lábnyoma, kevesebb akkumulátortöltést igényel a felmérés, amennyiben a tórendszeren nincsenek nehezen megközelíthető vagy takart részek (ebben az esetben a 3.4.-ben megfogalmazott eljárást és létrehozott modellt célszerű alkalmazni).

Célszerű lenne kiterjeszteni az eljárást több típusú drónra, illetve vizsgálni a programozott röptetés pontosságát, hogy a rögzített képek komponálása mennyire tér el egymástól, és ez mennyire okozhat színeltérést a vizsgált területeket illetően, például egy képfelismerő szoftver esetében.

Érdeemes lenne továbbá a vizsgálatot nagyobb vízterületekre is kiterjeszteni (például Velencei-tó, vagy a Balaton), hogy a természetesen kialakuló hullámváz milyen szinten befolyásolja a színérzékelést, hasonlóan ahogy a 3.4.-ben leírt kompenzáció szükségességét részleteztem. Természetesen a pilóta nélküli légi járművek röptetési biztonsága típusonként eltérhet, a szélesség függvényében. Ezek mellett érdemes lenne összehasonlító vizsgálatot folytatni polárszűrők felhasználhatóságával kapcsolatban, illetve

érdemes lenne a nadírpont vizsgálat mellett egyéb betekintési szöveget is vizsgálni.

Felszíni referencia színmérések alkalmazásával ki tudtam küszöbölni Schamberger et al., (2022) vagy Wang et al., (2017) állításait, miszerint a por, vagy a légköri aeroszokok befolyásolhatják a mérést, így az ő általuk létrehozott megfigyelési rendszer bizonytalansága tovább csökkenthető az általam leírt eljárással.

Felszíni referencia színmérések alkalmazásával csökkenteni tudtam a por, vagy a légköri aeroszokok hatását a távérzékelésre, így Schamberger et al., (2022) vagy Wang et al., (2017) méréseben történő bizonytalanság tovább csökkenthető az általam leírt eljárással.

4.6. További 8 bites CMOS érzékelővel ellátott képrögzítő eszközök vizsgálata, színmérés lehetőségének vizsgálata

A digitális képrögzítés színpontossága képrögzítő eszközönként változhat, ezt a lehetőségeimhez mérten magas számú és széles technológiai spektrumú eszközök mérésével és vizsgálatával bizonyítottam, továbbá black box modellt hoztam létre a különbségek kompenzálása érdekében; a színeltérés nemcsak a szenzor felépítésétől, hanem a fényt formáló lencsetagoktól és a kapott információt feldolgozó szoftvertől is függ, amik gyakran nem ismeretesek, hiszen nem minden esetben a pontosságra, hanem a felhasználói élmény növelésére kalibrálják.

Az elérhető eszközökkel történő megfigyelés több területen is jelen van, Aburghin et al (2022) például orvostudományi célokra alkalmazza az

okoseszközökkel történő megfigyelést, Chianucci et al (2021) lombkorona vizsgálatot hajtott végre, Tũaño et al (2021) hántolt rizs látszólagos amilóz-tartalmának elemzését hajtotta végre, azonban összehasonlító vizsgálat a rögzítőeszközök eltérését illetően nem történt. Az általam leírt black box modellezési eljárás kiterjesztése pontosabbá tehetik ezeket a méréseket is, hiszen a digitális rögzítők monitoring alkalmazásának igénye évről évre növekszik.

Vízmonitoring szempontból a vizsgálat gyakorlati haszna összekapcsolható az összes korábbi méréseim eredményével. A víz távérzékeléssel történő, színapalapú ökológiai állapot felmérésekor (3.1., 3.2.), szennyvíztelepek bármely reaktorának monitorozásakor (3.3.), vagy a pilóta nélküli légi járművek használatakor (3.4., 3.5.) bizonytalan színeredményt kaphatunk, a modell alkalmazásával azonban csökkenteni lehet a bizonytalanságot a felvételezett területet illetően.

A vizsgálatot azonban szükséges lehet kiterjeszteni az adott eszközökre, hogy pontos posztkalibrációs értékeket lehessen alkalmazni színfelméréskor. Ennek a felmérése bár nem költséges, de a hozzáférhetőség, illetve az esetleges hajlandóság már erősen szubjektív lehet. Továbbá nincs jelenleg ismeretünk arra vonatkozóan, hogy a használat során létrejövő fizikai behatások (lencsék karcosodása, érzékelő esetleges oxidálódása stb.) milyen mértékű hatással lehet a felvétel színezetére, így a posztkalibrációs felmérést érdemes lehet időről-időre elvégezni.

5. Új tudományos eredmények

1. Megállapítom, hogy élővíztestek TN (össznitrogén) tartalma erős korrelációban van – $corr(TN, RGB_B) = 0,87$ – az RGB színtér B, azaz kék sávjával, TN: 0-10 mg/l intervallumon belül, 10-22 Celsius fokos hőmérsékleti tartományban, amely leírható az alábbi egyenlettel:

$$TN = 0,2823B - 38,794 \quad (R^2 = 0,8755),$$

(6)

ahol:

- TN – az össznitrogén koncentráció,
- B – az RGB színtér kék sávja

Az eljárás képes egy költséghatékony határérték alapú minősítésre, az ökológiai állapot előrejelzésére, a beavatkozás szükségességének megállapítására, riasztásra.

2. Megállapítom, hogy élővíztestek PO₄ tartalma erős korrelációban – $corr(PO_4, RGB_G) = 0,86$ – van az RGB színtér G, azaz zöld sávjával, PO₄: < 1 mg/l esetén, 10-22 Celsius fokos hőmérsékleti tartományban, amely leírható az alábbi egyenlettel:

$$PO_4 = 0,0312G - 4,2809 \quad (R^2 = 0,7535),$$

(7)

ahol:

- PO₄ – a foszfátion koncentráció,
- G – az RGB színtér zöld sávja

3. Megállapítom, hogy anoxikus szennyvízreaktorok PO₄ tartalma erős korrelációban - $corr(PO_4, CieLAB_L)=0,96$ - van a CieLAB szintér L, azaz világossági sávjával, PO₄: 6,86-11,87mg/l intervallumon belül, 12-18 Celsius fokos hőmérsékleti tartományban, amely leírható az alábbi egyenlettel:

$$PO_4 = 0,2154L - 0,6767 \quad (R^2 = 0,9215), \quad (8)$$

- PO₄ – a foszfátion koncentráció,
- L – az CieLAB szintér világossági értéke

4. Komplex kísérleti eljárással igazoltam, hogy a C1 típusú pilóta nélküli légi járművek forgószárnyai által keltett légmozgásnak kizárólag 6 méter repülési magasság alatt van hatása a vízfelületre, ami befolyással van a képalkotás eredményére és sávonkénti 8-bites érzékelő esetén is jelentősen növeli a bizonytalanságot. Megállapítom, hogy RGB szintér esetén ez a bizonytalanság csökkenthető több, maximum hat darab, három másodpercen belül rögzített kép pixelátlagának tovább átlagolásával.

5. Kísérleti eljárással igazoltam, hogy felszínen végzett referencia méréssel korrigált színegyensúly alkalmazásával, 10 és 120 méter közötti alacsony magasságú távérzékeléssel, sávonkénti 8-bit színmélységű CMOS szenzorral rögzített nadír felvételek során a víz borítású célterület érzékelt színezetében maximum 1% eltérés tapasztalható.

A felszínen végzett referenciamérés a légköri összetétel képalkotás szempontjából zavaró hatását kiküszöböli. A kísérlet végrehajtása során a

felszíni referencia mérést kalibrált színmérővel végeztem, továbbá a távérzékelés C1 típusú pilóta nélküli léghajmúval történt.

6. Komplex vizsgálatokkal igazoltam, hogy a digitális CMOS típusú, sávonkénti 8-bites érzékenyséű szenzorral ellátott képrögzítő eszközök képfeldolgozó eljárása során a színhelyesség eltérhet. Színmérő eszközt alkalmazva a valós és a mért színsávok közötti eltérést leírtam és korrekciós modelleket alkottam. A korrekciós modell egyenes egyenletével írható le, ahol a meredekség és a tengelymetszet géptípusfüggő.

Ezzel a posztkalibrációs eljárással, a vízminőség meghatározásra létrehozott eljárásom kiterjeszhető további digitális CMOS típusú, sávonkénti 8-bites színmélyséű szenzorral ellátott képrögzítő eszközökre.

	L	R²_L	A	R²_A	B	R²_B
Referencia	$y = x$	1	$y = x$	1	$y = x$	1
Canon 6D	L_v $= 0,9737L_m + 0,0677$	0,9 9	A_v $= 1,1170A_m + 0,1375$	0,9 9	B_v $= 1,0198B_m - 0,6086$	0,9 9
iPhone SE	L_v $= 0,9744L_m + 0,6319$	0,9 9	A_v $= 1,1851A_m + 4,1743$	0,9 7	B_v $= 0,9479B_m + 3,8931$	0,9 9
Xiaomi Mi 8	L_v $= 0,9765L_m + 0,1353$	0,9 9	A_v $= 0,9533A_m - 0,7895$	0,9 8	B_v $= 1,0292B_m - 4,6895$	0,9 7
SJCam 4000	L_v $= 0,9913L_m + 0,1451$	0,9 9	A_v $= 1,1386A_m + 2,7396$	0,9 8	B_v $= 0,9447B_m + 3,8460$	0,9 8
DJI Air S2	L_v $= 1,0409L_m + 0,189$	0,9 9	A_v $= 1,1038A_m + 0,4781$	0,9 9	B_v $= 1,0090B_m + 1,3582$	0,9 9

6. Értekezéshez kapcsolódó kiemelt publikációk

MTMT: <https://m2.mtmt.hu/api/author/10064810>

Lektorált cikk idegen nyelven:

Házi, J. ; Pensza, K. ; Barczy, A. ✉ ; Szentes, S. ; Pápay, G - Effects of Long-Term Mowing on Biomass Composition in Pannonian Dry Grasslands, AGRONOMY (BASEL) 12 : 5 Paper: 1107 (2022) - Q1; IF: 3,949

András Barczy, Gábor Géczi - Phosphorus contamination tracking via colour analyzation on algae in experimental reactors, ENVIRONMENTAL MONITORING AND ASSESSMENT - Under review - Q2; IF 3,307

Barczy, András ; Szabó, Dorottya ; Magyarai, Péter ; Géczi, Gábor; Colour analysing of IPA brewing phases, including daily measuring of the fermentation process, SCIENCE TECHNOLOGY AND INNOVATION 15 : 1 , 7 p. (2022)

András, Barczy ; Gábor, Géczi - Harvesting during the process; agriculture in developed wastewater treatment plants, HUNGARIAN AGRICULTURAL RESEARCH: ENVIRONMENTAL MANAGEMENT LAND USE BIODIVERSITY 27 : 4 pp. 8-10. , 3 p. (2018)

András, Barczy - Examination of propeller gained distracting air motion in the case of remote sensing lakes and fishing ponds with C1 type UAVs, HUNGARIAN AGRICULTURAL RESEARCH

Lektorált cikk magyar nyelven:

Barczy, A.; Major, N. - Fényszennyezési esemény vizsgálata Budapest XIII. kerületében JOURNAL OF CENTRAL EUROPEAN GREEN INNOVATION 10 : (1) pp. 99-110., 12 p. (2022)

Idegennyelvű konferenciakiadvány:

Barczy, A ; Géczi, Gábor - Forwarding the wastewater treatment - treatment and the society, In: Farkas, István (szerk.) 23rd workshop on energy and environment: Book of abstracts, Gödöllő, Magyarország : Szent István University (2017) 32 p. pp. 21-21. , 1 p.

In: Anna, Pasternakiewicz; Michal, Milek (szerk.) Risk Factors of Food Chain: XXIst International Conference: Book of abstract, Iwonicz, Lengyelország : Uniwersytet Rzeszowski (2021) p. 12 , 1 p.

Barczy, András ; Géczi, Gábor - Előretételezés a szennyvíztisztításban - Kezelés és társadalom, In: Lázár, István (szerk.) Környezet és energia : Hatékony termelés, tudatos felhasználás, Debrecen, Magyarország : MTA DAB Földtudományi Szakbizottság (2018) 281 p. pp. 253-256. , 4 p.

Barczy, A. ; Géczi, G. - Wastewater and harvesting: Agriculture in developed wastewater treatment plants, In: Géczi, Gábor; Korzenszky, Péter (szerk.) Researched Risk Factors of Food Chain, Gödöllő, Magyarország : Szent István Egyetemi Kiadó (2018) pp. 77-82. , 6 p.

Barczy, A. ; Géczi, G. - Wastewater and harvesting: agriculture in developed wastewater treatment plants, In: Víg, Piroška; Máthé, László (szerk.) XIX. International Conference Risk Factors of Food Chain 2018 : Book of Abstracts, Gödöllő, Magyarország : Szent István Egyetem Egyetemi Kiadó (2018) p. 15

A., Barczy ; J., Patko ; V., Nagy ; A., Barczy - Color-measurement differences during the drying of soil layers, In: Magó, László; Kurják, Zoltán (szerk.) SYNERGY - Engineering, Agriculture and Green Industry Innovation : ABSTRACTS., Gödöllő, Magyarország : Szent István Egyetem Gépészmérnöki Kar (2019) 96 p. pp. 34-34. , 1 p.

Barczy, A. ; Géczi, G - Wastewater as potential renewable energy source, In: Gábor, Géczi; Richárd, Kicsiny; László, Székely Efficiency, solar and thermal energy for the human comfort : Book of Abstracts, Gödöllő, Magyarország : Hungarian University of Agriculture and Life Science (2021) 47 p. pp. 45-46. , 2 p.