

Debreceni Egyetem

Műszaki Kar

Környezetmérnöki Tanszék



Kezelt fürdővíz alapú hidropóniás rendszerben termesztett növények fogyaszthatóságának vizsgálata

Készítette: **Pál Krisztina**

**IV. éves környezetmérnöki BSc
szakos hallgató**

Belső konzulensek: Dr. Bodnár Ildikó, főiskolai tanár;
Izbékiné Szabolcsik Andrea, tanársegéd

Tanszékvezető: Dr. Kocsis Dénes László, egyetemi docens

Debrecen
2022.

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés, célkitűzések	4
2.	Szakirodalmi áttekintés.....	6
2.1.	Hasznosítható szennyvíz: szürkevíz	6
2.2.	Vízanalízis során vizsgált paraméterek.....	7
2.3.	Hidrokulturás növénytermesztés.....	7
2.3.1.	Vízkulturás növénytermesztés történelme.....	7
2.3.2.	Talaj nélküli termesztés változatai	8
2.3.3.	Támasztóközeg szerinti csoportosítás	8
2.3.4.	Előnyök és hátrányok	9
2.4.	Termelt növényanalízis, fogyaszthatósági vizsgálat.....	10
2.4.1.	Fogyaszthatóság vizsgálata.....	10
3.	Anyag és módszer.....	13
3.1.	Öntözővizek létrehozása	13
3.2.	Öntözővizek minősítése	14
3.2.1.	pH mérés.....	14
3.2.2.	Fajlagos elektromos vezetőképesség és zéta-potenciál mérése.....	15
3.2.3.	Zavarosság mérése.....	15
3.2.4.	Biológiai oxigénigény mérés	16
3.2.5.	Összes szerves széntartalom (TOC)	17
3.2.6.	ANA-detergens tartalom vizsgálata.....	17
3.2.7.	Elemanalitikai vizsgálatok.....	19
3.3.	Hidropóniás növénytermesztés	20
3.3.1.	Növények előnevelése	20
3.3.2.	A hidropóniás torony felépítése.....	21
3.3.3.	Növények minősítése.....	23
4.	Eredmények és kiértékelésük	24

4.1.	A toronyba kerülő vizek paramétereinek vizsgálata.....	24
4.2.	Kezelési eljárás hatékonyságának vizsgálata.....	25
4.3.	A hidropóniás toronyba bemenő és kijövő vizek elemzése.....	26
4.4.	Termesztett növények elemzése	27
4.4.1.	Maximális gyökérhossz vizsgálata	28
4.4.2.	Maximális levélhossz vizsgálata	29
4.4.3.	Produktum tömeg vizsgálata	30
4.4.4.	Nedvességtartalom vizsgálata	31
4.4.5.	Fogyaszthatóság vizsgálata.....	32
5.	Következtetések, javaslatok.....	36
6.	Összefoglalás.....	38
7.	Köszönetnyilvánítás	40
8.	Irodalomjegyzék	41
9.	Ábrajegyzék.....	43
10.	Diagramjegyzék.....	43
11.	Számítási egyenlet jegyzék.....	43
12.	Táblázatok jegyzéke	44

1. Bevezetés, célkitűzések

Korábbi kutatómunkám során szintetikus úton előállított, hagyományos és ún. biodetergenseket tartalmazó fürdővizek kezelési módszerének fejlesztésével foglalkoztam, majd a kezeletlen és a kezelt vízzel is ún. víztoxikológiai vizsgálatok végeztem. A víztoxikológiai vizsgálatok jól igazolták, hogy a fürdővizeket kezelni szükséges öntözővízként történő újrahasználatuk előtt. Jelen kutatás kiemelt célja ún. **hidropóniás rendszerben történő növénytermesztés** megvalósítása volt, azaz a kezelt szürkevíz öntözővízként történő alkalmazhatóságának vizsgálata.

Hazánk mondhatni víznagyhatalomnak számít, ennek ellenére a víztakarékosság kérdésével nekünk is fontos foglalkoznunk. Ennek jó példája az elmúlt években számos településen a nyári időszakban elrendelt vízkorlátozás is. Ugyan a Föld felszínének jelentős részét, azaz 71%-át víz borítja, mégis az emberi fogyasztásra alkalmas és elérhető édesvíz ennek csak töredék része (0,009%). A fejlődő technológiáknak köszönhetően már számos módszer létezik például a tengervizek sótalánítására (lásd. fordított ozmózis), azonban ezek a technológiák a fejlődő országoknak szinte megfizethetetlenek. Ennek okán olyan hatékony megoldások fejlesztése szükséges, amelyek mindenki számára elérhetőek. A jelentősen növekvő tendenciát mutató vízhiány hatására kiemelt figyelmet kell szentelnünk a fenntarthatóságra.

A fenntartható életmód témaköre nem újdonság az emberiség számára, mégis kialakítása nem akadálymentes. Ennek a fontos tevékenység segítésére hozta létre az ENSZ a Millenniumi Fejlesztési Célokat az ezredfordulón [1]. A kezdeti célok legfőképpen a fejlődő országok szociális-, és társadalmi problémáinak megoldására irányultak, azonban 2015-ben az Agenda határozattal 17 kiemelt fenntartható fejlődési célra bővült a lista. Az új fenntartható fejlődési célok (Sustainable Development Goals – SDGs) a társadalmi problémákon túl már a környezeti, globális problémákra is kiterjedtek. A kutatási témámhoz kapcsolódóan alaposabban vizsgáltam ezeket a fenntarthatóági célokat, kiemelt figyelmet szentelve a felelős fogyasztás és termelés, illetve a tisztavíz és alapvető köztisztaság témakörére. Egyértelműen az ivóvízhiány fenntartható megoldását jelentheti a használt vizek szabályozott újrahasználata.

Az elmúlt évek kutatásainak eredményeként sikerült kifejleszteni egy jól reprodukálható és megfelelő hatékonysággal bíró kezelési módszert szintetikus fürdővizekre. Ennek továbbfejlesztésére a következő lépést az újrahasznosítási kísérletek jelentették.

Újrahasználati célként hidropóniában történő növénytermesztést vizsgáltam, melyhez öntözővízként kezelt szintetikus fürdővizet és kontrollként ivóvizet alkalmaztam. Jelen kutatási fázis fő témaköre a növénytermesztésen és analízisen túl a termesztett növények fogyaszthatóságának vizsgálata volt a nehézfém tartalom függvényében.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. Hasznosítható szennyvíz: szürkevíz

A szennyvizeket két nagyobb frakcióra bonthatjuk: a fekete vizekre, amelyek a WC-k öblítése során keletkeznek, ennek révén komoly egészségügyi kockázattal járó szennyeződések tartalmazznak; továbbá az ún. szürkevizekre (greywater, GW), amelyek a hétköznapijaink során, otthonainkban és szociális intézményeinkben (például kórházak, kollégiumok, oktatási intézmények) keletkeznek. A szürkevizek további frakciókra bonthatók, szennyezettségi szintjük alapján: ún. „light” (LGW) és „dark” (DGW) frakciókra. A DGW a mosás és konyhai mosogatás során keletkezik, összetételét illetően jelentős mennyiségű detergenst (mosó-és mosogatószerek fő összetevője), zsírt, olajokat és egyéb anyagokat (ételmaradék, elhalt hámsejt) tartalmaz. A kevésbé terhelt LGW frakciót a fürdővizek és kézmosásból eredő szennyvizek alkotják. Ugyan a fürdővíz frakció is tartalmaz kisebb mennyiségben detergenset, tisztításuk ebből kifolyólag mégis egyszerűbb. A szürkevizek tisztítása hasonló módszerekkel történik, mint a szennyvíztisztító telepeken zajló szennyvíztisztítás. Legegyszerűbb eljárási formákként alkalmazzák a mechanikai szűrést, amellyel a fürdővízben található lebegő anyagok eltávolíthatók [2].

Amennyiben az eljárás nem elég hatékony, a folyamatot általában koagulációval és/vagy oxidatív kezeléssel egészítik ki [3].

A tisztítást követően a szürkevizeket olyan tevékenységekre alkalmazhatjuk, amelyek ***nem igénylik az ivóvíz minőségű víz alkalmazását***. Ilyen tevékenységek közé sorolható a WC-öblítés, öntözés, autómosás és a tűzoltás [4].

Az Európai Unió (EU) 2020/741 új irányelve a visszanyert vizek újrahasználatát szabályozza, ez adja meg az újrahasználat minimum követelményeit, melyet a tagállamoknak 2023. június 26-tól kell alkalmazni. A szabályozás az általam vizsgált paraméterek közül pl. a biológiai oxigénigényre terjed ki, melynek 25 mg/l határérték alatt kell lennie [5], [6].

Korábban az amerikai Környezetvédelmi Ügynökség (USEPA) és a WHO ajánlásai két kiemelt paraméterre adtak ajánlást:

- zavarosság, amely nem haladhatja meg átlagban a 2 NTU értéket, és maximum 5 NTU lehet [7],
- és a biológiai oxigénigényre (BOI₅), amely paraméternek 10 mg/l alatt kell lennie [8]. Vizsgálataimban elsősorban ezen szabályozások részleteit alkalmaztam.

2.2. Vízanalízis során vizsgált paraméterek

A hidropóniás növénytermesztés egyik fő tényezője az öntözővíz. Mindazonáltal, hogy a növény gyökérzete csak a vízzel érintkezik, így a pufferáló képesség csökken a talajon történő termesztéshez képest. Amennyiben valamilyen eltérés jelenik meg a hidropóniában - ebből kifolyólag - az gyors beavatkozást igényel, azaz a termesztés időszakát folyamatos kontrolling övezi. Adott időközönként teljes vízminősítés, illetve ritkábban csak részleges vizsgálat szükséges.

A vízminőségi paraméterek között a következőket szükséges vizsgálni:

- kémhatás (pH),
- zéta-potenciál,
- fajlagos elektromos vezetőképesség,
- zavarosság,
- biológiai oxigénigény (BOI₅),
- összes szerves széntartalom (TOC)
- ANA-detergens tartalom
- elemtartalom (mikro- és makroelemek koncentrációja).

2.3. Hidrokultúrák növénytermesztés

A Föld eltartó képessége fordított arányban csökken a népesség növekedésével. Mindemelett termőtalajaink számos része szennyezett, ebből adódóan funkciójukat veszíthetik, mivel a talajban akkumulálódott szennyeződés a növényeken keresztül a tápláléklánc mentén az emberi szervezetbe juthat, ezzel súlyos megbetegedéseket okozva. Ezek a megbetegedések nem minden esetben járnak azonnali tünetekkel, ezért fontos figyelmet fordítanunk arra, hogy milyen mezőgazdasági területen termelt élelmiszert fogyasztunk.

2.3.1. Vízkultúrák növénytermesztés történelme

A vízkultúrák növénytermesztéssel kapcsolatos kísérletek már a 18. században elkezdődtek. Jelentős fejlődés a II. világháborút követően történt, mivel nagy mennyiségű friss zöldségre volt szükség rövid időn belül. Az ezt követő időszakban vált a vízkultúra növénytermesztés „nagyhatalmává” Hollandia az 1970-es évek során. Eleinte 5 hektáron, majd néhány év elteltével több mint 200 hektáron folytattak tápoldatos, talaj nélküli növénytermesztést. Hollandia napjainkban is világvezető az üzemi termelést illetően, továbbá Spanyolországban, Angliában, Japánban, Izraelben, Belgiumban, Franciaországban,

Kanadában, az USA-ban és Magyarországon is összesen több ezer hektárnyi területen folytatják ezt a féle termelést. A legismertebb hidropóniásan termesztendő növények közé tartozik a paprika, paradicsom, különböző *káposzta és salátafélék*, de például a sárgadinnye is termesztendő ezzel a technológiával [9].

2.3.2. Talaj nélküli termesztés változatai

A hidrokultúrák növénytermesztés során a fő akkumulálódó közeget, a termőtalajt kiiktatva, történik a növénytermesztés. A termesztés során a növényzet csak a vízzel és a benne oldott tápanyaggal érintkezik. A tápoldatozott víznek folyamatosan áramolnia szükséges a pangó víz elkerülése érdekében, amely oxigénhiányos közeget eredményezhet. Attól függően, hogy a gyökér hogyan helyezkedik el, 3 főbb változatot különböztetünk meg:

1. „AEROPONICA” másnéven tápköd kultúra: a gyökerek a tápködben lógnak bele és onnan veszik fel a szükséges tápoldatos vizet.
2. „AGREGATPONIKA” másnéven támasztóközeges kultúra: a gyökerek valamilyen természetes vagy mesterségesen előállított anyagú közegben helyezkednek el.
3. „HIDROPONIKA” másnéven (vízkultúra): a gyökerek egy néhány mm vastag folyamatosan áramló tápoldat filmbe merülnek. [9]

2.3.3. Támasztóközeg szerinti csoportosítás

Napjainkban a támasztóközeges kultúrák a legelterjedtebbek. A következő táblázat a támasztóközegek (gyökérrögzítő közegek) típusait szolgálja bemutatni:

1. táblázat Gyökérrögzítő közegek csoportosítása

<i>Természetes eredetű</i>			<i>Szintetikus anyagból GYÁRTOTT</i>
Szerves anyag	Szervetlen anyag	Természetes anyagból GYÁRTOTT	
tőzeg faforgács szalma	zeolit homok kavics	kőzetgyapot vermikulit üveggyapot	oázis aggrofoam

A támasztóközeg megválasztása során olyan anyag alkalmazása szükséges, amely megfelelő fizikai és kémiai körülményeket támaszt a gyökér fejlődéséhez:

- semleges pH,
- kémiaiailag indifferens (az adagolt tápoldatot ne kösse meg, anyagából ne adjon le káros összetevőket),
- tartós szerkezet,
- vízleadó- és megkötőképesség (megfelelő vízmennyiség szolgáltatása),
- továbbá fontos szempont a gazdaságosság is.

Kutatásom során kőzetgyapot kockákat alkalmaztam a hidropóniás növénytermesztés során. A kőzetgyapot a legelterjedtebb hidrokultúrás közeg. Összetételét illetően olvasztott bazalt szálakból készül műgyanta segítségével. A palántázás során vermikulitot helyeztem a beáztatott kőzetgyapot kockákra helyezett magokra, amely a kipárolgást gátolta. A vermikulit kőzetek hevítése során keletkező lemezes anyag [9].

2.3.4. Előnyök és hátrányok

A hidrokultúrás termesztésnek számos előnye, azonban néhány hátránya is van, azonban ezeket a tényezőket összesítve és mérlegelve pozitív eredmény kapható.

A hidropóniás növénytermesztés során a talajból eredő fertőzésveszély kizárt a hiányzó talajból adódóan, a növény számára szükséges környezeti tényezők, mint a fény és a hőmérséklet könnyebben befolyásolhatók, illetve a víz- és tápanyagellátás is kiegyensúlyozottabb az automatizált rendszernek köszönhetően. A kontroll alatt tartott rendszerben a kiegyensúlyozottabb termesztés következtében a termőföldhöz képest nagyobb a termésátlag, illetve korábbi érés is megfigyelhető a hidrokultúrás növények esetében. Abból adódóan, hogy csak a megfelelő mennyiségű és minőségű víz biztosítása szükséges a rendszer működtetéséhez, szinte bárhol elhelyezhető [10], [11].

Az előnyök mellett néhány hátránya is van a hidrokultúrás termesztésnek. Mivel egy komplett rendszer létrehozása szükséges, többlet beruházást igényel, továbbá pontos, szabályozott technológia övezi a termesztést, amelyhez szakértelem szükséges. Mindazonáltal, hogy ez a módszer még nem ismert a hétköznapi emberek körében számos fogyasztói bizalmatlanságot szül több tekintetben, mint például a termesztett növény íze és a tápoldat alkalmazása miatt a növény már nem minősül bioterméknek [10], [11].

2.4. Termelt növényanalízis, fogyasztathatósági vizsgálat

A termelt növények analízise során olyan paraméterek vizsgálatát érdemes elvégezni, amely kontroll minta mellett teljes képet adnak számunkra a növekedés mértékéről és az esetleges eltérésekről. Ezek a paraméterek változatosak lehetnek, azonban a következők vizsgálata a legfontosabb:

- *maximális gyökérhossz*: gyökér hosszúsága és kinézete információt ad a növény állapotáról. Amennyiben a gyökér rövid és rossz állapotú vagy sérült, valószínűleg a gyökér feletti rész sem lesz egészséges.
- *maximális levélhossz és produktum tömeg*: ez a két mért paraméter a növény növekedéséről ad információt. A levél formája, színe állapota árulkodó jeleket tartalmaz az esetleges tápanyaghiányról.
- *nedvességtartalom*: a nedvességtartalom gyökér vízfelvevő képességéről és állapotáról, illetve a növény állapotáról ad számunkra információt.

A fent említett paramétereket tömeg- és hosszúság méréssel határoztam meg.

2.4.1. Fogyaszthatóság vizsgálata

A fogyasztathatóság vizsgálata során különböző kockázati indexek és hányadosok vizsgálatát célszerű elvégezni, amelyek számításához elsősorban a minták elemanalitikai vizsgálati eredményeit, különös tekintettel egyes fémek mennyiségét vettem figyelembe. Kutatómunkám során az ún. a *célveszélyességi hányadost (THQ)* és az ún. *egészségkockázati indexet (HRI)* határoztam meg számításal és vizsgáltam ezek értékeit. A szakirodalomban leírt átfogó vizsgálatok mikrobiológiai vizsgálatokat is bevonnak és értékelnek, azonban esetemben nem valós, hanem szintetikus előállított fürdővíz révén nem volt releváns a mikrobiológiai vizsgálatok elvégzése.

Célveszélyességi hányados (THQ): Egy dimenzió mentes hányados, amely ha >1 , abban az esetben aggodalomra ad okot a fogyasztás során a nehézfém esetleges bevitelével kapcsolatosan. A célveszélyességi hányados számításához szükséges összefüggést az alábbi egyenlet írja le:

1. egyenlet Célvesélyességi hányados (THQ) [12]

$$THQ = \frac{EF \times ED \times IR \times C \times 10^{-3}}{RfD \times BW \times TA}$$

ahol,

- EF: expozíciós gyakoriság (nap/év),
- ED: expozíció időtartama (év),
- IR: növény lenyelési aránya (g/nap),
- C: nehézfém koncentráció (mg/kg),
- RfD: referencia dózis (mg/kg/nap),
- BW: felnőttkori átlagsúly (kg),
- TA: átlagos expozíciós idő (nap). [12]

A referencia dózis (RfD) egy számított érték, melyet a US EPA honlapján található kockázati paraméter listából gyűjtöttem össze [13].

2. táblázat Nehézfémek referencia dózisa (RfD) [13]

RfD (mg/kg x év)	Nehézfémek						
	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
	0,001	0,003	0,04	0,14	0,02	0,0035	0,3

Az átlagos expozíciós idő az expozíció gyakoriságának (EF) és az expozíciós idő (ED) szorzatának összege.

A számításaim során felhasznált értékeket az alábbi táblázat részletezi:

3. táblázat A THQ és HRI számítása során felhasznált értékek

Jelölések	Paraméterek	Használt értékek
EF	expozíciós gyakoriság (nap/év)	52
ED	expozíció időtartama (év),	70 (átlag életkor) [12]
IR	növény lenyelési aránya (g/nap)	100
BW	felnőttkori átlagsúly (kg)	70 [12]

Egészségkockázati index (HRI): a HRI a nem rákkeltő hatások egészségügyi kockázatát fejezi ki. Amennyiben a HRI 1-nél kisebb, akkor a vizsgált populáció nem veszélyeztetett, valamint nagyon alacsony a közegészségügyi kockázat [12].

A HRI érték meghatározásához szükséges az ún. DIR (napi beviteli arány) ismerete is. A DIR megbecsüli a fogyasztó meghatározott testtömegének testrendszerébe jutó átlagos napi fémterhelést. Számítása az alábbi képlet alkalmazásával történik.

2. egyenlet Napi beviteli arány (DIR) [12]

$$DIR = \frac{C \times Cf \times IR}{Bw}$$

ahol,

- C: nehézfém koncentráció (g/kg),
- C_f: konverziós faktor, mely a nedves tömeget száraz tömeggé alakítja (ebben az esetben 0,065),
- IR: növény lenyelési aránya (g/nap),
- B_w: felnőttkori átlagsúly (kg).

A napi beviteli arány meghatározását követően az alábbi egyenlettel határozható meg az egészségkockázati index (HRI).

3. egyenlet Egészségkockázati index (HRI) [12]

$$HRI = \frac{DIR}{RfD}$$

ahol,

- DIR: napi beviteli arány (mg/kg/nap)
- RfD: referencia dózis (mg/kg/nap)

3. Anyag és módszer

3.1. Öntözővizek létrehozása

A kutatás során két típusú öntözővizet alkalmaztam: kezelt szintetikus fürdővizet, illetve ivóvizet, melyet kontrollként használtam. Az ivóvizet a vezetékes csapvíz rendszerből vettem a kontroll minták öntözéséhez, valamint a szintetikus fürdővíz létrehozásához is.

A szintetikus fürdővizet a tanszéki kutatócsoport által kialakított receptúra alapján készítettem el. A szintetikus fürdővíz olyan összetevőket tartalmaz, amelyek a hétköznapi fürdővizekben is megtalálhatók (tusfürdő, sampon, olaj, valamint N- és P-formák) és jól reprezentálják a fürdővíz tulajdonságait. A receptúra a következő komponenseket tartalmazza:

- sampon (Syoss Professional Performance, Schwarzkopf & Henkel, Düsseldorf, Germany),
- tusfürdő (Nivea Creme Soft, Beiersdorf AG, Hamburg, Germany),
- nutrient broth (növényi tápleves, Sharlau, Barcelona, Spain)
- kukoricacsíra olaj (VFI GmbH, Austria) [14].

A hidropóniás növénytermesztés nagyobb térfogatú víz alkalmazását igényli (40 liter), ebből adódóan a korábbi kutatásokhoz képest jelen kutatási fázis során koncentrált mintát készítettem, azaz 5 liter vízben oldottam fel 20 liternyi fürdővíz összetevőit, majd ezt kevertetéssel homogenizáltam. A 40 liter vízszükséglet miatt a teljes térfogatú fürdővíz előállítását és a kezelési műveletet kétszer végeztem el. Kezelésként a korábbi munkám során kifejlesztett módszert alkalmaztam: koagulációs-flokkulációs kezelést, majd azt követően kvarchomok rétegen történő gravitációs szűrést. A koagulálószerként a szennyvíztisztítás során is széleskörűen használt vas(III)-kloridot alkalmaztam.

A koagulációs-flokkulációs kezelést a következő lépések folyamán valósítottam meg:

1. Vegyszeradagolás: 45,625 ml 100 g/l koncentrációjú FeCl_3 -törzsoldatból
2. 15 perc intenzív kevertetés
3. 30 perc lassú kevertetés
4. 4x-es hígítás: 1,5 l koncentrált szintetikus fürdővíz+ 4,5 l ivóvíz= 6 l szintetikus fürdővíz
5. 5 perc intenzív kevertetés

6. 15 perc lassú kevertetés
7. ülepités.

A kezelés hatékonyságát az alábbi egyenlet segítségével számítottam ki:

4. egyenlet Kezelési hatékonyság meghatározása (P (%)) [15]

$$P(\%) = \frac{C_0 - C_i}{C_0} * 100$$

ahol,

- C_0 a kezdeti paraméter koncentrációja
- C_i i időben mért paraméter koncentrációja.

3.2. Öntözővizek minősítése

Az hidropóniába be- és kikerülő, illetve a rendszerben keringtetett öntözővizeket már a korábban kiemelt paraméterek alapján minősítettem. A folyamatos vizsgálat célja az volt, hogy információt kapjak a hidropóniában lezajló folyamatokról, illetve összehasonlításokat végezzek a mért értékek alapján. Egyes paramétereket, mint a pH és a vezetőképesség, napi szinten ellenőriztem, mivel ezek a tényezők jelentősen befolyásolják a növények növekedését.

3.2.1. pH mérés

A pH a vizsgált oldat kémhatásáról ad információt. Számítása során az oldatban levő hidrogénion-koncentráció negatív előjelű tízes alapú logaritmusát vesszük figyelembe, dimenzió nélküli paraméter. A kapott eredmény a pH skála segítségével értelmezhető, amely 14 egységből áll. A 7-es pH semleges kémhatást jelez, alatta savas, felette lúgos kémhatásról beszélünk. Mérését számos eszközzel végezhetjük attól függően, hogy mennyire pontos eredményre van szükség. A legegyszerűbb módszer a pH papír, amely színváltozással jelzi a kémhatást. A legpontosabb képet az elektródákat alkalmazó elektrokémiai mérések biztosítják. „Az elektróda olyan elektrokémiai érzékelő, amely egy mérő- és egy referencia elektródából áll. A mérendő oldat pH-értékének függvényében változik egy membránon a feszültség. A ma használatos elektródák úgy alakultak ki, hogy a 7-es pH-értéknél a membránon levő feszültség 0 mV. Minél jobban eltér a mérendő oldat pH értéke a 7-es pH-tól, annál nagyobb a feszültségjel. A pH-mérő műszer ezt a jelet használja fel a pH-érték kiszámítására” [16].

A vízminősítések során a tanszéki laboratórium MultiLine4 mérőbőröndjében található SenTix 41 kombinált pH elektródát használtam.

3.2.2. Fajlagos elektromos vezetőképesség és zéta-potenciál mérése

A két paramétert ugyanazon eszköz segítségével vizsgáltam a Zetasizer Nano Z készülék segítségével. A mérések során a készülék párhuzamos méréseket végez és a mérések átlagát szolgáltatja információként.

A fajlagos elektromos vezetőképesség a vizsgált minta oldott iontartalmáról ad tájékoztatást. Mértékegysége: $\mu\text{S}/\text{cm}$. Minél nagyobb az oldat vezetőképessége, annál több ion található benne, a sók, savak, és lúgok révén. Mérése elektrokémiai ellenállásméréssel történik. A zéta-potenciát az alkalmazott szoftver számítással határozza meg a részecskék oldatbeli mozgékonyaságából [17].

3.2.3. Zavarosság mérése

Zavarosságnak nevezzük azt a jelenséget, amikor egy folyadékban jelenlevő oldhatatlan részben a rajta áthaladó fény elnyelődik és szétszóródik. A zavarosság mérését nefelometria alapján végzik. A mérő az alkalmazott fényforrásban különböznek egymástól. Az amerikai szabványban széles sávú wolfram lámpát alkalmaznak, míg a MSZ-ISO 7027 /DIN 27027 IR-LED (infravörös) fényforrás alkalmazását követel meg 860 nm mellett. A mai használatos és legelterjedtebb mértékegység az NTU (Nephelometric Turbidity Unit). [18]

Méréseimhez Turb 555-IR típusú zavarosságmérő készüléket használtam, melyet az 1. ábra szemléltet.



1. ábra WTW TURB555IR nefelométer [saját fotó]

3.2.4. Biológiai oxigénigény mérés

Biológiai oxigénigény alatt azt az oxigénmennyiséget értjük, melyet egy kevert baktériumkultúra megközelítően optimális fiziológiai körülmények között, - beleértve az ásványi- és tápanyagokról történő gondoskodást is-, a vízben jelenlévő és biológiailag lebontható szerves komponensek lebontásához elfogyaszt.

Mérési módszerként az 5 napos mérést alkalmaztam, mely megmutatja, hogy 1 liter mintára vonatkoztatva mennyi az oxigénigény milligrammban kifejezve. Ezt a paramétert kiemelten vizsgáltam, mivel mennyisége a szennyvízkezelési eljárás hatékonyságáról ad tájékoztatást.

Az alábbi ábrán a mérőüvegek és a rácsatlakoztatható mérőfejek láthatók. Az üveg belsejében egy gumi kolonusz található, amelybe a mérést megelőzően KOH/NaOH pasztillát kell helyezni a szén-dioxid megkötésére. Az előkészített pontosan bemért mintába NTH csepp adagolása szükséges a nitrifikáció kiküszöbölésére. A 4 táblázat a beméréshez szükséges információkat tartalmazza. Méréseim során szennyezettségtől függően 164 ml, illetve 432 ml mennyiségű mintákkal dolgoztam.



2. ábra BOI OXITOP IS 12 manometrikus mérőüvegek [saját fotó]

4. táblázat BOI bemérési táblázat

Méréstartomány (mg/l)	Bemérendő minta térfogat	DIGIT szorzófaktor	NTH 600 cseppek száma
0-40	432,0	1	9
0-80	365,0	2	7
0-200	250,0	5	5
0-400	164,0	10	3
0-800	97,0	20	2
0-2000	43,5	50	1
0-4000	22,7	100	1

3.2.5. Összes szerves széntartalom (TOC)

Az oldat szerves anyag tartalmára a biológiai- és a kémiai oxigénigényen túl az összes szerves széntartalomról is tudunk következtetni. A módszer gyorsabb információt ad, mint pl. a biológiai oxigénigény, amely 5 napos mérés. A vizsgálni kívánt mintákat vizsgálat előtt előkészítésként 0,45 µm pórusméretű membránszűrőn mértem, azaz a vizsgálat során az oldott szerves szennyezőkre kapunk felvilágosítást. Az alábbi ábrán a Shimadzu TOC-V_{CPN} típusú készülék látható, mellyel a vizsgálatokat végeztem. Az adatok kiértékelése a TOC Control-V nevű szoftver segítségével készült.



3. ábra Shimadzu TOC-V_{CPN} típusú készülék [saját fotó]

3.2.6. ANA-detergens tartalom vizsgálata

A szennyvizek típusuktól függően különböző mennyiségű detergenst tartalmaznak. A detergensok valójában felületaktív anyagok, amelyek tulajdonságaik révén megkötő szerepet töltenek be, kifejezetten a zsírok, olajok és szennyeződések megkötésére. Az általam vizsgált

szürkevíz is tartalmaz detergenseket, amelyek a tusfürdő és a sampon összetevőiben vannak jelen. [19]

A fenti összetevőkben tipikusan előforduló ún. anionos detergensek mérésére egy kétfázisú titrálást alkalmaztam az ISO 2271:1989 szabvány alapján kidolgozott módszer szerint. [20] A vizsgálatokat 50 cm³ térfogatú kezeletlen és kezelt szürkevízre is elvégeztem a kezelési hatékonyság monitorozása céljából. A titráláshoz szükséges anyagok:

- fenolftalein indikátor (1%-os, Spektrum 3D)
- savas keverék indikátor (dimidium bromid - diszulfín kék, Panreac Quimica S.L.U.),
- kloroform (etanollal stabilizált, Scharlab Magyarország Kft.),
- Hyamine 1622 reagens (benzetónium-klorid, Scharlab, S.L.).

Mivel a titráláshoz olyan anyagok használata szükséges, amelyek erősen egészségkárosító hatásúak, kötelező a védőfelszerelések viselete és a vegyifülke használata is.

Az alábbi ábrán a titrálás fázisai láthatóak:



4. ábra ANA-detergens meghatározás titrálás fázisai [saját fotó]

A titrálás során tapasztalt mérőoldat fogyasztásából a következő képlet segítségével határoztam meg az ANA-detergens tartalmát a mintáknak.

5. egyenlet ANA-detergens meghatározása [21]

$$ANA = \frac{V_1 * c_1 * M_{Hy} * 1000 * 1000}{1000 * V_2}$$

ahol,

- ANA: Anionos felületaktív anyag koncentrációja [mg/l],
- V₁: Hyamine - mérőoldat fogyasztása (átlagértéke) a titrálás során [cm³],
- c₁: A mérőoldat koncentrációja [0,004 mol/dm³],
- M_{Hy}: A Hyamine moláris tömege [448,08 g/mol],
- V₂: A vizsgálatához bemért szintetikus szürkevíz minta térfogata [cm³].

3.2.7. Elemanalitikai vizsgálatok

A kutatás során vizsgált víz-, és növényminták elemösszetételére is meghatározásra került, kiemelt figyelemmel a fémtartalomra. Az elemtartalmakat az 5. ábrán látható ún. mikrohullámú plazma atomemissziós spektrométer (MP-AES 4100, Agilent Technologies, Santa Clara, United States) segítségével határoztuk meg a Debreceni Egyetem, Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszék Környezetanalitikai laboratóriumában.



5. ábra Mikrohullámú plazma atomemissziós spektrométer [saját fotó]

A mérés azon az elven alapszik, hogy a vizsgálati mintát olyan magas hőmérsékletre hevítjük, hogy az alkotó atomjaira esik szét, a gerjesztett atomok pedig az atomra jellemző fényemisszió alapján egy ún. spektrumot generálnak [22].

A vízmintákat 0,45 μm pórusméretű szűrőn leszűrtem, majd salétromsavval tartósítottam. Közvetlenül a vizsgálat előtt a roncsoláshoz 50 ml vízmintához 5 ml 65% salétromsavat adagoltam, majd bepároltam főzőlapon. Ezután 5 ml salétromsavat adagoltam a mintához és újra bepároltam a maradékot. Ezt követően 25% hidrogén-peroxidot, végül 0,1 mol/l salétromsavat adagoltam és töltöttem 50 ml mérőlombikba.

A növényi mintákat ETHOS UP (Milestone) mikrohullámú roncsolóberendezés segítségével vittem oldat formába. A mintákhoz 6 ml cc. HNO_3 (Merck) és 2 ml 30%-os H_2O_2 (Merck) elegyet adagoltam roncsolószerként. Az elroncsolt mintákat centrifuga csövekbe töltve 25

ml-re töltöttem jelre. A növényi minták eredményeit a következő összefüggés segítségével alakítottam át a megfelelő koncentráció-formába.

6. egyenlet Elemtartalom koncentrációjának átszámítása mg/l-ről mg/kg koncentrációra

$$\textbf{Elemtartalom} = \frac{C_{minta} - C_{vak}}{m_{minta}} * V_{minta}$$

ahol,

- C_{minta} : A minta tömegkoncentrációja [mg/l]
- C_{vak} : A vak minta tömegkoncentrációja [mg/l]
- m_{minta} : A bemért minta tömege [g]
- V_{minta} : A minta jelre állított térfogata [ml]

3.3. Hidropóniás növénytermesztés

Kutatásom során olyan káposzta,- illetve salátafélék termesztésével foglalkoztam, amelyek gyakran megtalálhatóak akár éttermekben, vagy akár a saját konyhánkban is:

- kínai kel,
- rukkola,
- és Lollo Rosso saláta.

Mindhárom növény népszerűnek számít tányérjainkon, gondoljunk akár egy finom olasz rukkolás pizzára vagy egy ínycsiklandozó salátára. A kutatásom során e három növény fejlődését követtem végig a magültetéstől kezdve a szüretelésig.

3.3.1. Növények előnevelése

Az ún. előnevelő propagátorokat híg hidrogén-peroxid oldattal fertőtlenítettem elkerülve ezzel bármilyen esetleges növényfertőzés lehetőségét. A magokat előre beáztatott közetgyapot kockákra helyeztem csipesszel és közel 2 héten keresztül napi ellenőrzés mellett tápoldattal kevert, egyenletesen kellő kémhatásúra állított ultratiszta vízzel öntöztem és neveltem a kifejlődő csírákat palántákká. A kémhatás állítása a növények sokkolásának megelőzésére hivatott eljárás, melyet KOH oldat segítségével végeztem. A kezdeti 6,00-os értékről 6,50-re, majd 7,00-re emeltem a víz pH-értékét. Öntözővíz típusonként 17-17 palántát neveltem, melyből növénytípusonként majd 12 db került be a toronyba, így összesen 102 db palánta nevelkedett egy időben. A növények 13 napot töltöttek a propagátorban.



6. ábra Magok felvitele a beáztatott kőzetgyapot kockákra



7. ábra Palántanevelés kezdete és vége

3.3.2. A hidropóniás torony felépítése

A hidrokultúrák növénytermesztéséhez függőleges, körtálcás elrendezésű hidropóniás torony állt a rendelkezésemre. A torony összesen 10 szintből állt, amelybe 4 szinten helyeztem be a növényeket. A palántanevelést követően a növényeket ún. hidrokosarakba raktam a kőzetgyapot kockákkal együtt, amelyeket behelyeztem a hidropóniás toronyba. A növények összesen 18 napot töltöttek a hidropóniás toronyban.



8. ábra Palántázott növények ültetőkosárba helyezése

Az egyik tornyot ivóvízzel, a másik tornyot pedig kezelt szintetikus fürdővízzel töltöttem fel. A toronyba keringő vizet - a párolgási és növénytermesztési veszteség miatt utánpótlásként - adott időközönként a Vízminőségvédelmi Laboratóriumba állítottam elő és analizáltam, a már a fentebbiekben leírtak alapján.

Az ivóvíz biztosítása a vezetékes vízhálózatról történt egyidejűleg a szintetikus fürdővízhez készítéséhez is oldószert jelentve, ebből adódóan mindkét öntözővíz alapját megegyező tulajdonságú vizek alkották.

A toronyra történő rátöltést megelőzően minden alkalommal, illetve napi szinten is ellenőriztem a toronyban keringő víz minőségét. Mivel a hidropóniás toronyban nincs talaj, így a közeg pufferkapacitása is jelentősen csökken. A paraméterek kis változásával is a növények fejlődésük során estlegesen károsodhatnak. Napi szinten vizsgáltam a toronyban lévő víz pH-ját, zéta-potenciálját, fajlagos elektromos vezetőképességét és összes szerves széntartalmát (TOC). Minden növénynek más a pH igénye, a legoptimálisabb tartomány azonban 6,5-7,5 között változik. A pH optimális szinten tartását 24,5%-os foszforsav adagolásával értem el. A foszfor, jelentős szerepet játszik a növények gyökerének fejlődésének elősegítésében, emiatt esett erre a savra a választás. A vezetőképesség információt ad számunkra az oldatban lévő sók mennyiségéről. Minél nagyobb az érték, annál magasabb a sótartalma a toronyban lévő víznek, amely nem feltétlen kedvez a növényeknek. A TOC értéke a szervesanyag tartalomról adott számomra információt.



9. ábra Hidropóniás tornyok a projekt első és utolsó napján

3.3.3. Növények minősítése

A termesztett növényeket olyan tulajdonságaik alapján vizsgáltam, ami az ivóvízzel történő összehasonlítás során pontos képet ad az esetleges eltérésekről. Továbbá az elemanalitikai vizsgálatok esetében kifejezetten elsősorban az ún. nehézfémeket vizsgáltam és az eredmények segítségével a már a szakirodalomban is részletezett mutatókat számítottam ki és azokat ábrázolás után elemeztem.

4. Eredmények és kiértékelésük

Jelen kutatás elsődleges célja a növények fogyasztathóságának és növekedési mutatóinak vizsgálata volt a toronyba kerülő öntözővíz függvényében. A munkafolyamatok során elemeztem a víz- (lásd öntözővíz) és növényminták jellemzőit. Ebben a fejezetben a kapott eredményeket mutatom be.

4.1. A toronyba kerülő vizek paramétereinek vizsgálata

A kutatási projekt és egyben a nyári szakmai gyakorlat egyik legfontosabb eleme a tornyokba kerülő öntözővíz, kiemelten a kezelt szűrkevíz volt. Az elemzések során széleskörű információt sikerült összegyűjteni, amelyek a korábbi kutatási eredményeimet megerősítették. A következő táblázatokban a mérések során kapott eredményeket adom meg.

5. táblázat Toronyba kerülő vizek elemzése

Paraméterek	Mértékegységek	Ivóvíz	NYERS szintetikus fürdővíz	KOMPLEXEN KEZELT szintetikus fürdővíz
pH	-	7,58±0,021	7,98	6,57±0,096
Zéta-potenciál	mV	(-11,46)±0,851	(-31,7)±0,853	(-12,3)±0,75
Fajlagos elektromos vezetőképesség	μS/cm	780±0,0153	971±0,0287	1060±0,0356
Zavarosság	NTU	0,22±0,0793	29,97	0,28±0,055
TOC	mg/l	2,49±0,383	69,92	5,36±1,890
BOI₅	mg/l	4,33±0,767	110	14,50±2,50
ANA-detergens tartalom	mg/l	-	25,54	Méréshatár alatti

A vízminőségi jellemzők kiértékelése során az az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2020/741 rendeletét és az USEPA nemzetközi ajánlásait vettem figyelembe. A két ajánlott paramétert tekintve a zavarosság esetében sikerült a kívánt értéket elérni (2 NTU). A biológiai oxigénigény ugyan közel tizedére csökkent a kiindulási nyers szintetikus fürdővízminta biológiai oxigénigény értékének, azonban el nem érte a kívánt határt, de jól közelítette azt az USEPA ajánlása alapján. További pl. oxidatív kezeléssel, esetleg a szűrőberendezések gyakoribb regenerálásával ez az érték kívánt határérték alá csökkenthető. Az EU 2020/741 rendelete alapján a kezelt fürdővíz BOI₅ értéke megfelelőnek bizonyult,

mely az elvart 25 mg/l alatti volt. Az ANA-detergens tartalom méréshatár alatti eredményt mutatott, amely a növények szempontjából pozitív eredmény, azaz a paraméter által jellemző ún. anionos detergenseket sikerült eltávolítani a nyers mintából.

Ha összehasonlítjuk a kezelt fürdővíz értékeit az ivóvíz értékeivel, sok esetben jó egyezőséget vélhetünk felfedezni (lásd. zéta-potenciál, zavarosság, TOC, ANA-detergens tartalom), mely mindenképpen alátámasztja a potenciális öntözővízként történő használatát.

4.2. Kezelési eljárás hatékonyságának vizsgálata

Több éves kutatómunka során dolgoztam ki a fürdővizekre ajánlott egyszerű, de hatékony kezelési metódus pontos lépéseit és körülményeit. Kezdetben csak mechanikai szűrést alkalmaztam kezelésként, majd az eljárást kémiai kezeléssel (lásd. koagulációs-flokkuláció) egészítettem ki a kezelt víz minőségi mutatóinak javítására. Az alábbi táblázatban a kezelési hatékonyságot százalékos adatok segítségével mutatom be.

6. táblázat Kezelési hatékonyságok
(+: paraméterbeli csökkenés; -: paraméterbeli növekedés)

Paraméterek	Mértékegységek	KEZELÉSI HATÉKONYSÁG %
Zéta-potenciál	mV	61,20
Fajlagos elektromos vezetőképesség	μS/cm	-9,17
Zavarosság	NTU	99,07
TOC	mg/l	92,33
BOI₅	mg/l	86,82
ANA-detergens tartalom	mg/l	Nem számítható

A százalékos értékeket elemezve elmondható, hogy egy paraméter kivételével (fajlagos elektromos vezetőképesség) a kezelés csökkentette a szennyezőanyagok mennyiségét. Fő célom a kezeléssel a vízminőségi jellemzők (zavarosság, TOC, BOI₅) adott koncentrációérték alá történő csökkentése volt. A BOI értékek alapján a kezelés körülményeit célszerű tovább tesztelni, viszont a zavarosság esetében szinte 100%-os csökkenést sikerült elérni. Az ún. anionos (ANA)-detergens érték a kezelt vízre méréshatár alatti volt, azaz a detergensek mennyiségét is hatékonyan tudtam csökkenteni.

A kezelési eljárás hatékonyságát a nehézfém tartalom függvényében is vizsgáltam. Elemeztem a nyers szintetikus fürdővíz és a kezelt szintetikus fürdővíz mért koncentrációértékeit és azokból kezelési hatékonyságot számítottam. Az öntözővizek nehézfém tartalmát és a vízhez hasonlított %-os nehézfém tartalom csökkenését a 7. táblázat

tartalmazza Az elemanalitikai mérések során sok esetben méréshatár alatti eredményt detektáltam, ezekben az esetekben nem számítottam kezelési hatékonyságot. A réz esetén közel 35,71%-os, míg a mangán esetén igen magas 300%-os növekedés figyelhető meg. A kezelt fürdővízben mért magas nehézfém koncentráció a hidropóniára történő rátöltés következtében történő akkumulálódás magyarázható.

7. táblázat Ivóvíz nehézfém tartalma és kezelési hatékonyság

Minta	Nehézfém tartalom (µg/L)					
	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb
Ivóvíz	<22,17	<0,30	42,00	1,00	<1,08	<1,10
Kezelt fürdővíz	<22,17	<0,30	57,00	4,00	<1,08	<1,10
Kezelés hatásfoka	NA	NA	+35,71 %	+300%	NA	NA

4.3. A hidropóniás toronyba bemenő és kijövő vizek elemzése

A toronyba bekerülő ivóvizet, mint kontrollt és a kezelt szintetikus fürdővizet elemeztem, majd a termesztést követően újra elemeztem a toronyból kinyert öntözővíz paramétereit. Mivel rátöltés több alkalommal történt, így az ún. bemenő vizeknek az átlagát vettem alapul.

A következő táblázat az eredmények összefoglalását tartalmazza.

8. táblázat Toronyba bemenő és kijövő vizek összehasonlítása

Paraméterek		pH	Zéta-potenciál	Fajlagos elektromos vezetőképesség	Zavarosság	TOC	BOI ₅
		-	mV	µS/cm	NTU	mg/l	mg/l
Ivóvíz	BEMENŐ	7,58±0,021	-11,46±0,851	780±0,015	0,22±0,079	2,49±0,38	4,33±0,76
	KIJÖVŐ	7,04	-12,40	564	0,20	8,05	6,33
Változás (%)		-7,12%	-8,20%	-27,69%	-9,09%	+223%	+46,19%
Kezelt szintetikus fürdővíz	BEMENŐ	7,79±0,10	-11,20±0,91	1240±0,014	0,20	9,42±1,90	14,50±2,50
	KIJÖVŐ	6,57	-12,30	1060	0,28	5,36	6,33
Változás (%)		-15,66%	-9,82%	-14,52%	+40%	-43,10%	-56,34%

A pH, a zéta-potenciál értékei is mind a két öntözővíz esetében csökkenést mutattak, amely változás a foszforsav hozzáadagolásával magyarázható, amit a megfelelő pH-érték szinten tartásához alkalmaztam.

A zavarosság az ivóvíz esetében csökkent, míg a kezelt szintetikus fürdővíz esetében megnőtt. Az összes szerves széntartalom és a biológiai oxigénigény ellentétes változást mutatott a két víztípus esetén: az ivóvíz szerves anyag tartalma jelentősen megnőtt, míg a szintetikus fürdővíz szerves anyag tartalma kb. a felére csökkent. Valószínűsíthető, hogy a kezelt fürdővízzel öntözött növények fel tudták venni a fürdővíz maradék szerves anyag tartalmát.

4.4. Termesztett növények elemzése

A hidropóniában történő növénytermesztéshez káposzta- és salátaféléket választottam. Összesen 6x17 db növényt analizáltam, 3-3 növénytípust tornyonként. Az eredményeket átlagolt formában tüntettem fel a diagrammokon.

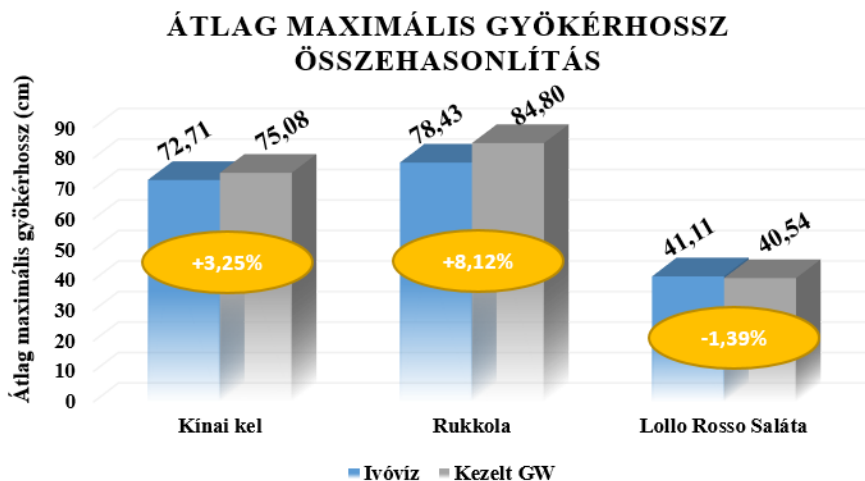
Az elemzések során a növények olyan tulajdonságaikat vizsgáltam, amely az ivóvízzel történő összehasonlításnál pontos képet ad az esetleges eltérésekről. Az eltéréseket sárga szövegbuborékban jelöltem a diagrammokon az ivóvízzel feltöltött toronyban nevelt növényekhez hasonlítva.



10. ábra Elemzésre váró Lollo Rosso saláták

4.4.1. Maximális gyökérhossz vizsgálata

Minden növényminta esetén megmértem a maximális gyökér hosszúságot. A gyökér hosszúsága és külleme információt ad számunkra a növény állapotáról. Amennyiben a gyökér rövid és rossz állapotú vagy sérült, valószínűleg a növény sem lesz egészséges a gyökér fölött.



1. diagram Átlag maximális gyökérhossz összehasonlítása

A maximális gyökérhosszúságok átlagait vizsgálva megállapítottam, hogy jelentős eltérés csak a rukkola esetében (+8,12%) figyelhető meg, illetve a kínai kel esetében is minimális (+3,25%) a pozitív eltérés. A kínai kel és a rukkola gyökerének hosszúságára pozitívabb hatással volt a kezelt szintetikus fürdővíz, mint az ivóvíz.

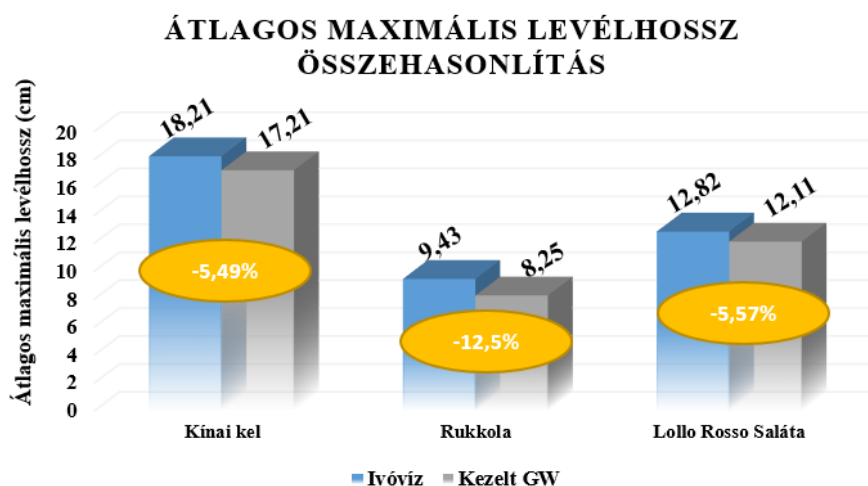
A gyökerek hosszúságát a torony vizéhez adagolt foszforsav és a fürdővízben lévő szerves anyag (tápanyag) tartalom is befolyásolhatta. A kezelt szintetikus fürdővíz pH-jának optimális szinten történő tartásához több foszforsav adagolása volt szükséges, mint az ivóvízes torony kémhatásának szinten tartásához, amely pozitívan hathatott a gyökerek növekedésére.



11. ábra Kínai kel gyökérhálózata

4.4.2. Maximális levélhossz vizsgálata

A gyökérhosszúságot követően lemértem a növények leghosszabb levelét is, majd a feljegyzett adatokat, azokat átlagoltam és diagrammon ábrázoltam.



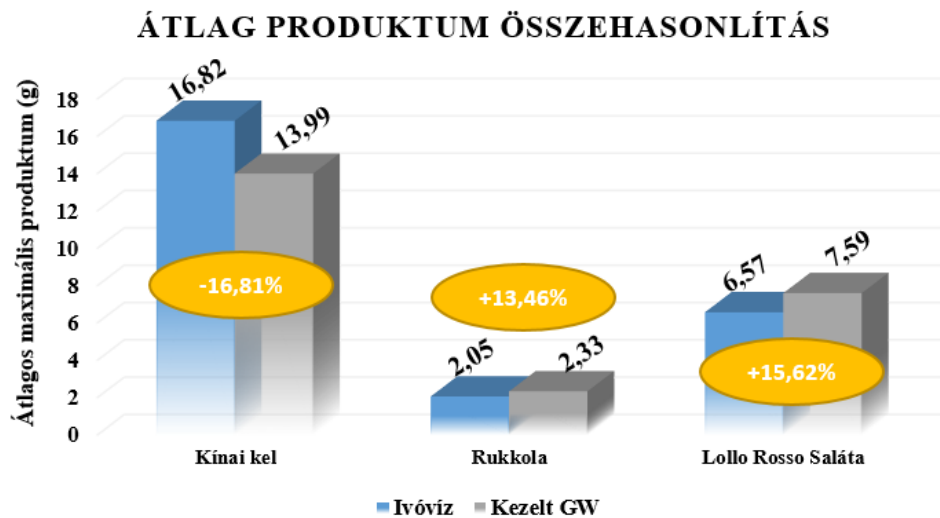
2. diagram Átlag maximális levélhossz összehasonlítása

A maximális levélhosszúságokat tekintve egyértelműen kijelenthető, hogy a kezelt szintetikus fürdővíz nem volt jótékony hatással a növények levelének növekedésére. Mindhárom tesztnövény esetében minimális, de mégis negatív eltérés figyelhető meg. A rukkola esetében több mint 10%-os negatív eltérést mutatnak az adatok.

4.4.3. Produktum tömeg vizsgálata

A produktum tömegek vizsgálata során a hidropóniából kivett növények tömegét mértem a gyökér eltávolítása után. Az eredményeket átlagoltam és diagramban ábrázoltam. A produktum tömege fontos mutató a termesztett növény kereskedelmi forgalomba kerülése tekintetben is.

A legnagyobb produktummal kiemelkedően a kínai kel rendelkezett. A kínai kel esetében negatív eltérés figyelhető meg az ivóvízzel nevelt növényekhez képest. A másik két növény (rukkola, Lollo Rosso saláta) esetén a kezelt földvízzel öntözött minták nem túl nagy mértékű, de mégis pozitív eltérést mutattak.



3. diagram Átlag produktum tömeg összehasonlítása

A produktum tömegekből kiindulva hidropóniás termesztésre egyértelműen a kínai kel a legalkalmasabb növény, melyet a Lollo Rosso Saláta majd a rukkola követ.



12. ábra Kínai kel levelek

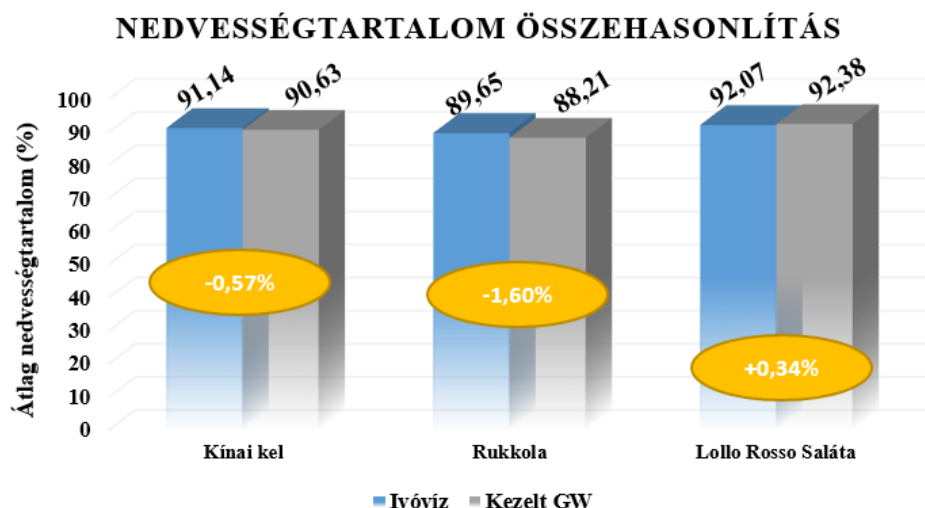
4.4.4. Nedvességtartalom vizsgálata

A növényi minták nedvességtartalmát számítás útján állapítottam meg. Ehhez szükségem volt a növények nedves és száraz biomassa tömegeire. A hidropóniából kivett növények tömegét lemértem, majd ezt követően szárítószekrénybe helyeztem a mintákat. A kíméletesen tömegállandóságig szárított növényi mintákat újra lemértem majd a két tömeg értékből kiszámítottam a nedvesség tartalmát.



13. ábra Szárított Lollo Rosso saláták

Az általam vizsgált növények, mint már említettem a saláta- és káposzta félék családjába tartoznak. Ezekre a növényekre jellemző a magas nedvességtartalom. Anyagösszetételük nagy részét víz alkotja és csak csekély része a tényleges szárazanyagtartalom (beltartalom, rostok és egyéb növényi alkotók).



4. diagram Nedvességtartalom összehasonlítás

Az öntözővizek függvényében az eltérések szinte elhanyagolhatóak. Méréseim azonban alátámasztották a saláta-káposzta félék családjába tartozó növények magas nedvességtartalmát leíró szakirodalmak állításait.

4.4.5. Fogaszthatóság vizsgálata

A nehézfémek a termesztett kínai kel, Lolla Rossa salátá és rukkola fogyasztásából adódó egészségügyi kockázatait az ún. *egészségkockázati index (HRI)* és a *veszélyességi célhányados (THQ)* elemzése alapján végeztem el.

Releváns, hogy az ivóvízzel öntözött növények fogyaszthatók, ebből adódóan csak a kezelt szintetikus fürdővízzel öntözött növényeket vizsgáltam. A számításokhoz az elemanalitikai vizsgálatok során detektált nehézfémek koncentráció értékeit használtam fel, mely eredményeket a 9. táblázat szemléltet. Néhány fém esetében méréshatár alatti eredményt detektáltam, ez esetben a méréshatár koncentráció értékét vettem alapul.

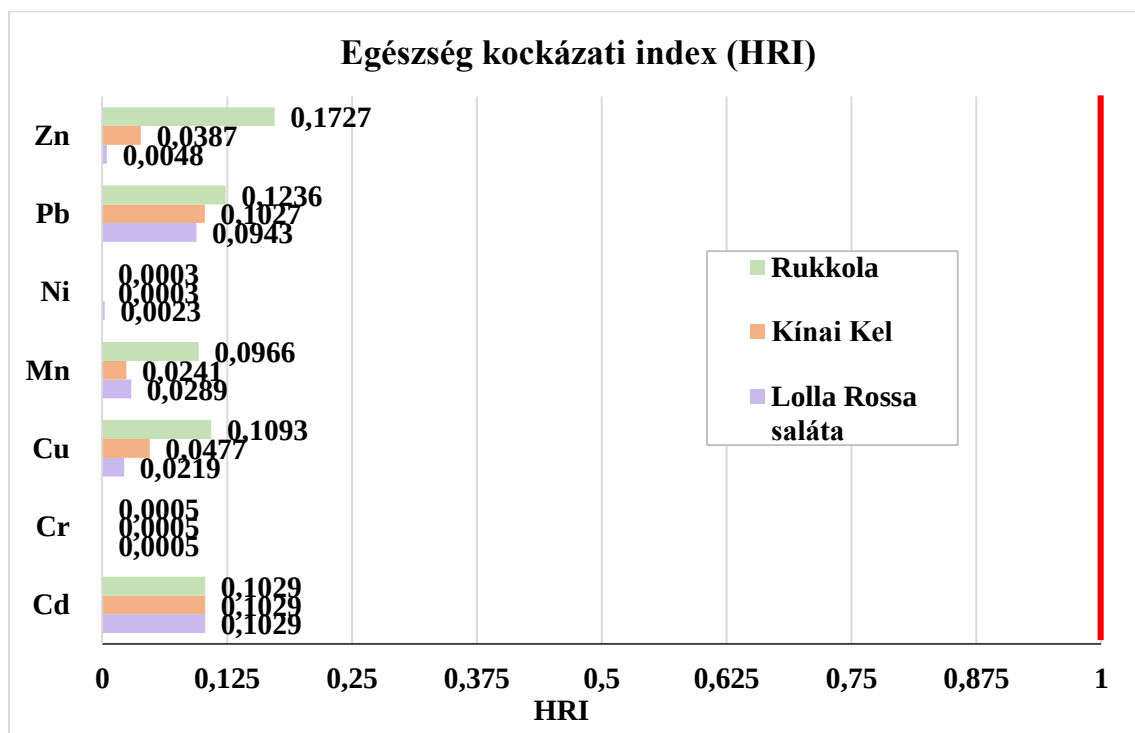
9. táblázat Szintetikus fürdővízzel öntözött növények nehézfém koncentrációja

Vizsgált növények	Nehézfém koncentráció (mg/kg)						
	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
Lolla Rossa saláta	<1,1084	<0,0148	9,4424	43,5580	0,5028	3,5532	15,3470
Kínai kel	<1,1084	<0,0148	20,5504	36,3498	<0,054	3,8693	125,0516
Rukkola	<1,1084	<0,0148	47,0717	145,6706	<0,054	4,6606	558,0273

4.4.5.1 Egészségkockázati index (HRI) vizsgálata

A HRI értéke minden vizsgált növényre nézve 1 alatt volt, ami azt mutatja, hogy a növények fogyasztásából eredő közegészségügyi kockázat az adott feltételek mellett nagyon alacsony (5. diagram, 10. táblázat). A legmagasabb indexel a rukkola rendelkezett ami a Zn esetén 0,1727.

5. diagram Egészségkockázati index (HRI) értékei a vizsgált növények esetén



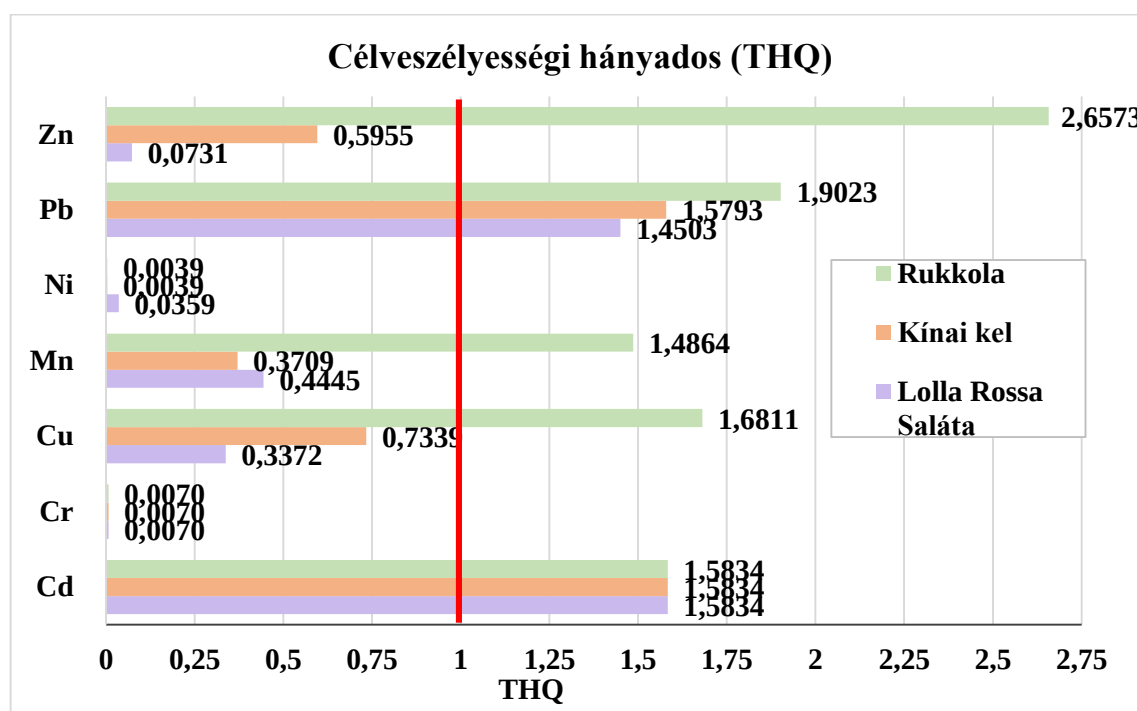
10. táblázat Egészségkockázati indexek eredménye

Vizsgált növények	Egészségkockázati index (HRI)						
	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
Lolla Rossa saláta	0,1029	0,0005	0,0219	0,0289	0,0023	0,0943	0,0048
Kínai kel	0,1029	0,0005	0,0477	0,0241	0,0003	0,1027	0,0387
Rukkola	0,1029	0,0005	0,1093	0,0966	0,0003	0,1236	0,1727

4.4.5.2 Célvesélyességi hányados (THQ) vizsgálata

A célvesélyességi hányados esetén viszont egyértelműen elmondható, hogy egyes növények fogyasztása egészségügyi kockázatot jelenthet. Az eredményeket a 11. táblázat tartalmazza és a 6. diagramm szemlélteti.

6. diagram Célveszélyességi hányados (THQ) értékei a vizsgált növények esetén



A rukkola THQ-értékei minden nehézfém esetében 1->nél nagyobb értéket mutattak, azaz fogyasztása egészségügyi kockázat szempontból aggályosnak tekintendő. A kínai kel és a Lolla Rossa saláta fogyasztása az ólom és a kadmium esetén számított THQ-értékek alapján jelent kockázatot.

A célveszélyességi hányados vizsgálata során több számítást is végeztem az expozíciós gyakoriság (EF) növelésével (1,3,7 alkalom/hét). Az 11. táblázatban látható eredményeket összevetve megállapítottam, hogy a THQ értékek nem változtak, mivel az átlagos expozíciós idő (AT) is ezzel egyenes arányosan változott, ugyanis az átlagos expozíció idő az expozíció időtartamának (ED) és az expozíciós gyakoriságnak (EF) szorzat összege.

11. táblázat THQ vizsgálata az expozíciós gyakoriság növelésével

Vizsgált növények	Célveszélyességi hányados (THQ)						
	Cd	Cr	Cu	Mn	Ni	Pb	Zn
1 ALKALOMMAL TÖRTÉNŐ FOGYASZTÁS/ HÉT							
Lolla Rossa saláta	1,5834	0,0070	0,3372	0,4445	0,0359	1,4503	0,0731
Kínai kel	1,5834	0,0070	0,7339	0,3709	0,0039	1,5793	0,5955
Rukkola	1,5834	0,0070	1,6811	1,4864	0,0039	1,9023	2,6573
3 ALKALOMMAL TÖRTÉNŐ FOGYASZTÁS/ HÉT							

Lolla Rossa saláta	1,5834	0,0070	0,3372	0,4445	0,0359	1,4503	0,0731
Kínai kel	1,5834	0,0070	0,7339	0,3709	0,0039	1,5793	0,5955
Rukkola	1,5834	0,0070	1,6811	1,4864	0,0039	1,9023	2,6573
7 ALKALOMMAL TÖRTÉNŐ FOGYASZTÁS/ HÉT							
Lolla Rossa saláta	1,5834	0,0070	0,3372	0,4445	0,0359	1,4503	0,0731
Kínai kel	1,5834	0,0070	0,7339	0,3709	0,0039	1,5793	0,5955
Rukkola	1,5834	0,0070	1,6811	1,4864	0,0039	1,9023	2,6573

5. Következtetések, javaslatok

Több éves kutatómunkám során a szintetikus fürdővíz kezelési megoldásait és újrahasznosítási lehetőségeit vizsgáltam. A kezelésként alkalmazott koagulációs-flokkulációs módszer szűréssel kiegészítve elégséges eredményt mutatott a kezelt víz vizsgált paramétereit alapján. Az (EU) 2020/741 rendeletében megfogalmazott vízminőségi jellemzőknek a kezelt szürkevíz megfelelt, míg az USEPA korábbi szabályozását csak részben (zavarosság) teljesíti. Mikrobiológiai vízminőségi jellemzőket a szintetikus, azaz modellvíz használat miatt nem vizsgáltam. A hidropóniás növénytermesztés jó alternatívát jelenthet a szürkevíz újrahasználatára, mint a részletezett eredmények is mutatják. Az ivóvízhez hasonlítva a növények külső tényezői jelentős eltérést nem mutattak, közel azonos eredmények születtek a szürkevízzel öntözött növények esetében is.

A kutatás kiemelt célja a fogyaszthatóság vizsgálata volt. A kapott adatok, számított kockázati indexek csak részben adnak iránymutatást a későbbi valós fogyasztáshoz, mivel szintetikus fürdővízzel, azaz modellvízzel dolgoztam, melyben a mikrobiológiai szereplők hatását nem volt módom tanulmányozni. Ettől függetlenül elmondható, hogy a fogyaszthatóság vizsgálatára felhasznált ún. célveszélyességi hányados (THQ) és az egészségkockázati index csak a rukkola esetében jelent teljes mértékben egészségügyi szempontból aggodalmat. Az ólomra és a kadmiumra számított értékek minden növény esetében a határértéknél, 1-nél nagyobbak voltak, azonban a Cd esetén csak további pontos elemanalitikai vizsgálatokat követően mondható pontos eredmény, mivel a számítást ezen elem esetében a kimutatási határ felhasználásával végeztem el. A valós egészségügyi kockázat tanulmányozására értelemszerűen ismételt és szélesebbkörű vizsgálatok szükségesek.

Megállapítottam, hogy a termesztett növények jól fejlődtek a hidropóniás toronyban, azonban a rukkola esetében mind külső tényezők, mind fogyaszthatóság szempontjából lényegesen negatívabb eredmények adódtak a másik két növényhez képest. A növények fejlődését végig követve a rukkola már a köztes fejlődési idő során is hiánytüneteket mutatott (pl. a levelein). A növénytermesztés során csak az előpalantázás során került sor tápoldat alkalmazásra, mivel a kutatás fő célja a kezelt szürkevíz növénytermesztésre gyakorlat hatásának részletes tanulmányozása volt, bármiféle befolyásoló tényező jelenléte nélkül. A későbbiekben esetlegesen tápoldat alkalmazásával is célszerű lenne az öntözővíz minőségének vizsgálata és a növénytermesztés eredményességének tanulmányozása.

Megállapítottam, hogy a hidropóniás rendszer működtetése és a benne zajló növénytermesztés teljeskörű odafigyelést és szakértelmet igényel, ebből adódóan a napi mérések esetleges automatizálttá tétele megoldást jelenthet a befektetett idő csökkentésére. A torony tartályába szerelhető lenne egy többparaméteres szonda, mely a vízminőségi jellemzőket monitorozhatná és a hozzá csatlakoztatott esetleges vegyszeradagoló (foszforsav adagolása) egység beállíthatná a víz kémhatását. A rendszer számítógép vezérelt verziója további előnyökkel járhat.

6. Összefoglalás

Ahogy a földgáz és kőolaj készleteink sem kifogyhatatlan energiaforrások, úgy a víz sem áll rendelkezésünkre mértéktelen mennyiségben. A Föld számos területén már napjainkban is ivóvíz hiánnyal küzdenek. Az ivóvízhiány mérséklésére már számos módszer áll rendelkezésre, azonban magas árak miatt ezen rendszerek mégsem mindenki számára elérhetőek. A szennyvíz különböző frakcióinak elkülönített gyűjtése, kezelése és esetleges újrahasználata azonban megoldást jelenthet.

Kutatómunkám elején állandó összetételű, változatos térfogatú szintetikus fürdővizet készítettem, melyek kezelésére az elmúlt évek során hatékony megoldást fejlesztettem. A kezelt szintetikus fürdővíz, mint öntözővíz jó alapot teremtett további vizsgálataimhoz, melyet korábban ún. víztoxikológiai (csíráztatási kísérletek) vizsgálatokkal is alátámasztottam.

A vízkultúrák növénytermesztés az 1970-es évek óta határozottan utat tört magának. Számos előnye és hátránya van, azonban a mérleg mégis a pozitívumok felé billen: vízhatékony, alkalmazásával kis helyen nagyobb termésátlag érhető el, illetve kiküszöbölhető a talajszennyezésből adódó élelmiszerfertőzés is. Kutatásomhoz függőleges oszlop elrendezésű hidropóniás torony állt rendelkezésemre, amelybe 3 típusú növényt termesztettem kétféle öntözővíz alkalmazásával. Az ivóvíz a mérések során kontrollként szolgált, mivel napjainkban is elsősorban ivóvízzel történik a növények öntözése. Tesztnövényeknek népszerű saláta- és káposztaféléket választottam.

A mérések során kapott eredmények megmutatták, hogy a kezelt fürdővizek alkalmasak lehetnek öntözési célú felhasználásra. Az öntözővíz pH-jának szinten tartására alkalmazott foszforsav a későbbiekben jó alternatívát jelenthet, mivel jótékony hatása jelen vizsgálatokban a növények gyökerein egyértelműen megmutatkozott. A termesztett növények egészségesnek tűnnek, viszont fogyasztásuk a számított indexek alapján bizonyos mikroelemekre nézve némi kockázatot jelenthet, kifejezett a rukkola esetében. A három növény közül a kínai kel mutatkozott a legalkalmasabbnak hidropóniában történő termesztéshez, mivel a vizsgált növények közül ez a növény rendelkezett a legnagyobb átlagos levélhosszúsággal és produktumtömeggel, illetve a nehézfém-tartalom koncentrációból számított indexeket vizsgálva is kevesebb nehézfém-t akkumulált, mint a másik két növény, ebből adódóan fogyasztása kevesebb kockázattal járhat.

A jövőben jó alternatívát jelenthet egy ilyen szürkevíz kezelő rendszer, melynek bekerülési költsége viszonylag magas, azonban úépítésű épületeknél teljeskörűen alkalmazható lenne, akár a vizsgált hidropóniás megoldásokat alkalmazó közösségi kert öntözésére is.

A jövő generáció számára a legfontosabb gondolatot talán David Brower, környezetvédelmi aktivista fogalmazta meg, melyet mindennapjaink során szem előtt tartva egy szebb és környezettudatosabb világot alakíthatunk ki magunk körül saját magunknak és utódainknak is:

„A Földet nem nagyapáinktól örököltük, hanem unokáinktól kaptuk kölcsön.”



7. Köszönetnyilvánítás

Köszönöm Dr. Bodnár Ildikó, főiskolai tanárnak, témavezetőmnek a dolgozat kialakításában nyújtott segítségét és azt, hogy lehetővé tette, hogy a minták vizsgálatát a Környezetmérnöki Tanszék Víztisztaságvédelmi Laboratóriumában végezzem el.

Szeretnék köszönetet mondani Izbékiné Szabolcsik Andrea tanársegédnek, aki társtémavezetőként aktívan és odaadóan segített a vizsgálatok elvégzésében és a dolgozat kialakításában.

Köszönöm Dr. Baranyai Edinának és Sajtos Zsófinak, hogy a vízminták és a növényminták elemzését a Debreceni Egyetem, Szervetlen és Analitikai Kémiai Tanszék Környezetanalitikai Laboratóriumában végezhettem és hogy ezen vizsgálatok elvégzésében segítséget nyújtottak.

„JELEN DOLGOZAT A KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS MINISZTERIUM ÚNKP-22-1 KÓDSZÁMÚ ÚJ NEMZETI KIVÁLÓSÁG PROGRAMJÁNAK A NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI ÉS INNOVÁCIÓS ALAPBÓL FINANSZÍROZOTT SZAKMAI TÁMOGATÁSÁVAL KÉSZÜLT.”



8. Irodalomjegyzék

- [1] Központi statisztikai hivatal, “Fenntartható fejlődési célok.” <https://www.ksh.hu/sdg>.
- [2] Y. Boyjoo, V. K. Pareek, and M. Ang, “A review of greywater characteristics and treatment processes,” *Water Sci. Technol.*, vol. 67, no. 7, pp. 1403–1424, 2013, doi: 10.2166/wst.2013.675.
- [3] M. Pidou, F. A. Mamon, T. Stephenson, B. Jefferson, and P. Jeffrey, “Greywater recycling: Treatment options and applications,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Eng. Sustain.*, vol. 160, no. 3, pp. 119–131, 2007, doi: 10.1680/ensu.2007.160.3.119.
- [4] F. Kalmár, *Fenntartható energetika megújuló energiaforrások optimalizált integrálásával*. 2014.
- [5] EUR-LEX, “A Tanács irányelve (1991. május 21.) a települési szennyvíz kezeléséről (91/271/EGK),” 1991. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/?uri=celex%3A31991L0271>.
- [6] E. U. H. Lapja, “AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS (EU) 2020/741 RENDELETE (2020. május 25.) a víz újrafelhasználására vonatkozó minimumkövetelményekről.” <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HU/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0741&from=EN>.
- [7] G. P. Winward *et al.*, “A study of the microbial quality of grey water and an evaluation of treatment technologies for reuse,” *Ecol. Eng.*, vol. 32, no. 2, pp. 187–197, 2008, doi: 10.1016/j.ecoleng.2007.11.001.
- [8] E. P. Nancy Stoner, Lek Kadeli, “EPA Guidelines for Water Reuse U.S. Environmental Protection Agency,” *Guidel. water reuse*, no. September, p. 643, 2012.
- [9] T. Dániel, “A KÖZETGYAPOTOS PAPRIKAHAJTATÁS EGYES TECHNOLÓGIAI ELEMEI ÉS ÖKONÓMIAI ÖSSZEFÜGGÉSEI-DOKTORI ÉRTEKEZÉS,” 2006.
- [10] H. M. Resh, *Hydroponic food production. A definitive guidebook of soilless food-growing methods*. Santa Barbara, California: Woodbridge Press Publishing Company, 1995.
- [11] TARJÁNYINÉ S. ZS, *Zöldséghajtatás talaj nélkül-tápoldattal*. 1980.
- [12] F. E. Eregno, M. E. Moges, and A. Heistad, “Treated greywater reuse for hydroponic lettuce production in a green wall system: Quantitative health risk assessment,” *Water (Switzerland)*, vol. 9, no. 7, 2017, doi: 10.3390/w9070454.
- [13] United States Environmental Protection Agency, “Integrated Risk Information System.” <https://www.epa.gov/iris>.
- [14] I. S. A. Pál, Krisztina Dr. Bodnár Ildikó, “Különböző módszerekkel kezelt szintetikus fürdővizek tulajdonságainak és víztoxikológiai hatásának vizsgálata,” 2021.
- [15] A. C. Chávez-mejía, R. Magaña-lópez, J. C. Durán-álvarez, and B. E. Jiménez-cisneros, “International Journal of Environment , Agriculture and Biotechnology (IJEAB),” no. 3, pp. 123–131, 2019, doi: 10.22161/ijeab.

- [16] I. Dr. Bodnár, “OKTATÁSI SEGÉDLET a Vízgazdálkodás- és vízminőség védelem (Szennyvíztisztítás) c. tantárgy laboratóriumi gyakorlatához,” 2022.
- [17] I. Bodnar, A. Szabolcsik, E. Baranyai, A. Uveges, and N. Boros, “Qualitative characterization of household greywater in the northern great plain region of Hungary,” *Environ. Eng. Manag. J.*, vol. 13, no. 11, pp. 2717–2724, 2014, doi: 10.30638/eemj.2014.302.
- [18] Aktivit Kft., “TURB 555-IR műszerleírás,” 2006.
- [19] A. Lós, Réka; Bodnár, Ildikó; Izbékiné Szabolcsik, “Anionaktív detergens tartalom meghatározása szürkevizekben,” [Online]. Available: <https://eda.eme.ro/handle/10598/30314>.
- [20] ISO, “ISO 2271:1989 Surface active agents — Detergents — Determination of anionic-active matter by manual or mechanical direct two-phase titration procedure,” 1989.
- [21] Lós Réka, “Szürkevizek detergens és fémtartalmának vizsgálata,” 2019.
- [22] Z. Sajtos, P. Herman, S. Harangi, and E. Baranyai, “Elemental analysis of Hungarian honey samples and bee products by MP-AES method,” *Microchem. J.*, vol. 149, no. May, p. 103968, 2019, doi: 10.1016/j.microc.2019.103968.

9. Ábrajegyzék

1. ábra WTW TURB555IR nefelométer [saját fotó]	15
2. ábra BOI OXITOP IS 12 manometrikus mérőüvegek [saját fotó]	16
3. ábra Shimadzu TOC-VCPN típusú készülék [saját fotó]	17
4. ábra ANA-detergens meghatározás titrálás fázisai [saját fotó]	18
5. ábra Mikrohullámú plazma atomemissziós spektrométer [saját fotó]	19
6. ábra Magok felvitele a beáztatott közetgyapot kockákra	21
7. ábra Palántanevelés kezdete és vége	21
8. ábra Palántázott növények ültetőkosárba helyezése	22
9. ábra Hidropóniás tornyok a projekt első és utolsó napján	23
10. ábra Elemzésre váró Lollo Rosso saláták	27
11. ábra Kínai kel gyökérhálózata	29
12. ábra Kínai kel levelek	31
13. ábra Szárított Lollo Rosso saláták	31

10. Diagramjegyzék

1. diagram Átlag maximális gyökérhossz összehasonlítása	28
2. diagram Átlag maximális levélhossz összehasonlítása	29
3. diagram Átlag produktum tömeg összehasonlítása	30
4. diagram Nedvességtartalom összehasonlítás	32
5. diagram Egészségkockázati index (HRI) értékei a vizsgált növények esetén	33
6. diagram Célveszélyességi hányados (THQ) értékei a vizsgált növények esetén	34

11. Számítási egyenlet jegyzék

1. egyenlet Célveszélyességi hányados (THQ) [12]	11
2. egyenlet Napi beviteli arány (DIR) [12]	12
3. egyenlet Egészségkockázati index (HRI) [12]	12
4. egyenlet Kezelési hatékonyság (P (%)) [15]	14
5. egyenlet ANA-detergens meghatározása [19]	18
6. egyenlet Elemtartalom koncentrációjának átszámítása mg/l-ről mg/kg koncentrációra .	20

12. Táblázatok jegyzéke

1. táblázat Gyökérrögzítő közegek csoportosítása	8
2. táblázat Nehézfémek referencia dózisa (RfD).....	11
3. táblázat A THQ és HRI számítása során felhasznált értékek	11
4. táblázat BOI bemérési táblázat	17
5. táblázat Toronyba kerülő vizek elemzése.....	24
6. táblázat Kezelési hatékonyságok (+: paraméterbeli csökkenés; -: paraméterbeli növekedés).....	25
7. táblázat Ivóvíz nehézfém tartalma és kezelési hatékonyság.....	26
8. táblázat Toronyba bemenő éskijövő vizek összehasonlítása	26
9. táblázat Szintetikus fürdővízzel öntözött növények nehézfém koncentrációja	32
10. táblázat Egészségkockázati indexek eredménye	33
11. táblázat THQ vizsgálata az expozíciós gyakoriság növelésével	34