

MNB-BME Együttműködés
2020/2021
Zöld Pénzügyek, Zöld Gazdaság Műhely



Műanyag hulladék gyűjtő kialakítása a Duna budapesti szakaszán

Készítették:

Dr. Baranya Sándor
Dr. Simongáti Győző
Dr. Hargitai Csaba
Ermilov Alexander Anatol
Benkő Gergely

Vízgazdálkodás alprojekt

Budapest, 2021

Műanyag hulladék gyűjtő kialakítása a Duna budapesti szakaszán ¹

Az alábbi tanulmány a Magyar Nemzeti Bank és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem közötti együttműködés keretében készült és célja, hogy ismertesse egy folyami műanyag hulladék gyűjtő úszómű kialakítását. Ennek keretében a tanulmányban kitérünk a folyókat érintő műanyag hulladék terhelésének problémakörére nemzetközi és hazai szinten, majd ismertetjük a holland ClearRivers nevű cég által fejlesztett uszadékgyűjtő ponton műszaki kialakítását és a Duna BME Központi épülete előtti partjára telepített prototípusát. A tanulmányban bemutatunk továbbá két tudományos fejlesztést is, amelyek a műanyagterhelés vizsgálatára alkalmasak: i) egy innovatív, mesterséges intelligenciát felhasználó eljárás, ami az uszadékgyűjtőre telepített kamera képei alapján ismeri fel a vízben úszó műanyagokat, és segítségével a jövőben vizsgálható lesz a folyóban utazó hulladék időbeli és területi dinamikája; ii) egy számítógépes áramlástan szimulációs modell, amely képes a vízfelszín közelében utazó tárgyak pályáinak számítására, és ezzel a hulladékcsapda tervezési és üzemeltetési feladatait támogatjuk.

¹ A tanulmány a Magyar Nemzeti Bank és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem között létrejött Együttműködés keretében és finanszírozásával készült a Digitalizáció, mesterséges intelligencia és adatkorszak almuhelyben.

The study was financed in the cooperation of the National Bank of Hungary and Budapest University of Technology and Economics under the Digital Research Project.

Tartalomjegyzék

VEZETŐI ÖSSZEFOGLALÓ	5
1 A FOLYÓKAT ÉRINTŐ MŰANYAG HULLADÉK PROBLÉMÁJA	6
1.1 MŰANYAG HULLADÉKOK SORSA	6
1.1.1 A műanyagokról	6
1.1.2 A műanyag, mint szemét	7
1.1.3 A műanyagok használhatósági ideje	7
1.1.4 Az elhasznált műanyagok sorsa	8
1.2 A FOLYÓKBA JUTÓ MŰANYAGOK MENNYISÉGI ÉS MINŐSÉGI JELLEMZŐI	10
1.3 A DUNA VÍZGYŰJTŐJÉT ÉS MAGÁT A FOLYÓT ÉRINTŐ MŰANYAGSZENNYEZÉS MENNYISÉGI ÉS MINŐSÉGI JELLEMZŐI	12
1.3.1 Duna	13
1.3.2 Tisza	13
1.4 FOLYAMI MŰANYAGVÁNDORLÁS VIZSGÁLATI MÓDSZEREI	16
1.5 JELEN TANULMÁNY CÉLKITŰZÉSE	18
2 A CLEARRIVERS ÁLTAL FEJLESZTETT HULLADÉKGYŰJTŐ KIALAKÍTÁSA	19
2.1 A KÍSÉRLET CÉLJA	19
2.2 A KÍSÉRLET ÁLTALÁNOS LEÍRÁSA	19
2.2.1 A kísérlet helyszíne és numerikus modellezés	20
2.2.2 A kísérletben résztvevő úszóművek	20
2.2.3 A rendszerelemek összeállítása	24
2.2.4 A hulladék időszakos eltávolítása	25
3 MESTERSÉGES INTELLIGENCIA (DEEP LEARNING) FEJLESZTÉSE MŰANYAG HULLADÉK FELISMERÉSÉRE ..	27
3.1 A FEJLESZTÉS CÉLKITŰZÉSE	27
3.2 ELMÉLETI HÁTTÉR – DEEP LEARNING ÉS KONVOLÚCIÓS NEURÁLIS HÁLÓZATOK	28
3.3 INPUT ADATOK	29
3.4 AZ ELJÁRÁS FELÉPÍTÉSE	31
3.5 ANNOTÁLÁS	32
3.6 A TANÍTÁS MENETE	33
3.7 A MODELL ÉRTÉKELÉSE	33
3.8 KÖVETKEZTETÉSEK, FEJLESZTÉSI IRÁNYOK	35
4 SZÁMÍTÓGÉPES SZIMULÁCIÓ	36
4.1 A 3D MODELL HIDRODINAMIKAI ÉS MATEMATIKAI ALAPJAI	36
4.2 A 3D MODELL FELÉPÍTÉSE A PROJEKTTERÜLETRE	38
4.3 A 3D MODELL ALKALMAZÁSA AZ USZADÉKVÁNDORLÁS VIZSGÁLATÁRA	40

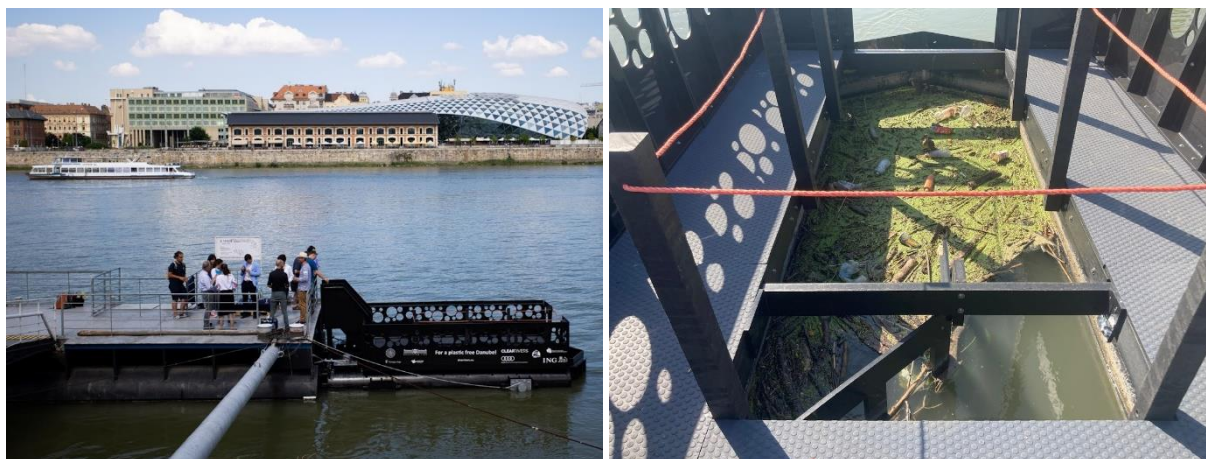
5	ÖSSZEGZÉS.....	43
	IRODALOMJEGYZÉK.....	44
	A SZERZŐKRŐL	46

Vezetői összefoglaló

Kulcsszavak: *műanyag hulladék, Duna, uszadékgyűjtő*

Jelen tanulmány a Magyar Nemzeti Bank és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem közötti együttműködés keretében készült és célja, hogy ismertesse egy folyami műanyaghulladék gyűjtő úszómű kialakítását. A tanulmányban röviden bemutatjuk a folyókat érintő műanyaghulladék terhelésének problémakörét, nemzetközi és hazai szinten egyaránt. A tanulmány legfontosabb elemeként, bemutatjuk a holland ClearRivers nevű cég által fejlesztett uszadékgyűjtő ponton műszaki kialakítását és annak a Duna BME Központi épülete előtti partjára telepített prototípusát. Az uszadékgyűjtő egy meglévő hajókikötő pontonhoz került csatlakoztatásra, és fő célja, hogy a Duna ezen szakaszán a jobb part környezetében vándorló műanyag hulladékot csapdázza (lásd fényképek). A leírásban kitérünk a hulladék eltávolításának módjára is.

A tanulmányban bemutatunk továbbá két tudományos fejlesztést is, amelyek a műanyagterhelés vizsgálatára alkalmasak: i) egy innovatív, mesterséges intelligenciát felhasználó eljárás, ami az uszadékgyűjtőre telepített kamera képei alapján ismeri fel a vízben úszó műanyagokat, és segítségével a jövőben vizsgálható lesz a folyóban utazó hulladék időbeli és területi dinamikája; ii) egy számítógépes áramlástani szimulációs modell, amely képes a vízfelszín közelében utazó tárgyak pályáinak számítására, és ezzel a hulladékcsapda tervezési és üzemeltetési feladatait támogatjuk.



1 A folyókat érintő műanyag hulladék problémája

1.1 Műanyag hulladékok sorsa

1.1.1 A műanyagokról

A műanyagok szintetikus polimerekből állnak, amelyet olajból vagy földgázból nyernek ki. A polimerek hosszú molekulaláncok, amik alapvetően a természetben is jelen vannak, mint például a cellulóz vagy a DNS. Ahogy a természetben is nagyon sokféle polimer létezik, mesterségesen is rengeteg különböző fajtája előállítható. Az első szintetikus, celluloid alapú polimert 1869-ben azért készítették, hogy az elefántcsont anyagát helyettesítsék vele. Az első, teljesen szintetikus műanyagot, a Bakelitet 1929-ben állította elő Leo Baekeland. Ez volt az első olyan mesterséges anyag, amely megfelelőnek bizonyult a tömeggyártásra. Ezt további egyszerűbb szerkezetű műanyagok követték. Az elsőként előállított polimerek közül sokat ma is széleskörűen használnak: 1929-ben megjelent a poliszterén, egy évvel később a poli-vinilclorid (PVC), a polietén 1933-ban, majd a nylon 1935-ben.

A petrokémiai vállalatok hamar felismerték a műanyagokban rejlő hatalmas előnyöket, a második világháború után pedig elindult az addig sosem látott méretű tömegtermelés. Azóta az előállított műanyagok mennyisége folyamatosan nő. A tömegtermelés mellékhatásaként már 1960-ban problémát jelentett a műanyagok hulladékkezelése. A probléma azóta globális méretűvé nőtte ki magát, számos kutató kezdett el és foglalkozik ma is a vizek, elsősorban az óceánok partjain megtalált, évtizedes életkorú, elhagyott műanyagok vizsgálatával. A problémakör folyóinkat is érinti. A Dunában például 2018-ban egy 40 éves tejesdobozra bukkantak, ami a probléma térbeli kiterjedésén túl az időléptékre is felhívja a figyelmet. A folyók és folyópartok szennyezettségére irányuló kutatások csak a közelmúltban kezdtek komolyabb hangsúlyt kapni.



1. ábra: Dunában talált 40 éves tejeszacskó Süttőnél [1].

1.1.2 A műanyag, mint szemét

Azok a monomerek, amelyekből előállítják a műanyagokat (mint például az etilén és a polipropilén), szénhidrogén fosszíliák származékai. A leggyakrabban használt műanyag szemetek közül egyik sem biológiailag lebomló. Emiatt a környezetbe kerülve azzal csak keverednek, lebomlani nem tudnak. A műanyagok semlegesítésének egyetlen elérhető módjai a pirolízis, vagy az égetés. Mivel a műanyag szennyezés állandó, ezek az anyagok egyre jobban és jobban felhalmozódnak a környezetben – ezért is fokozódik a kapcsolódó problémák relevanciája napról napra.

Míg 1950-ben a teljes műanyag és műgyanta termelés mindössze 2 millió tonna volt, 2015-re már elérte az évi 380 millió tonnát. Ez időszak alatt a teljes megtermelt műanyag mennyisége csaknem 7,3 milliárd tonnát tesz ki, amely hatalmas mennyiség felét az utolsó 13 évben termelték. Manapság Kína a műanyag legfőbb termelője – az világ teljes műanyagtermelésének negyedéért felelősek [2].

A megtermelt, nemszálás műanyagok közül a leggyakoribbak a polietilén (PE) 36%, a polipropilén (PP) 21%, a PVC 12%, a PET és a poliuretán (PUR) [2]. 2015-ben a megtermelt nemszálás műanyagok kb. 42%-át (146 millió tonna) a csomagolásra, 19%-át (65 millió tonna) építkezésre használták fel. Az ez évben keletkezett műanyag szemét 54%-a volt csomagolásból és csak 5% az építkezésekből származó hulladék.

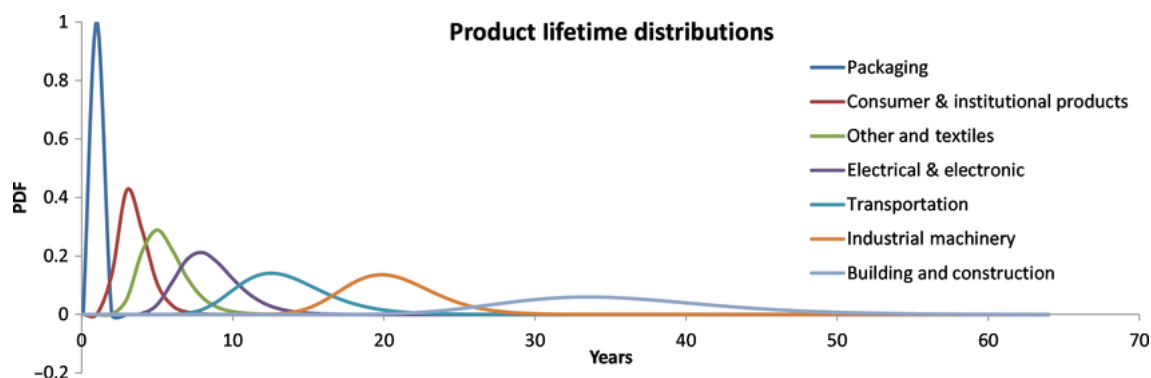


2. ábra: Egy vízpart melletti szemétlerakó Kínában.

1.1.3 A műanyagok használhatósági ideje

2015-ben 407 millió tonna műanyag lépett be a felhasznált anyagok körébe, míg a keletkező hulladék 302 millió tonna volt [2]. Ez a „deficit” jól mutatja, hogy az egyes műanyagok, illetve műanyag termékek felhasználhatósági ideje eltérő, így a keletkező hulladék és a használatba lépett műanyag mennyisége évről évre változik. A csomagolásban használt műanyagokból például általában már az adott évben

szemét lesz, míg az építkezéseken használt műanyagok jellemzően csak évtizedek múlva válnak hulladékká.



3. ábra: Műanyag termékek élettartamának eloszlása. A hullámhegyekhez tartozó görbék az x tengely szerinti növekvő sorrendben: csomagolás, fogyasztói és intézményi termékek, textil és egyéb, elektromos és elektronikus, közlekedés, ipar és gépgyártás, épületek és építkezés [3].

1.1.4 Az elhasznált műanyagok sorsa

2015-ig az elsődlegesen nemszálas műanyagból származó szemét mennyisége 5,8 milliárd tonna volt. A műanyag hulladékoknak három lehetséges sorsa van [2]. Az első, hogy újrahasznosítják, vagy feldolgozzák még egyszer, másodlagos anyagként. Az újrafeldolgozás inkább csak késlelteti, mintsem megakadályozza a műanyagok végső deponálását. Az újrahasznosítás akkor tudná érdemben csökkenteni a keletkező műanyag szemét mennyiségét, ha az újrahasznosítás eredményeként a műanyag iránti igényeket mennyiségi és minőségi értelemben is ki lehetne elégíteni. Mivel azonban a műanyagok szerkezete idővel átalakulhat, illetve maga az anyag szennyeződik, ezért az újrahasznosított műanyag korlátozott, vagy alacsony gazdasági és nyersanyagi értékkel bír. Az újrahasznosított műanyagok az esetek csak nagyon kis részében helyettesítik a nyers (újonnan készített) műanyagot.

A második a műanyagok megsemmisítése hőközléssel. Habár vannak már feltörekvő technológiák, mint a pirolízis, amely üzemanyagot von ki a műanyagokból, az esetek nagyrésztében mégis a hőközléssel megsemmisített műanyagokat elégetik, energia visszanyeréssel, vagy anélkül. A budapesti szemétegető például exoterm, annak hulladékhőjéből Káposztásmegyer lakásait tudják fűteni. Az effajta égetések egészségre vonatkozó hatását nagymértékben meghatározza a keletkező gázok megszűrésének alapossága, valamint az üzem szakszerű működtetése. Ismét példának felhozva a budapesti szemétegetőt, korszerű rendszerekkel szűrik ki a kommunális hulladék elégetése során keletkező nitrogén-tartalmú és egyéb, veszélyes gázokat.

ahol műanyagok további millió tonnái fognak szabályozatlanul belekeveredni a földi és a vízi ökoszisztémákba. Emiatt tehát kiemelt figyelmet kell, hogy kapjon a műanyagok összegyűjtése, ártalmatlanítása, helyettesítése, újra használása és energiává alakítása. Fontos tehát minden tudományos és technológiai újítás alkalmazása, melyekkel a műanyagtermelés és újrahasznosítás környezeti szempontból optimalizálható, illetve amelyek a környezeti hatások mérséklését segítik.



5. ábra: Új-Delhi Taimur Nagar kerülete 2018-ban [4]. Internetes „műanyag szennyezésre” történő keresés esetén a legtöbb képen vizeket, vízpartokat láthatunk. Erre látunk egy jó példát a fenti képen is.

1.2 A folyókba jutó műanyagok mennyiségi és minőségi jellemzői

Becslések szerint a tengerekbe jelenleg 1,15 és 2,41 millió tonna műanyag szemét kerül évente, ennek 74%-a május és október között. A 20 legjobban szennyező folyó többsége Ázsiában található. Ezek a folyók a világtengerekbe kerülő műanyagoknak a 67%-ért felelősek [5].

Sok tanulmány foglalkozik a tengerekbe és óceánokba kerülő szemetekkel, viszont a folyókba kerülő szemét útjával lényegesen kevesebb. Csak nagyon kevés helyi tanulmány vizsgálta az édesvizekbe kerülő műanyagok sorsát [5]. Ezeknek a tanulmányoknak is a nagyobb része az üledékben található mikroműanyagokkal (5 mm-nél kisebb) és a vizek minőségével foglalkozott elsősorban.

A különböző kutatások rávilágítottak arra, hogy az édesvíz szennyezettsége függhet a vízgyűjtő népsűrűségétől, az urbanizáció fokától, az ipari létesítményektől, a csapadékgörbétől, és a különböző mesterséges vízi létesítményektől (gátak, vízduzzasztók). Európában a Duna esetén megállapították,

hogy az évente 530-1500 tonna műanyagot szállít a Fekete-tengerbe. Egy másik tanulmány a Rajna folyót vizsgálta, mely évi 20-31 tonna műanyagot szállított és szállít jelenleg is a Balti tengerbe [5].

A folyók felszínén található műanyag mennyisége általában a népsűrűséggel egyenesen arányos [5]. Dél-Amerikai folyóknál (Elpoi, Maipo, Biobio, Maule) 0,05-0,74 részecske volt köbméterenként a vízben. A Kínában felszíni mintavételezett Kék folyó (Yangtze) esetében az egy köbméterben található műanyag részecskék száma 4137 volt [5].



6. ábra: A Yangtze és az Indonéziai Citarium folyók. Mindkettő a világ legszennyezettebb folyói közé tartozik. A Citarium annyira szennyezett, hogy a víz felszíne nem is látszódik az azt belepő műanyagoktól.

A világ 20 legszennyezőbb folyója hordja a világtengerbe a hulladék 67%-át. Ezeknek a folyóknak a vízgyűjtőterületén él a föld lakosságának a 21%-a. A Föld 122 legszennyezettebb folyók közül 105 Ázsiában, 8 Afrikában, 8 Latin-Amerikában, és egy Európában található. A szennyezett folyók többsége nagy vízgyűjtőterületű és a fejlődő országokban található [5]. A mikroműanyagok mennyiségét tekintve a Jangtze van az első helyen. Ennek a folyónak a vízgyűjtőterületén élnek a legtöbben. A folyóból a Kínai tengerbe szállított műanyag mennyisége évi 0,33 millió tonna. A második helyen áll a Gangesz, melynek vízgyűjtőterületén szintén nagyon sok ember él. A folyó India, valamint Banglades hulladékát szállítja az Indiai óceánba – évi 0,12 millió tonnát. Afrika folyói évente 109.000 tonna

hulladékot szállítanak és bocsájtják ki az óceánokba, míg Dél-Amerika folyói 67.400 tonnát. Észak-Amerikában 13.400, Európában 3.900 tonna a tengerekbe úsztatott szemét éves mennyisége [5].

A folyók hulladékszennyezettsége szezonális változékonyságot mutat, valamint nagymértékben éghajlatfüggő is. Általánosságban elmondható, hogy – az adott folyóra jellemző – nagyobb vízhozamok esetén, a szállított hulladék mennyisége megnő. Ez analóg a folyókban természetesen jelen lévő lebegtetett hordalékkal – ahogy a folyó kilép a medréből, magával ragadja a hullámtéren lerakódott hordalékot és az ott összegyűlt/lerakódott hulladékot egyaránt (pl. [6]). Kelet-Ázsiában a monszun idején jelentkezik ez az időszak. A Jangce folyó hulladékszállítása júliusban tetőzik, 76.000 tonna műanyaggal a hónapban. A Gangesznél ez a tetőzés augusztusra esik.

1. táblázat: A világ 20 legszennyezettebb folyója a beléjük kerülő műanyag mennyisége alapján.

Catchment	Country	Lower mass input estimate (t yr ⁻¹)	Midpoint mass input estimate (t yr ⁻¹)	Upper mass input estimate (t yr ⁻¹)	Total catchment surface area (km ²) ²¹	Yearly average discharge (m ³ s ⁻¹) ²¹
Yangtze	China	3.10 × 10 ⁵	3.33 × 10 ⁵	4.80 × 10 ⁵	1.91 × 10 ⁶	1.58 × 10 ⁴
Ganges	India, Bangladesh	1.05 × 10 ⁵	1.15 × 10 ⁵	1.72 × 10 ⁵	1.57 × 10 ⁶	2.08 × 10 ⁴
Xi	China	6.46 × 10 ⁴	7.39 × 10 ⁴	1.14 × 10 ⁵	3.89 × 10 ⁵	5.53 × 10 ³
Huangpu	China	3.35 × 10 ⁴	4.08 × 10 ⁴	6.73 × 10 ⁴	2.62 × 10 ⁴	4.04 × 10 ²
Cross	Nigeria, Cameroon	3.38 × 10 ⁴	4.03 × 10 ⁴	6.5 × 10 ⁴	2.38 × 10 ³	2.40 × 10 ²
Brantas	Indonesia	3.23 × 10 ⁴	3.89 × 10 ⁴	6.37 × 10 ⁴	1.11 × 10 ⁴	8.18 × 10 ²
Amazon	Brazil, Peru, Columbia, Ecuador	3.22 × 10 ⁴	3.89 × 10 ⁴	6.38 × 10 ⁴	5.91 × 10 ⁶	1.40 × 10 ⁵
Pasig	Philippines	3.21 × 10 ⁴	3.88 × 10 ⁴	6.37 × 10 ⁴	4.07 × 10 ³	2.07 × 10 ²
Irrawaddy	Myanmar	2.97 × 10 ⁴	3.53 × 10 ⁴	5.69 × 10 ⁴	3.77 × 10 ⁵	5.49 × 10 ³
Solo	Indonesia	2.65 × 10 ⁴	3.25 × 10 ⁴	5.41 × 10 ⁴	1.58 × 10 ⁴	7.46 × 10 ²
Mekong	Thailand, Cambodia, Laos, China, Myanmar, Vietnam	1.88 × 10 ⁴	2.28 × 10 ⁴	3.76 × 10 ⁴	7.74 × 10 ⁵	6.01 × 10 ³
Imo	Nigeria	1.75 × 10 ⁴	2.15 × 10 ⁴	3.61 × 10 ⁴	7.92 × 10 ³	2.79 × 10 ²
Dong	China	1.57 × 10 ⁴	1.91 × 10 ⁴	3.17 × 10 ⁴	3.33 × 10 ⁴	8.54 × 10 ²
Serayu	Indonesia	1.33 × 10 ⁴	1.71 × 10 ⁴	2.99 × 10 ⁴	3.71 × 10 ³	3.70 × 10 ²
Magdalena	Colombia	1.29 × 10 ⁴	1.67 × 10 ⁴	2.95 × 10 ⁴	2.61 × 10 ⁵	5.93 × 10 ³
Tamsui	Taiwan	1.16 × 10 ⁴	1.47 × 10 ⁴	2.54 × 10 ⁴	2.68 × 10 ³	1.08 × 10 ²
Zhujiang	China	1.09 × 10 ⁴	1.36 × 10 ⁴	2.31 × 10 ⁴	4.01 × 10 ³	1.33 × 10 ²
Hanjiang	China	1.03 × 10 ⁴	1.29 × 10 ⁴	2.19 × 10 ⁴	2.95 × 10 ⁴	7.35 × 10 ²
Progo	Indonesia	9.80 × 10 ³	1.28 × 10 ⁴	2.29 × 10 ⁴	2.24 × 10 ³	2.79 × 10 ²
Kwa Ibo	Nigeria	9.29 × 10 ³	1.19 × 10 ⁴	2.08 × 10 ⁴	3.63 × 10 ³	1.92 × 10 ²

Input rate estimates (in t yr⁻¹) are representative of mismanaged plastic waste (MPW) production and catchment runoff. A lower, midpoint and upper estimate is calculated based on three regression analyses accounting for uncertainties in our field observations data set.

1.3 A Duna vízgyűjtőjét és magát a folyót érintő műanyagszennyezés mennyiségi és minőségi jellemzői

Míg sok szakcikk és tanulmány foglalkozik a világtengerek és a nagyméretű folyamok szennyezettségével, kevesebb figyelmet fordítottak eddig a közepesebb és kisebb méretű folyókra, pedig a műanyagok nagy részét ezek a vízfolyások szállítják be a folyamokba, illetve tengerekbe. A modern európai hulladékkezelés és az egyre szélesebb körű újrahasznosítás ténye, fontossá teszik a Duna vízgyűjtőjén található műanyag és mikroműanyag szennyezettséget érintő behatóbb vizsgálatokat.

A Dunában található szennyezőanyagok jellemzően kétféle módon jutnak be a folyóba. Ipari tevékenységből, illetve az ártérről, ahol az illegális szemétkerakás és a hiányos hulladékkezelés miatt halmozódik fel a szemét [7]. A specifikus kihívás, amivel jelenleg a Duna-régió szembe néz, az a

határokon átívelő folyószennyezés, beleértve a műanyagot, a veszélyes anyagokat és az Európai Unió területén kívülről érkező szemetet, mint a Bodrog és a Tisza esetében. Ezeknél a folyóknál az Európai Uniót kívül (Ukrajnában) esik a szennyezések elsődleges forrása. A Duna régióban nemrég elkezdődtek a műanyag mennyiségi és minőségi meghatározására irányuló mérések a folyókban. Az eddigi műanyagtisztítási tervek kidolgozását mostanáig az hátráltatta, hogy a következetesen rögzített, hosszú idősorok még hiányoztak.

1.3.1 Duna

Az első szakirodalmi példa, ahol a Dunában található műanyagokkal foglalkoztak, 2014-ben jelent meg, ahol is a Duna bécsi szakaszát vizsgálták [8]. A kutatás fő célja a folyó által szállított műanyagokat osztályozása, illetve mennyiség meghatározása volt. Ebben a dunai felmérésben köbméterenként 17 műanyag darabot találtak. A műanyagok nagyrésze ipari eredetű volt. A kutatók megállapították, hogy a Duna napi 4,2 tonna műanyagot szállít a Fekete-tengerbe.

Ezt követte egy ultrahang alapú mikroműanyag kutatás 2014-ben, amelyben kiszámolták, hogy Hainburgban 41 tonna/év műanyag szállítódik. Ez a kutatás rámutatott arra, hogy a folyókban szállított mikroműanyag mennyiséget célszerű a folyó teljes keresztmetszetében vizsgálni, ugyanis az igen kis részecskék, lebegtetett formában „átkeveredve” vannak jelen a vízben. A gyűjtött anyagok kb. 10%-a volt egyértelműen ipari eredetű műanyag. A Duna ausztriai szakasza és annak a vízgyűjtője csak az ipari szennyezést figyelembe véve három fő műanyagbeeresztőt tartalmaz és 560 olyan üzem, amely műanyagot bocsájt ki valamilyen formában. A folyóban található műanyagok döntő része (a maradék 90%) elsősorban hozzáfolyással jut a folyóba, amik főleg szemeteléssel kerülnek bele, vagy a szél belefújja a folyóba, vagy belefolyanak a közterületekről. A mintavevőhelytől nem messze, Hainburgban halakat is bevontak a kísérletekbe – megvizsgálták, hogy a gyomrukban található-e műanyag hulladék. A vizsgált 30 halból egyben sem találtak erre utaló nyomokat. Hasonló mérést csináltak a felső-Duna ausztriai részén, és a 840 halból csak kettőben találtak műanyag részecskéket.

Magyarországon először Budapesten végeztek mikroműanyag részecske mérést a Dunában. A Megyeri híd szelvényében az egy köbméterben levő részecskék száma 45 volt, míg a Csepeli szabadkikötőben 55 [7]. Ez is azt mutatja, hogy a fővárosból jelentős műanyag szivárog be a Dunába. Ez azzal magyarázható, hogy a nagyszámú lakosság akarva akaratlanul is nagymennyiségű szemetet bocsájt ki, aminek egy része óhatatlanul a folyóban köt ki.

1.3.2 Tisza

Magyarország második legnagyobb folyója a Tisza. Ezzel a folyóval is kiemelten kell foglalkozni, ugyanis a tiszai árvizek jellemzően nagyon sok műanyagot szállításával is járnak [9]. A műanyag elsősorban a folyó Romániai és Ukrajnai vízgyűjtő területéről érkezik, ahol a hulladékkezelés sajnálatos módon még

gyermekcipőben jár. Emiatt ezeken a településeken a lakosok sokszor az ártéren rakják le a szemetet, amit a nyári, vagy tavaszi árhullámok alkalmával magával ragad a medréből kilépő folyó. Az árhullám levonulása után szintén a műanyag nagy része szintén az ártéren rakódik le, ezúttal már a folyó alsóbb szakaszain, óriási környezeti károkat okozva ezzel. A 2017-es jegesár után több mint 2400 tonna hulladék maradt a hullámtéren, míg a 2019-es évben még egy ennél is nagyobb méretű műanyagözön jött. A becslések szerint 600 tonnával, meghaladta a 2017-est, azaz 3000 tonna műanyag rakódhatott le az ártérben.

Pozitívként említhető meg, hogy a nagy szennyezések ellenére, illetve azok hatására ezen a folyón megindultak különböző civil kezdeményezések is az árterek megtisztítása és tisztán tartása érdekében. Az egyik leghíresebb, a PET Kupa Program [10], ami immár 6 éve küzd a szennyezés ellen és kutatja a megoldási lehetőségeket. Sőt, Ukrajnáig is elért a kezdeményezés, amivel megpróbálják megállítani a szennyezést a Tisza és a Bodrog forrásvidékénél.



7. ábra: Műanyagtenger a Tiszán a 2017-es jegzajlás alkalmával [11].



8. ábra: Plasztikcunami (2008) – a vízügy teljes meder-zárat rendelt el. A vízről, markolókkal termelték le a szennyezés nagy részét. Az Európai Unióban gyártott műanyag 51%-a kerül csak a hulladékáramba, a többi a felhasználóknál marad, illetve a környezetbe jut [11].

2017-ben mikroműanyag mérést is végeztek a Tiszán [7]. A mérési eredmények alapján megállapították, hogy egy köbméter vízben 4,9 db 300 pikométernél nagyobb, illetve 23,1 db 100 pikométernél nagyobb részecske volt. A műanyag nagyrésze polietilén, polipropilén vagy poliszterén volt.



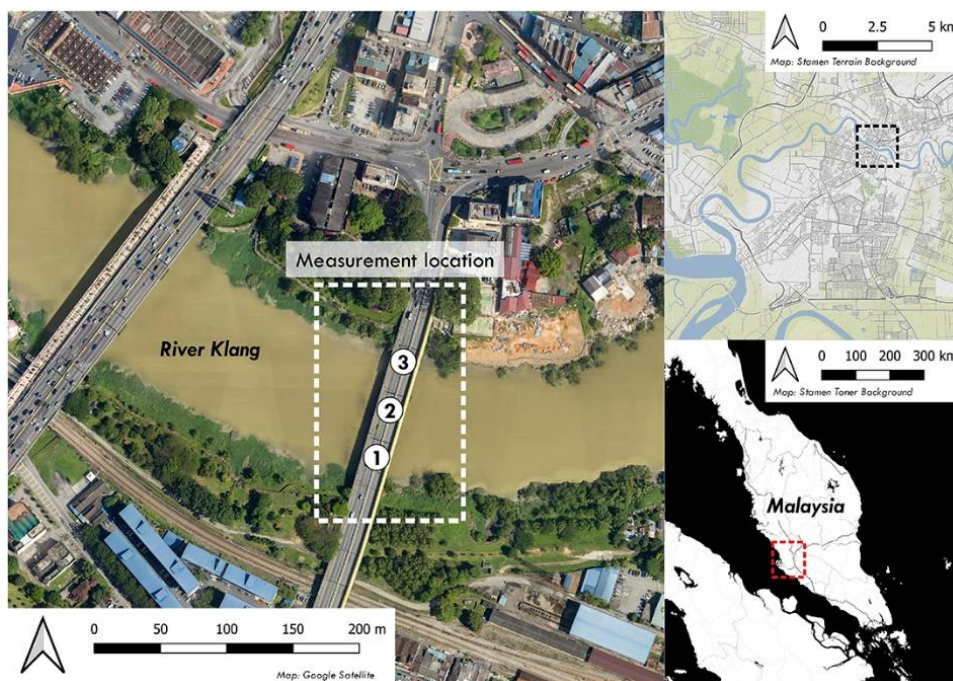
9. ábra: 2018-ben Csepelnél a Dunából kihúzott 1200-es Lada. A gépjármű a kihúzáskor is tele volt műanyag hulladékkal. A folyószennyezés ilyen formájára erre ez csak egy példa [12].

1.4 Folyami műanyagvándorlás vizsgálati módszerei

A témakörnek – annak újszerű mivolta miatt – jellemzően nemzetközi szakirodalma van csak, és az sem túl kiterjedt. A műanyag folyóban való vándorlásának vizsgálatát célszerű a felszínen úszó műanyagok mennyiségének feltárásával indítani, hiszen a műanyagok nagy része – a vízhez viszonyított kis sűrűségük miatt – a folyók felszínén úszva transzportálódnak [13, 14]. A felszínen úszó műanyagokon túl, jelen lehet a folyókban a műanyag lebegtetett formában is – jellemzően kellően kis részecskeméreteken. Ilyenkor a víz és a részecske felülete között fellépő adhéziós erő, valamint a belső súrlódási erő nagysága nagyobb, mint a felhajtóerőé.

A vizsgálati módszereknél jelenleg két fő csoportot különböztethetünk meg [14]. Az első a vizuális, emberi megfigyelésen alapuló számolás. Ennek a módszernek az előnye, hogy viszonylag jól el lehet különíteni a műanyagokat és az egyéb uszadékokat, továbbá fel lehet mérni a folyónak a közvetlen környezetét, és már a helyszínen további következtetéseket lehet levonni belőlük. A módszer azonban élőmunka- és időigényes, ezért hosszú időtartamú megfigyelésekre nem alkalmazható. Malajziában volt példa ilyen mérésre, amikor egyetemistákkal mérték a Kuala Lumpur-i Klang folyón a lebegtetett műanyag mennyiségét [13].

A folyókban úszó műanyagok mennyisége meghatározható továbbá közvetlen méréssel is – például a folyóba eresztett hálóval. Ilyenkor meghatározott időközönként kihúzzák a hálót és megszámolják a csapdába ejtett darabokat. Habár ennél a módszernél nagyon pontosan meg lehet határozni a műanyag mennyiségét, ez a módszer különösen élőmunkaigényes, ráadásul a folyó felszínének csak egy kis részén alkalmazható. A háló kifeszítése elég körülményes, ha rossz a rögzítés, akkor az uszadékok inkább kikerülnek a hálót. Hátrányai miatt a módszer szintén nem alkalmas hosszú távú megfigyelésekre.



10. ábra: A Kuala Lumpur-i Klang folyón végzett mérési terület helyszínrajza [13].

Napjainkban a vizuális emberi megfigyelő által végzett „mérések” kiváltásra egyre gyakrabban alkalmaznak fénykép, illetve videó alapú eljárásokat. Az ilyen módszerek egyik nagy előnye, hogy hosszú időtartamokra lehet a vizsgálatot elvégezni, valamint algoritmizálhatóvá válik az eredmények feldolgozása is. Az ilyen objektumfelismerésen, illetve számoláson alapuló feladatok leghatékonyabb automatizálására különböző mesterséges intelligencia-alapú algoritmusok kínálnak alternatívákat. Az ún. mélytanulós (deep learning) algoritmusok felelősek a mesterséges intelligencián alapuló eljárások közelmúltbeli széleskörű elterjedéséért. A deep learning eljárások egy válfaja az ún. konvolúciós neurális hálók (convolutional neural network, CNN), melyek kifejezetten a képfeldolgozás területén felelősek nagyobb áttörésekért. Mint minden gépi tanulási algoritmust, úgy a CNN-eket is nagy mennyiségű mintán keresztül tanítják be. A CNN-ek teljesítménye nagymértékben függ ezeknek a mintáknak a mennyiségétől és minőségétől. Minél nagyobb a mintavételezés, annál pontosabb lesz a képfelismerés. Egy ilyen neurális hálókra alapuló modell felépítése és alapos betanítása, illetve az ehhez szükséges annotált képek előállítása nagyon idő- és számításigényes, azonban a kész modell alkalmazása a képek és videók további elemzésére már relatív gyors. A folyókban úszó műanyag hulladék videó-, illetve CNN-alapú elemzésére már találhatók sikeres próbálkozások [14]. Itt az Indonéz főváros (Jakarta) öt folyójának felszínén vizsgálták a felszínen úszó makroműanyagokat.

Léteznek továbbá a folyókban található műanyag hulladék mennyiségi becslésére prediktív modellek is. Ezeknél a számolásoknál a lokális népsűrűség, a hulladékkezelés milyensége és a hidrológiai viszonyok alapján következtetnek a folyóban levő műanyag mennyiségére. A nagyszámú, változatos

körülményeket lefedő mérés hiányában ezek a modellek azonban nehezen paraméterezhetőek és validálhatóak, ezért nagyságrendi becslésre is csak körültekintően és elővigyázatosan alkalmazhatók.

1.5 Jelen tanulmány célkitűzése

A fentiekben leírtak világosan rámutatnak arra, hogy folyóink kitettsége a műanyag szennyeződésnek jelentős, jóllehet ismereteink rendkívül korlátosak. A tanulmányunkban a számos lehetőség közül egy olyan műszaki megoldást mutatunk be, amely a folyókban, mint szállítószalagokban végbemenő szennyeződések vándorlását mérsékeli, továbbá javaslatot teszünk olyan újszerű, tudományos vizsgálati módszerekre, amelyek elősegítik a műanyag terheléssel kapcsolatos számszerű ismereteink bővítését. A folyókban vándorló hulladék mennyiségének csökkentésére egy új fejlesztés prototípusát, egy hulladékfogóművet telepítünk a Duna budapesti szakaszára ([Hajózási kísérlet – műszaki leírás](#)), mely lehetővé teszi a folyó – ha nem is teljes, de rész – szelvényének megtisztítását. Emellett, kifejlesztünk egy olyan, ún. mélytanulás (Deep Learning) alapú mesterséges intelligenciát alkalmazó algoritmust is, mely képes lesz videófelvételeken beazonosítani a vízben úszó műanyagokat, elősegítve a hulladék mennyiségi mérésének automatizálását, hogy ez máshol is, különösebb élőmunka igény nélkül bevezethető legyen ([Mesterséges Intelligencia \(Deep Learning\) fejlesztése műanyag hulladék felismerésére](#)). Felépítünk továbbá egy számítógépes 3D áramlástan szimulációs modellt a Duna budapesti szakaszára is, amelynek segítségével bármilyen dunai vízjárási állapotra vizsgálható a felszínen úszó szennyeződések dinamikája, elősegítve a hullafékgyűjtő csapda tervezési és üzemeltetési feladatait.

2 A ClearRivers által fejlesztett hulladékgyűjtő kialakítása

A ClearRivers nevű holland cég (<https://www.clearrivers.eu/>) által, a folyókban vándorló hulladék gyűjtésére kifejlesztett úszómű műszaki kialakítását mutatjuk be az alábbiakban. A cég a világ különböző pontjain, eddig összesen 5 prototípust telepített, így általános tapasztalattal még nem rendelkeznek az optimális geometriai paraméterek, a különböző műszaki megoldások (pl. meglévő hajókikötőhöz való rögzítés módja, uszadékterelés módja) és az üzemeltetés (uszadék eltávolítása, szortírozása, stb.) területén. Ennek megfelelően a projekt keretében a Dunába telepítendő úszóművet egy műszaki kísérletnek tekintjük, és egy ennek megfelelő engedélyeztetési eljárást (ún. hajózási kísérlet) folytattunk le. Ahogy a következőkben látszik majd, az uszadékfogó egy már meglévő hajókikötő pontonhoz került csatlakoztatásra, amelynek az üzemeltetője a magyarországi Európa-csoport, és ez a cég lesz felelős az uszadékgyűjtő üzemeltetéséért is. A következő pontokban az uszadékfogó engedélyeztetéséhez készített dokumentáció releváns elemeit mutatjuk be, hogy érhető legyen a műszaki kialakítás és az üzemeltetés.

2.1 A kísérlet célja

A hajózási kísérlet céljai a következők:

- Úszó hulladék gyűjtést szolgáló pontontag telepítése a meglévő közforgalmú ponton mögé;
- Az úszó hulladék és uszadék terelését szolgáló elemek működésének és hatékonyságának vizsgálata;
- Úszó hulladék gyűjtését szolgáló ponton tag működésének és hatékonyságának vizsgálata;
- Tapasztalatszerzés az uszadék és úszó hulladék felhalmozódásával kapcsolatban, adatgyűjtés;
- Környezetvédelmi tudatosság növelésének elősegítése a frekvenciát helyen való elhelyezés révén.

2.2 A kísérlet általános leírása

A kísérlet első fázisa a telepítés, melynek első lépése a prototípus úszómű vízre tétele. A hulladékgyűjtő ponton Hollandiából közúton, teherautóval érkezik Budapestre, és a teherautó saját darujával közvetlenül vízre tehető. Ennek helyszíne a Csepeli Szabadkikötő. Ezután következik a hulladékgyűjtő ponton tag kísérleti helyszínre vontatása géphajóval, mellévett alakzatban. Az utolsó lépés a telepítés során a hulladékgyűjtő U-10329-es pontonhoz kapcsolás a terelő elemek installálása U-10329-es ponton elé.

A második fázis alapvetően emberi beavatkozást nem igényel, hiszen a hulladékgyűjtő ponton tag alapvetően „passzív” működésű, a folyó sodrása viszi bele a ponton hulladékfogójába a szemetet. A

kísérlet során végzett egyetlen időszakos tevékenység az összegyűlt hulladék szükség szerinti ciklusban történő manuális eltávolítása. (Ezen kívül csak az előre nem tervezhető, a kikötést veszélyeztető mennyiségű felakadt uszadék eltávolítása említhető meg, de ez a ponton normál üzemeltetési menetébe tartozik.)

2.2.1 A kísérlet helyszíne és numerikus modellezés

A kísérlet helyszíne a Duna jobb partján az 1644,850 fkm szelvényben, a XI/124-126 raszterekben üzemeltetett közforgalmú úszóműves kikötőhelyen (a Műgyetem előtt) elhelyezett ponton környezete. A helyszín létjogosultságát áramlástani, numerikus modellezéssel támasztottuk alá. Felvettük a kijelölt területet magába foglaló rövidebb Duna-szakasz meder- és áramlásviszonyait, majd megvizsgáltuk, hogy ha itt úszó anyagok kerülnének beeresztésére, akkor ezek milyen útvonalon haladnának a folyó áramlását követve. Az eredmények is megerősítették a korábbi tapasztalatokat, azaz a kijelölt ponton valóban áthalad a műanyag hulladék.

2.2.2 A kísérletben résztvevő úszóművek

2.2.2.1 A hulladékgyűjtő ponton tag bemutatása

A folyók és csatornák morfológiai és fizikai jellemzőinek alapos elemzése, valamint a szél- és vízáramok részletes tanulmányozása után a CLEAR RIVERS holland cég egy LT6 típusnevű, újrahasznosított műanyagokból készülő, passzív hulladékcsapdát tervezett, mely képes összegyűjteni a folyók felszínén úszó műanyag hulladékot, így csökkentve a környezetterhelést és megkönnyítve a hulladék ökoszisztémából való kivonását.

A hulladékcsapda egy passzív, vagyis jelentős emberi munka igénye nélkül működő úszó rendszer, amely közúton szállítható és könnyen telepíthető. A szerkezetet más sikeresen alkalmazzák Rotterdamban, Schiedamben (Hollandia) és Brüsszelben (Belgium).

Kialakítását tekintve katamarán, a hulladékot gyűjtő rácsszerkezetű, felülről nyitott „doboz” a két úszótest között helyezkedik el. Az úszótesteken és azokat összekötően is szintén újrahasznosított műanyagból készült csúszásgátló járófelület van kialakítva. A járófelületek szélén a biztonság érdekében korlát található.

A doboz szája a folyásiránnyal, áramlással szembeállítva elnyeli a folyó által szállított víz felszínén úszó darabos hulladékot. A nyílás speciális kialakításának köszönhetően az áramlás megfordulása esetén sem tud már távozni a gyűjtőből a szemét. Emberi munka csak a hulladék gyűjtőből való kiemeléshez és elszállításához szükséges, maga a gyűjtés automatikus. A csapda úgy van kialakítva, hogy abból az élőlények (halak, madarak) könnyen szabadulhatnak a számukra kialakított nyílásokon, így a rendszer az élővilágra semmilyen káros hatást nem gyakorol.

A csapda hatékonyságának növelése érdekében a partvonal és a csapda eleje közé a víz felszínére telepített terelőelemeket alkalmaznak. A kialakítást az 11. ábra szemlélteti.

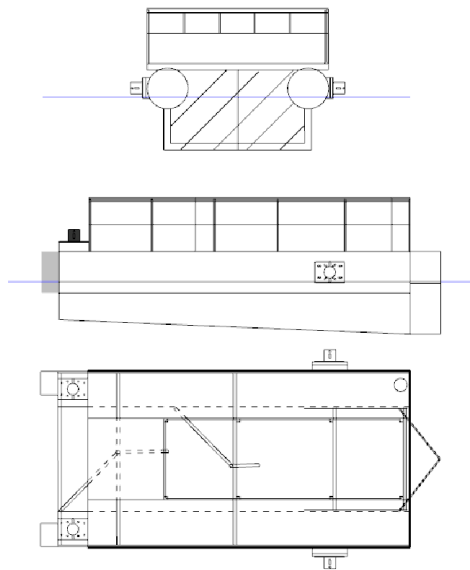


11. ábra: Hulladékgyűjtő csapda Keilehaven-nél, Rotterdamban – cölöpös kikötéssel

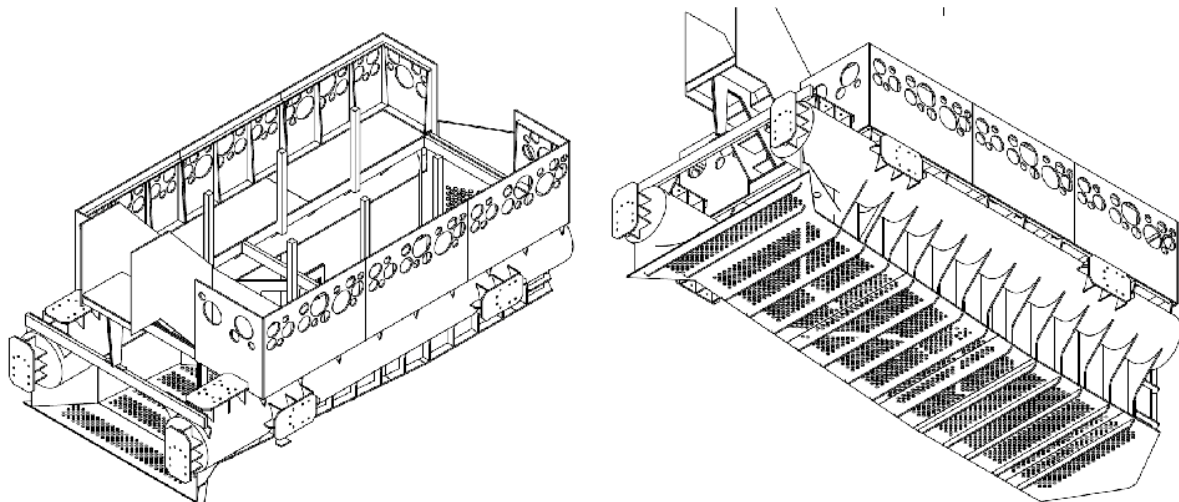
Főbb adatok:

- Úszótestek anyaga: hegesztett HDPE (nagy sűrűségű polietilán) leginkább újrahasznosított műanyagok.
- Fedélzet anyaga: polietilén és polipropilén keveréke.
- Hulladékcsapda anyaga: rozsdamentes acél.
- Csatlakozások: rozsdamentes acél.
- Befoglaló méretek:
 - Hossz: 6 m
 - Szélesség: 3 m
 - Merülés: 0,9 m
- Önsúly: kb. 1,5 tonna

A hulladékgyűjtő általános elrendezését a 12. ábra és a 13. ábra szemléltetik.



12. ábra: A hulladékgyűjtő tag elrendezési rajza.



13. ábra: A hulladékgyűjtő tag 3D-s, perspektivikus ábrázolása.

2.2.2.2 A terelőelem

A terelőelem célja az uszadék terelése a meglevő ponton testek közé. Erre a célra egy kereskedelmi forgalomban kapható termék szolgál, típusa: „Foam Filled Oil Boom FOB 900/25m – 210869.”

A 14. ábra által mutatott termék egy szilárd, könnyű habbal töltött felúszó, de önbeálló elem, mely könnyen telepíthető és tárolható. A zártcellás hab magot egy PVC-vel borított poliészter szövet burkolja a megfelelő védelem érdekében, ez az egész szerkezetet UV és olajállóvá teszi. A szerkezet a vízfelszínen az aljába elhelyezett, galvanizált 13 mm-es láncnak, mint nehezéknek köszönhetően áll be függőleges helyzetbe, ezzel mintegy falat képezve a vízfelszínen. A választott termék esetén a víz felett maradó rész magassága kb. 35 cm. A panelek tetején egy öv fut végig, mellyel a szerkezetet a megfelelő alakúra lehet húzni.



14. ábra: A terelőelem kihelyezés és működés közben.

Az elem műszaki adatai:

- Hossz (1 egység): 25 m
- Magasság: 900 mm
- Fajlagos tömeg: 5,3 kg/m
- Víz feletti rész magassága: 350 mm
- Burkolat anyagának fajsúlya: 950 g/m²

2.2.2.3 A meglevő közforgalmú kikötőponton

U-10329 lajstromszámú, 14,35 m × 5,4 m befoglaló méretű felépítmény nélküli, közforgalmú kikötőponton, melynek megengedett legnagyobb befogadóképessége 15 fő. Két úszótesttel megépített acélszerkezetű úszómű, fedélzetén körbefutó acél korláttal. A ponton egy acél zártszelvény szerkezetű, korláttal felszerelt, acél taposórácsa felületű bejáróhídon keresztül közelíthető meg. Parti csatlakozása a kövezett rézsús parton kiépített acél fogadófejben kialakított fészekbe támaszkodik, járófelülete a fészekhez íves lemezzel csatlakozik.

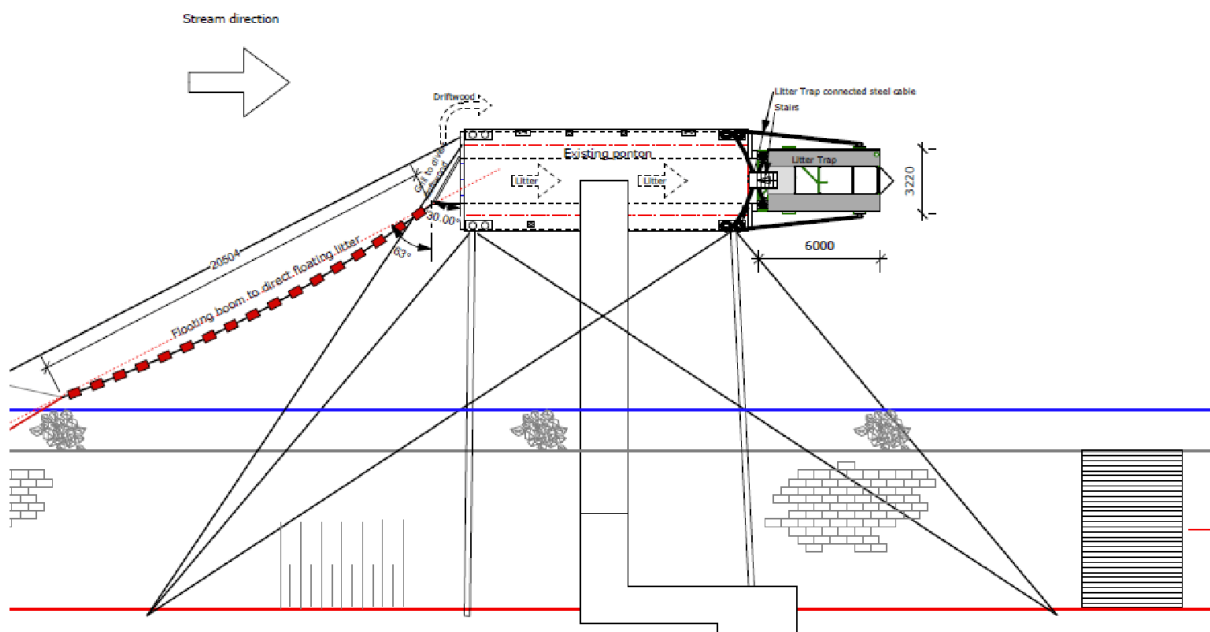
Az úszómű 2 db parti bakhoz 6 db sodronykötéllal van kikötve, a parttól való eltámasztását 2 db acélból készült rugós ütközővel ellátott támgerenda biztosítja. Leesés ellen a támgerendák acélsodrony kötéllel biztosítottak. A pontont az 15. ábra mutatja.



15. ábra: U-10329 lajstromszámú kikötőponton a Műegyetem előtt.

2.2.2.4 A kikötőponton és a hulladékgyűjtő közös kialakítása

A meglevő U-10329 pontonhoz a hulladékgyűjtő tag alulról, két oldalon két acélsodrony kötéssel kapcsolódik (4 helyen), így nem egy szerkezeti egységet képeznek. A hulladékgyűjtő tag gumi támaszelemekkel feszül az acélszerkezetű kikötőpontonnak. A két ponton fedélzetszintje közötti kb. 1 m-es szintkülönbséget a hulladékgyűjtőre szerelt lépcső hidalja át. A ponton part felőli úszótestéhez kapcsolódik a már említett terelőelem egyik vége. A másik vége a parton, az úszómű előtt kb. 45 m-re található kikötőbakhoz van kötve. Az összecsatolt úszóművek és terelőelem elrendezését a 16. ábra mutatja.



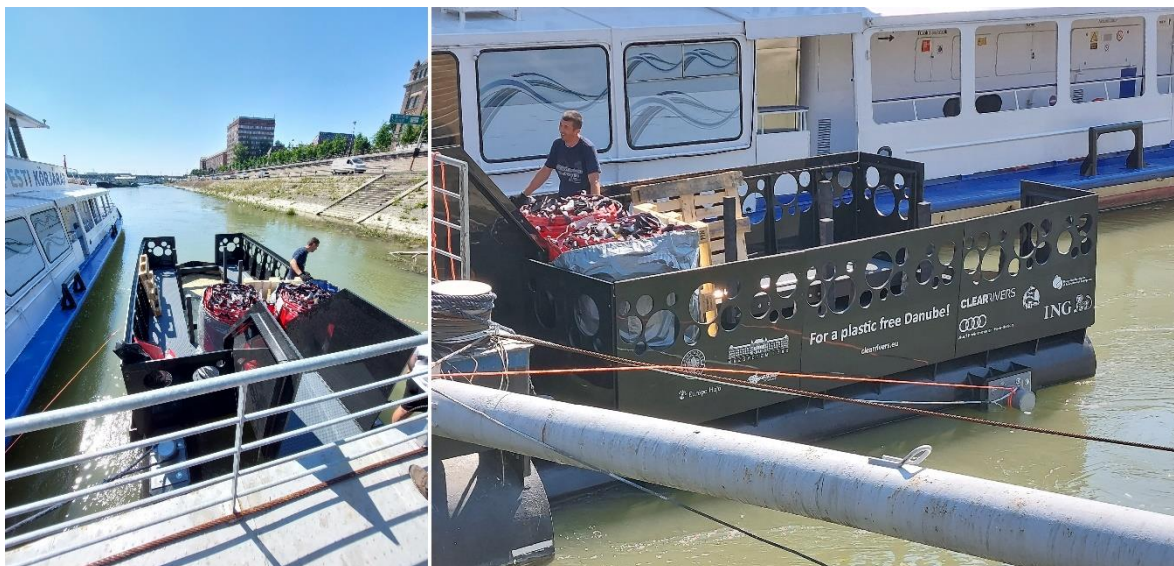
16. ábra: A pontonok együttes elrendezése.

2.2.3 A rendszerelemek összeállítása

2.2.3.1 Hulladékgyűjtő és meglevő ponton összekötése

A hulladékgyűjtő tagot a vízre tétel helyszínéről az Európa Rendezvény Iroda Kft. Érdekeltségi körébe tartozó géphajó mellévett alakzatban szállította a Műegyetem előtt kikötött U-10329 pontonhoz. Az összekötés előtt a meglevő ponton hátsó, vízoldali bakjához kötött kikötő kötelet át kellett kötni a hátsó, part felőli bakra.

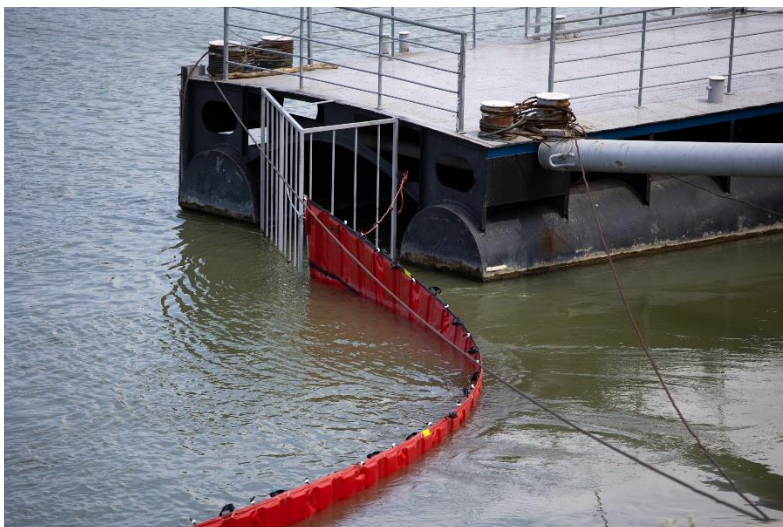
A két úszómű acélsodrony kötelekkel való összekötéséhez a géphajó rányomta a gumi támaszokon keresztül a hulladékgyűjtő tagot a kikötő pontonra. Az összekötő kötelek csatos vége a meglevő pontonon van, szabad vége a hulladékgyűjtő tag bakjára került kikötésre.



17. ábra: A hulladékgyűjtő rögzítése a kijelölt U-10329 pontonhoz, mellette a szállítást és rányomást végző géphajóval.

2.2.3.2 Terelő kihelyezése

A terelőelem dobra tekercselve (17. ábrán megfigyelhető a hulladékgyűjtőn tárolva) került kieresztésre a pontonról, ahonnan a 25 m-es elem másik végét a parti bakhoz kihúztuk és rögzítettük felvízi irányban (18. ábra). Az elem másik vége behúzó kötéllel a ponton felvízi, part felőli úszótestének víz felőli oldalára kialakított megfelelő teherbírású szembe seklivel került rögzítésre. A ponton beömlő nyílása elé terelő gerebet helyeztünk, mely a nagyobb fauszadékokat hivatott felfogni és elterelni, hogy azok ne tegyenek kárt a hulladékgyűjtőben, vagy gátolják annak működését.



18. ábra: A kifeszített, piros terelőelem, valamint a beömlőnyílást védő gereb rácszat az U-10329 ponton felvén.

2.2.4 A hulladék időszakos eltávolítása

A hulladék mennyiségétől függően a csapdát rendszeresen ki kell üríteni, ez manuálisan is elvégezhető. A hulladékgyűjtő fedélzetére a kikötőpontonról alumínium szerkezetű lépcsőn keresztül lehet lejutni,

ahonnan a könnyű műanyag hulladék egyszerű lepkehálóval kisedhető. Az eltávolított hulladékot az ürítő személy szétválogatja és megfelelő méretű műanyag zsákokba helyezi, majd a kikötőpontra viszi, és ott összegyűjti. Az ürítést végző személy biztonságát a hulladékgyűjtő tagon elhelyezett korlátok és személyi védőfelszerelés biztosítja.



19. ábra: A hulladéktérben már nem sokkal a kihelyezés után elkezdett gyűlni a hulladék. Az ürítési munkák során a hozzáférés kényelmes és biztosított.

Mivel gépjárművel csak a Műegyetem rakparton lévő parkolóban lehet megállni, így a szemeteszsákokat gyalog a kikötőpont bejáró hídján, majd a Valdemar és Nina Langlet rakparton átvezető gyalogos átkelőn keresztül kell az elszállító autóhoz vinni.

A hulladék időszakos eltávolítását a meglevő pontont üzemeltető cég szakképzett személyzetének jelenlétében a PET Kalózok budapesti önkéntesei végzik.

3 Mesterséges Intelligencia (Deep Learning) fejlesztése műanyag hulladék felismerésére

Az uszadékgyűjtő telepítése egy fontos lépés a dunai műanyagszennyezés mérséklésében, bár a hulladék teljeskörű kiszűrése értelemszerűen ezzel az eljárással nem megvalósítható. A korábbiakban bemutattuk, hogy a folyóbeli műanyagszennyezés problémaköre meglehetősen újkeletű, ismereteink nagyon hiányosak. Nem rendelkezünk pontos adatokkal a műanyag hulladék minőségi jellemzőiről, de az érkező hulladék területi és időbeli eloszlásáról sem. Kiaknázva a digitális forradalom adta új lehetőségeket, a következőkben egy olyan innovatív fejlesztést mutatunk be, amelynek a segítségével nagymennyiségű új adatot gyűjthetünk a műanyagokról, azok folyóbeli viselkedéséről.

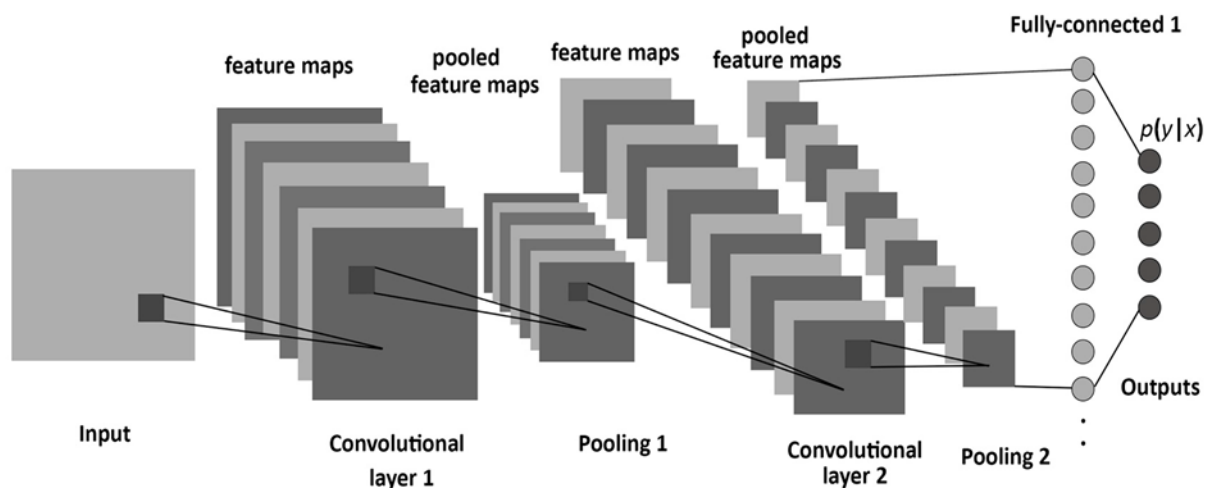
3.1 A fejlesztés célkitűzése

Mint azt már részben említettük, az elmúlt években a számítógépes látás és mintafelismerés hatalmas fejlődésen ment keresztül, amely egyrészt köszönhető a jelentősen megnövekedett számítási teljesítménynek, másrészt pedig az alkalmazott algoritmusok és metódusok kifinomultabbá válásának. Jelenleg a mély neurális hálózatok produkálják a legjobb eredményeket ezeken a területeken. Ezen tanulmányban azt vizsgáltuk meg, hogy a 2012 óta [15] a figyelem középpontjában lévő Deep Learning eljárással sikeresen felismerhetők-e folyamok és egyéb víztestek felszínén valamint partjain műanyag hulladékok, illetve hulladékszigetek. A kutatás keretében egy ellenőrzött tanulást hajtottunk végre, ahol általunk készített, illetve az internetről letöltött felvételekből készített adathalmazzal tanítottuk be a modellt műanyag hulladékok felismerésére. A Deep Learning alkalmazásának célja, hogy a hulladékfelismerés vizeken és vízpartok mentén automatikusan kivitelezhetővé váljon számunkra. A módszerben rejlő jelentős potenciál a felismerés mellett az, hogy adott paraméterek mellett a hulladékmennyiség kvantifikálhatóvá válik, így területét ismerve a hulladék mennyiségét nagy pontossággal meghatározhatjuk.

Megvizsgáltuk, hogy az általunk gyűjtött, típusukat tekintve széles spektrumot képviselő képeken, lehetséges-e olyan modell betanítása, amely nagy bizonyossággal ismer fel jól elkülöníthető olyan hulladékdarabokat, valamint hulladékszigeteket, amelyek víztestek felszínén, illetve azok partjain találhatók. A képek spektrumát illetően előfordulnak mobiltelefonnal készített part menti képek, webkamerás fotók valamint stockfotók is az adathalmazban. Ezen összetételtől azt várjuk, hogy a kiválasztott és alkalmazott Deeplabv3+ modell képes lesz nagy pontossággal szegmentálni változó háttérű kompozíciók mellett is a hulladékokat az előtérben.

3.2 Elméleti háttér – Deep Learning és Konvolúciós Neurális Hálózatok

A számítógépes képfeldolgozás területén egyértelműen a deep learning és ezen belül a konvolúciós neurális hálózatok képviselik a legfejlettebb módszereket. A tulajdonságok, melyek uralkodóvá teszik őket ezen a területen, az ún. pooling rétegek megléte, a közös súlyok, a nagyszámú belső kapcsolat és a rengeteg további réteg, amely a modellek absztrakciós készségét növeli [16]. Ezekben a hálózatokban a beadott adatokat tömbök formájában dolgozzuk fel. Ez képek esetében kétdimenziós alakban, a kép színezetétől függően 1, 3 vagy több rétegben valósul meg (a kép szín és mélységtípusa befolyásolja a kép rétegeinek a számát). Lehetséges egydimenziós adatok feldolgozása is, az ezt végző modelleket leginkább természetes jelek feldolgozására használjuk (pl. nyelvfeldolgozás). A 20. ábra egy ilyen 2D konvolúciós neurális hálózat sematikus ábráját mutatja be.



20. ábra: Egy konvolúciós neurális hálózat (CNN - Convolutional Neural Network) általános felépítése, benne a konvolúciós, a pooling és a teljesen összekapcsolt (fully-connected) rétegekkel. A neurális hálózat részeinek elnevezése azért szerepel angolul az ábrán, mivel nagyrészt még nem létezik magyar nyelvű megfelelőjük. Forrás: [17]

Ezen modellek lényege, hogy különböző modulokból állnak, amelyeket rétegeknek nevezünk és minden egyes réteg egy rá kiszabott adattranzformációt hajt végre az inputon. A fő ok, amiért ezek a metódusok és modellek működnek az, hogy a természetes jelekben és képekben olyan, az ember számára nem érzékelhető jelentésbeli struktúrák vannak, amelyek hierarchikusan épülnek fel, és kellően nagy elemszám mellett ezek a rendszerek képesek súlymátrixaikban rögzíteni a hierarchikus viszonyokat.

A projekt keretében ismertetett eljáráshoz egy, a Google kutatói által készített szemantikus szegmentációt végző konvolúciós neurális hálózat-architektúrát használtunk, amely a Deeplabv3+ névre hallgat [18]. A szemantikus szegmentáció a képfelismerési módszereknek egy olyan válfaja, ahol egy kép minden pixeléhez egy osztályt kell rendelnünk, így kialakítva egy színezett képet, amely lehatárol minden egyes a képen található osztályt. A szemantikus szegmentáció az elmúlt években jelentős fejlődésen ment át, nagyrészt az önvezető autók fejlesztésében látható versenynek

köszönhetően. A Deeplabv3+ az egyik legkorszerűbb architektúra, mely 2018 tavaszán jelent meg, azonban olyan ütemű a fejlődés ezen a területen, hogy jelentek meg ennél már precízebb rendszerek is. Az architektúra pontos bemutatására itt nem kerül sor, azonban fontos megemlíteni, hogy megjelenésekor új, addig nem ismert modulokat tartalmazott, ezért esett rá a választás.

A konvolúciós neurális hálózatok mögött álló két legfontosabb matematikai koncepció az input adat különböző rétegekkel képzett konvolúciója és a visszapropagálás (backpropagation), ami a modell súlymátrixainak módosításáért felel. Míg a konvolúció csak ezen neurális háló típusoknál jelenik meg, addig a visszapropagálás a neurális hálózat alapú eljárások alapkövének tekinthető. A konvolúcióval biztosítjuk, hogy a modell robusztus felépítésű legyen, így képes lesz kontextusában is információkat kinyerni és feldolgozni. Egy kétdimenziós képen ezt a műveletet elvégezve az 1. képlet írja le a konvolúciót, ahol I a bemenő kép és K jelöli a kernelt, amely pásztázza:

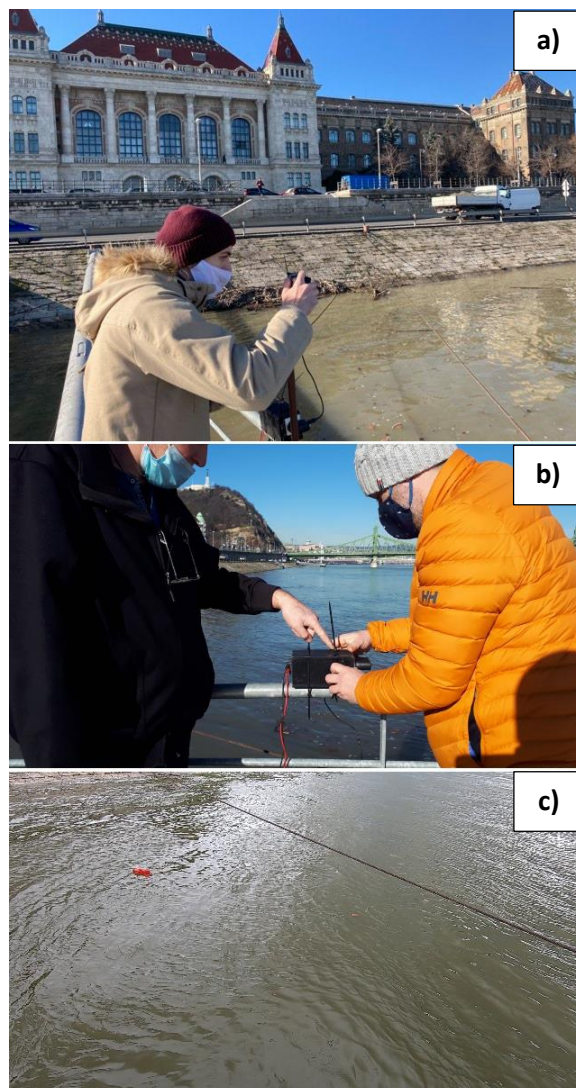
$$S(i, j) = (K * I)(i, j) = \sum_m \sum_n I(i - m, j - n) K(m, n) \quad (1)$$

A visszapropagálás segítségével képesek vagyunk a modell súlyait úgy manipulálni, mindezt a deriválás láncszabálya szerint, hogy a tanulás folyamán, minden iteráció után érzékelt hiba nagyságától és súlyosságától függően, annak arányában javítjuk a modellt, így kellően nagy adathalmaz és iterációs szám mellett, a súlymátrixok betaníthatók. A GPU-k párhuzamosított számítási módszere miatt érdemes a visszapropagálást is vektoros formában felírni, ami a 2. képleten látható.

$$\frac{\partial z}{\partial x_i} = \sum_j \frac{\partial z}{\partial y_j} \frac{\partial y_j}{\partial x_i} \quad (2)$$

3.3 Input adatok

A képek, amelyek felhasználásra kerültek, különböző forrásokból származnak. Három csoportot különíthetünk el. Az első az általunk, illetve egyetemi hallgatók által készített képek a Dunáról és a Bodrogról. Előbbiek egy, a műanyagfogó telepítésére is felhasznált pontonra kihelyezett, huzamosabb ideig üzemelő, GoPro kamerával készítettük (21. ábra).



21. ábra: GoPro kamera kihelyezése a Múzeum előtti pontonra (a,b), illetve a kamera felvételének egy képkockája (c), rajta egy úszó narancssárga PET palackkal. Ilyen és ehhez hasonló felvételek alkották az input képek első, saját készítésű csoportját.

A második fő kategóriát a világ különböző részein készült partmenti, városi és kikötői képek teszik ki, melyek általában hulladékszigeteket ábrázolnak. Ezen két kategóriába nagyrészt természetes képek kerültek be, ahol a természetességet a képen megjelenő hulladék pozicionálásának módjára értjük. A harmadik és egyben utolsó kategóriát a stockfotók teszik ki, amelyek esetén a képeken általában központi pozíciót tölt be a hulladék. Arra, hogy ilyen sokféle típus is képviseltesse magát az adathalmazban, azért volt szükség, hogy a modell a tanulás folyamán minél általánosabban legyen képes felismerni a kijelölt osztályokat.

3.4 Az eljárás felépítése



Az eljárás teljes menetét a 22. ábra ismerteti, ahol az egyes dobozok az eljárás elkülönülő lépéseit mutatják, valamint a lépéshez tartozó feladatokat, elvégzett transzformációkat látjuk. A részlépések nem minden esetben követik a dobozok sorrendjét, azonban logikailag összetartoznak. Fontosabbnak találtuk ezen elemek együttes ábrázolását, mint a lépések sorrendjének bemutatását. Mindezt annak fényében tesszük, hogy nagy adathalmazok esetén, illetve, ha nagyon általánosan működő modellt akarunk, akkor a "Képek augmentálása" lépés kiesik, azonban a szürkeárnyalatossá alakítás, ami az annotálás alatt van, továbbra is szükséges lesz. Az eljárás első lépésében összegyűjtöttük a tanításhoz szükséges adatokat (képeket), majd ezeken, még eredeti méretükben végeztük el az annotálást. Az annotálásról részletesebben lentebb írunk. A begyűjtött képeken vertikális, horizontális valamint diagonális tükrözést hajtottunk végre, majd ezután különböző filterekkel szintén konvolváltunk a képeken. Ezek a szűrők normál eloszlású zajt adtak a képekhez, valamint élesítést, elmosást, sötétítést illetve fehér egyensúly növelést hajtottak végre a képeken. Így az adatok szintjén próbáltuk biztosítani, hogy az esetleges napszak, időjárás, árnyék viszonyok változása illetve színváltozások megfelelően reprezentálva legyenek a tanítás során. A begyűjtött képek változó nagyságúak voltak, így kiválasztva egy tetszőleges magasság/szélesség arányt és ehhez tartozó pixelméretet, meghatározott számú darabra vágtuk a képeket. Fekvő képek esetén, ha a magasság/szélesség arány kisebb volt, mint 0,7 valamint a kép szélessége nagyobb, mint 1200 pixel, akkor a kép 8 egyező nagyságú darabra lett felbontva, míg ha ennél kisebb, akkor 4-re. Ugyanez igaz vertikálisan is, de abban az esetben 1,4 volt a határérték. Az ezen érték feletti aránnyal rendelkező képeket, amelyek minimum 1200 pixel magasak voltak 8, míg az ez alattiakat 4 egyenlő részre daraboltuk. Ezután ezeket a képrészeket egységesen 513x513 pixeles méretűvé transzformáltuk. A következő lépés az

22. ábra: A folyamatábra bemutatja az általunk használt eljárás összes fontosabb lépését. A színezett dobozok ábrázolják a fontosabb logikai építőelemeket. Ezek közül a "Képek augmentálása" lépés akár ki is hagyható megfelelő adathalmaz esetén. A dobozok közepén az adott lépéshez tartozó részlépések vagy eredmények láthatók.

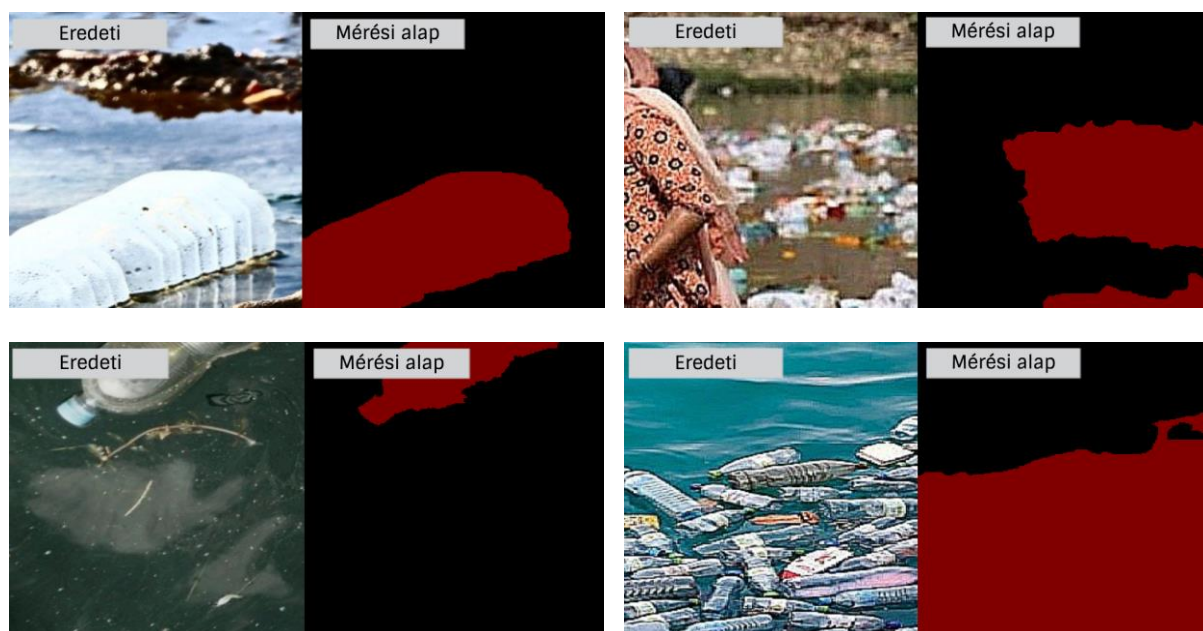
összes kép RGB (Red-Green-Blue) alapú színes képről szürkeárnyaltosra való konvertálása volt. Ez azért lényeges, mivel a színes képek 3 csatornásak, azaz tartalmaznak egy vörös, egy zöld és egy kék

réteget is, míg a szürkeárnyaltos képnél egy pixel csak egy értéket tud felvenni, ami 0 és 255 között található. Ebből adódik, hogy ezzel a színátalakítással a későbbi számítások során háromszoros sebességnövekedésre tettünk szert.

A következő lépés a tanító- és teszt-halmazok elkülönítése. Esetünkben ez 20%-nyi validációs halmazt jelentett, míg az adatok további 80%-át tanításra használtuk fel. A képeket fontos összekeverni, hogy pszeudorandom módon válogasson az algoritmus a tanítás során, megelőzve ezzel azt, hogy részrehajló (biased) legyen a modell. Végül a tanítás és hiperparaméterek többszöri változtatása után a kiértékelés és az eredmények vizualizálása következett.

3.5 Annotálás

Szemantikus szegmentálás esetén az annotálás során a képek minden pixeléhez rendelünk egy osztályt. Jelen kutatás esetében, mivel általánosan szeretnénk volna megtudni, hogy lehetséges-e nagy pontossággal hulladékok felismerése, elég volt két osztályt definiálnunk. Az egyik a hulladék, a másik pedig a háttér osztály. Mivel a felhasznált fotókban komoly eltérés van mind a hátterek, mind a hulladékokat illetően, így az egyes osztályoknak széles spektrumot kell lefednie, ha felismerésről van szó. A háttér a legtöbb esetben víz, amelynek árnyalata változó. Emellett parti homok illetve növényzet is nagy számban előfordul. A hulladék szinte teljes mértékben műanyagból áll, néhol látható csak üveghulladék. A 23. ábra bemutatja, hogyan is néz ki az eredeti kép illetve az annotált mérési alapként szolgáló kép (ground truth).



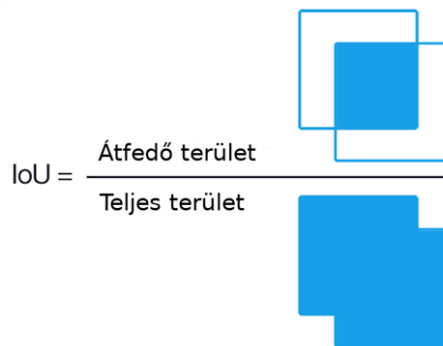
23. ábra: A validációs halmazból vett minták arra vonatkozóan, hogy milyen képek voltak felhasználva a tanítás és validálás során, valamint milyen pontosságú az annotáció és mi modell output.

3.6 A tanítás menete

A modell tanítását a felhőben végeztük egy nagy teljesítményű számítógépen és így 10 órát vett igénybe. A kapott eredményeket a hiperparaméterek többszöri változtatásával értük el, így a tanítást többször el kellett végezni, hogy megfelelő eredményre jussunk. A tanítás során a legnagyobb kihívás általában annak a felmérése, hogy egy modellt érdemes-e tovább tanítani vagy már elérte az optimálishoz közeli állapotot. Valamint fontos megjegyezni, hogy a megfelelő képméret kialakítására is érdemes hangsúlyt fektetni. Ha túl nagy felbontású képeket használunk a tanításhoz (1500-2000 pixel feletti horizontális vagy vertikális kiterjedés), akkor a GPU-k memóriája csak kevés képet lesz képes egyszerre tárolni, ami lassítja a tanulást, továbbá nehezen elérhetővé teszi a sztochasztikus gradiens módszernek a lokális optimum megtalálását.

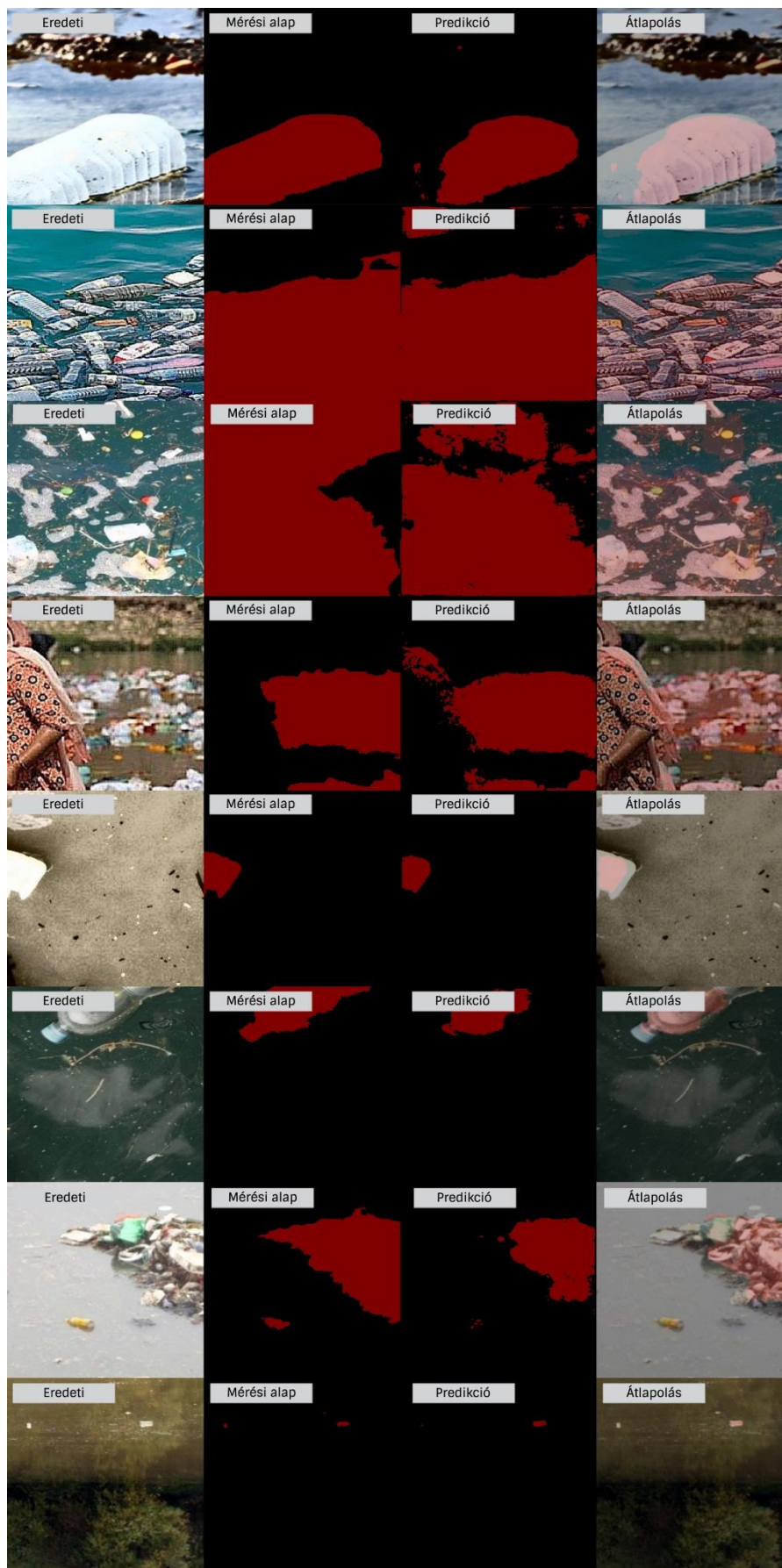
3.7 A modell értékelése

A gépi tanulási modellek értékelésére több módszert is alkalmaznak. A képfeldolgozási területen a legelterjedtebb és leginkább szigorú a metszet és unió arányán alapuló metódus (IoU - Intersection over Union), amelyet Jaccard indexnek is neveznek, és a helyesen kategorizált pixelek részarányát számolja ki a képek területéhez viszonyítva. Ezt mutatja be a 24. ábra.



24. ábra: Az Intersection over Union értelmezése (Forrás: [19])

Képalapú adathalmazok esetén a teljes halmazra számítjuk az IoU-t, és az alapján jellemezzük a pontosságot, ezt nevezzük mIoU-nak (mean IoU – átlag IoU), amely érték ennél a modellünknel 87,33%-ra adódott, ami jó eredménynek könyvelhető el. A Pascal VOC adathalmazon, amely általánosan elfogadott viszonyítási adathalmaznak számít, a legjobb modellek 85% körüli értékeket szoktak elérni. Két osztály esetén ennél jobb eredményt is el tudtunk volna érni, azonban az a neurális hálózat túltanulásával járhatott volna. A másik pontosság, amely a pixel alapú egyezéseket nézi 95,22%-os értéket kapott. Ez a szám jelzi, hogy feltehetően sok olyan kép volt, amely esetén szinte csak "háttér" osztály volt a képen, így az egészet annak osztályozta. A 25. ábrán láthatók néhány eredmény az eredeti képpel összevetve.



25. ábra: Eredeti képek (1. oszlop), annotált képek (2. oszlop), a modell által elvégzett osztályozás képei (3. oszlop) és a képek átfedése (4. oszlop).

3.8 Következtetések, fejlesztési irányok

A fejlesztés és vizsgálat legfontosabb eredménye, hogy bemutattuk, lehetséges olyan általános, neurális hálózatokra épülő modell betanítása, amely képes vízi, illetve partmenti hulladékok felismerésére, a hátterek és hulladéktípusok nagy varianciája mellett is. A modell egyaránt képes szigetek és kisebb, a távolban alig látható palackok felismerésére.

A továbbiakban a modellt kibővítése következne több osztály felismerésére is, mind a hulladékok típusát, mind a hátterek típusait tekintve. Ez egyrészt pontosabb képet adna magáról az adathalmazról, így egy kiegyensúlyozottabb képhalmazzal végezhetnénk a tanítást, ami jobb eredményekhez vezethetne, valamint láthatnánk, hogy melyek azok a hulladékok vagy szennyezőanyagok, amelyek még nem szerepelnek az adataink között vagy csak nagyon kis számban.

4 Számítógépes szimuláció

Mivel az úszó hulladék vándorlását a lokális áramlási viszonyok döntően meghatározzák, olyan vizsgálati eszközök, amelyek alkalmasak a folyami áramlási viszonyok feltárására, alkalmasak lehetnek arra is, hogy a szennyeződés terjedését elemezzék. A folyómérnöki területen egyre gyakrabban és egyre szélesebb körben alkalmaznak olyan szimulációs eljárásokat, amelyek a valós fizikai folyamatok modellezésére képesek a vízmozgást leíró fizikai egyenletek megoldásával. Ezek a szimulációs modellek egy véges kiterjedésű területen, rácshálóval leképzett számítási tartomány mentén adják meg a vízmozgás releváns jellemzőit. Segítségükkel eltérő hidrológiai állapotokban jellemző vízmélység, vízsebesség, vízszint területei eloszlásait, mezőit lehet előállítani, ami ezután alkalmas pl. a szennyeződések terjedésének vizsgálatára. Jelen vizsgálat során egy 3D modellt építettünk fel a Duna budapesti szakaszára, majd a modell segítségével elemzést végeztünk a vízfelszín közeli áramlási viszonyokra, hogy megértsük, milyen irányba és milyen sebességgel utazik a felvíz felől érkező esetleges szennyezőanyag. A modell segítségével képet kaphatunk arról, hogy a vizsgált vízjárási állapotokban a folyómeder mely területei hajlamosak az uszadék csapdázására, és melyek azok a helyek, ahol az uszadék potenciálisan nagymennyiségben jelenik meg és emiatt érdemes az adott szelvényekben uszadékgyűjtő pontokat tervezni.

4.1 A 3D modell hidrodinamikai és matematikai alapjai

Vizsgálatainkhoz egy olyan számítógépes 3D hidrodinamikai modell használtunk (SSIIM: [20]), amely a fentebb leírtak szerint alkalmas a vízfelszínen úszó szennyeződések vándorlásának vizsgálatára. Háromdimenziós leírásban a folyadéktest térfogat- és az impulzus megmaradását a Navier-Stokes egyenletek fejezik ki, amelyeknek turbulens viszonyokra az ún. Reynolds-féle időátlagolt változatát alkalmazzuk. Az áramlási sebességek turbulens jellegének megfogási módja szokásosan az, hogy a pontbeli, pillanatnyi sebességet a Reynolds-féle szétválasztással két tag, egy alkalmasan választott T időalapra vett U_i átlagsebesség és a pillanatnyi sebesség ettől való véletlen eltérése, az ún. u_i pulzációs sebesség összegeként írjuk fel. Az i index a térbeli sebességvektorok három, egymásra merőleges irányú vetületére utal (azaz $x_1 \equiv x$, $x_2 \equiv y$, $x_3 \equiv z$, $U_1 \equiv U$, $U_2 \equiv V$, $U_3 \equiv W$ stb.). A sebességek ilyen helyettesítésével az áramlás folytonosságát ezen sebességtér divergenciamentességén keresztül fejezzük ki, míg a Navier-Stokes egyenletek T időalapra vett átlagolásának szisztematikus végrehajtásával az impulzusmegmaradást kifejező egyenletek tömören a következő alakot öltik:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(-P \delta_{ij} - \overline{\rho u_i u_j} \right),$$

ahol U és u az előbb említett átlag- és a pulzációs sebesség összetevői; P a hidrodinamikai nyomás; x_j : Déscartes-féle térkoordináták; δ_{ij} a Kronecker-delta (1 ha $i = j$, és 0 ha $i \neq j$). A felírásban a tömörséget az Einstein-féle összegzési szabály követése tette lehetővé, ahol is kifejtve például

$$U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \equiv \sum_{j=1}^3 U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j}.$$

A fenti parciális differenciálegyenlet-rendszer jobb oldalának utolsó tagja az időátlagolásból származó ún. Reynolds-tag, amelyet a molekuláris viszkozitáshoz hasonló alakkal közelítünk a következőképpen:

$$-\overline{\rho u_i u_j} = \rho \nu_T \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij},$$

ahol ρ a víz sűrűsége; ν_T az örvényviszkozitási együttható; k a turbulens kinetikai energia. Ennek az ún. Boussinesq-féle közelítésnek a behelyettesítésével kapjuk a leíró egyenletek alábbi alakját:

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x_j} \left[- \left(P + \frac{2}{3} k \right) \delta_{ij} + \nu_T \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \nu_T \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right],$$

amelyben a k és a ν_T addicionális ismeretlenként szerepel, így a folyamat leírása matematikailag csak további összefüggések felállításával válhat megoldhatóvá.

Az alkalmazott modell a lehetséges változatok egyik elterjedt válfaját, a turbulencia k - ϵ típusú kiegészítő leírását tartalmazza (Pope, 2001). Ennek megfelelően, izotróp viszonyokat feltételezve az örvényviszkozitási együtthatót a

$$\nu_T = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon}$$

összefüggéssel közelíti, ahol ϵ a turbulens kinetikai energia disszipációs rátája; c_μ konstans, és k a mozgó folyadék egységtömegre vonatkozó turbulens kinetikai energiája:

$$k \equiv \frac{1}{2} \overline{u_i u_i}.$$

A k turbulens kinetikai energia transzportjának modellezése az alábbi differenciálegyenlettel történik:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \epsilon,$$

amelyben a kinetikai energia keletkezését kifejező P_k tag:

$$P_k = \nu_T \frac{\partial U_j}{\partial x_j} \left(\frac{\partial U_j}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right)$$

Az áramlási viszonyok alakulása szempontjából fontos turbulens kinetikai energia disszipációs rátáját ε fejezi ki, amely pedig a

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \left(\frac{v_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

differenciálegyenlettel kerül modellezésre. A k- ε turbulencia-modell konstans paramétereinek a szakirodalomban szokásos, laborkísérletek alapján általánosítható esetre meghatározott értékeket választjuk [21]: $C_\mu = 0,09$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

A mederfelszínen a modell az ott kialakuló határréteg-áramlás törvényszerűségeit leíró logaritmikus sebesség-összefüggést használja (Schlichting, 1979):

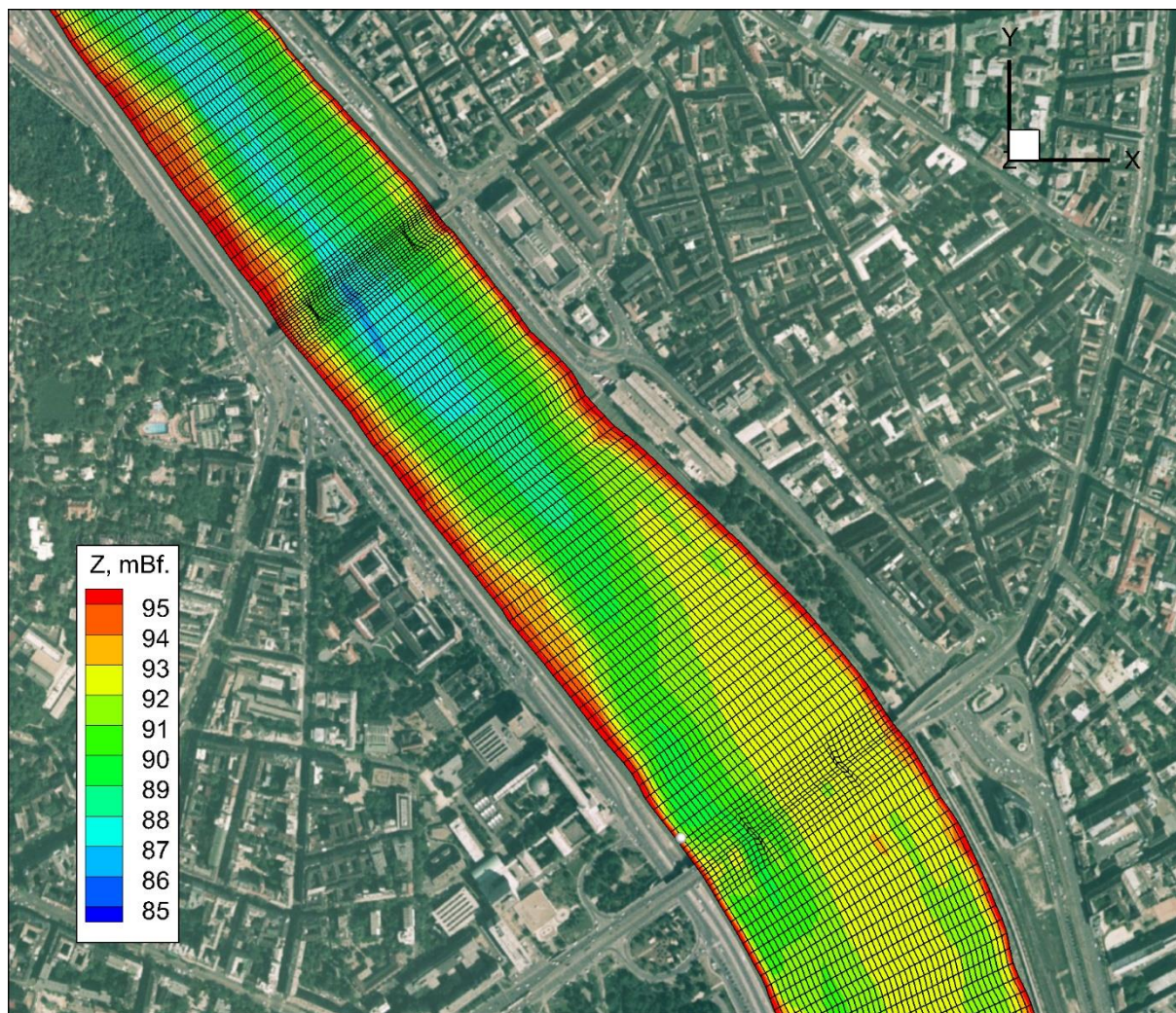
$$\frac{U_{||}}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{30y}{k_s} \right),$$

melyben $U_{||}$ a sebesség mederrel párhuzamos vetülete; u^* az ún. csúsztatósebesség; κ a Kármán-féle állandó (0,4); y a vizsgált pont (a diszkrét számításban a cellaközéppont) távolsága a mederfelszíntől; k_s a meder Nikuradze-féle érdességmagassága.

Az alapáramlást a térben leíró három impulzusegyenlet mindegyikének teljes formáját használjuk, vagyis nem élünk a hidrosztatikus állapot feltételezésével, mivel a vizsgálandó összetett viszonyok között az áramlásban a függőleges irányban kialakuló gyorsulásoknak is jelentőséget tulajdonítunk.

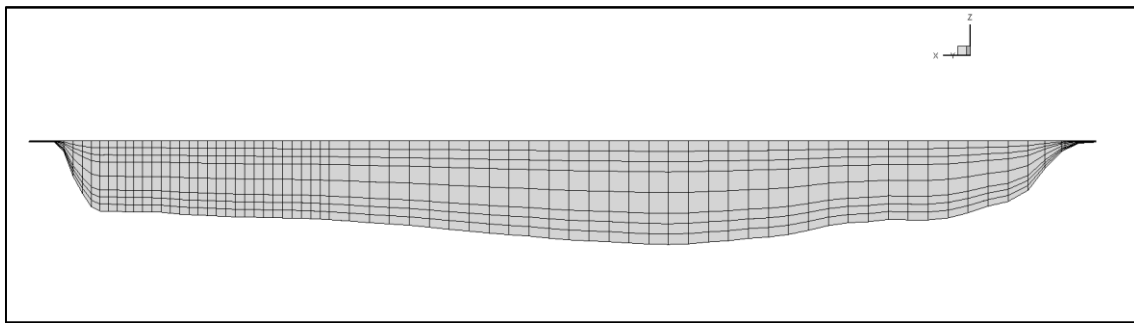
4.2 A 3D modell felépítése a projektterületre

Az áramlási modellt a Duna Margit-híd és Lágymányosi-híd közötti szakaszára építettük fel, és magában foglalja a hídpilléreket és az alsó rakpartokat is. A modell numerikus megoldásának megfelelően egy strukturált, görbevonalú rácshálót alakítottunk ki a vizsgált szakaszra, amit hosszirányban 320, keresztirányban pedig 75 cellára osztottuk fel. Az átlagos vízszintes cellaméret így 11×4 méter volt. Az áramlási modellben a mederfenékszinteket a rácspontokban értelmezzük. Ennek megfelelően ezekbe a pontokba egy digitális medermodell alapján lineáris interpolációval határoztuk meg a magassági értékeket.



26. ábra: A számítási rácsháló és a medermodell kiragadott részlete a Duna Szabadság-híd és Petőfi-híd közötti szakaszán

A számítási rácshálót függőleges értelemben 8 rétegre osztottuk fel, amit az ún. σ -transzformáció alkalmazásával minden függvényben értelmeztünk, vagyis függőlegesen a teljes számítási tartomány mentén állandó volt a rétegek száma. A rácsvonalak felosztásánál a mederfenék- és vízfelszínközeli rétegekben sűrűbb kiosztást alkalmaztunk, hogy a lokálisan megnövekedő sebességgradienst pontosabban írjuk le.



27. ábra: Egy dunai keresztmetszvény rácshálója a modellben (függgőlegesen torzított ábrázolás).

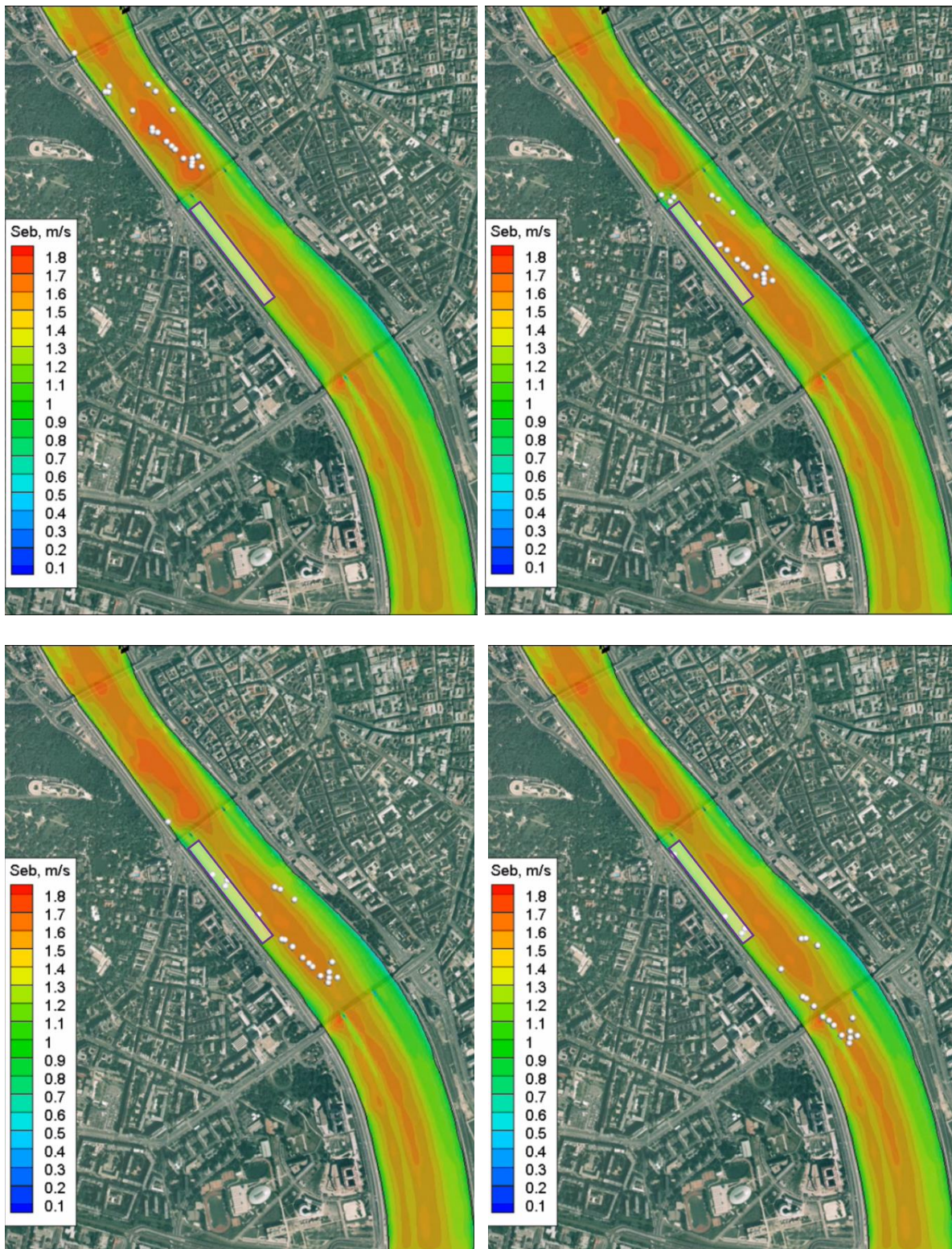
4.3 A 3D modell alkalmazása az uszadékvádorlás vizsgálatára

A számítógépes modellezés célja a víz felszínén úszó szennyezőanyagok terjedésének vizsgálata volt, ezért egy olyan szimulációs eszközt alkalmaztunk, amely képes a vízfelszín közeli réteg áramlási viszonyainak feltárására. A korábbiakban ismertetett 3D modell segítségével lehetőség van arra, hogy a modellezési tartományt függőlegesen is diszkretizáljuk, vagyis rétegekre osszuk fel, majd az eredménymezőből csak szabadfelszínhez legközelebbi, legfelső rétegben kialakuló áramlási jelenségeket vizsgáljuk. A szimulációk során a modell a számítási rácsháló celláiban adja eredményül a vízmozgás fizikai jellemzői közül a vízmélység és vízfelszín mezőit, az áramlási sebességek háromdimenziós vektorait, és a turbulens mozgási energiát. Utóbbinak az elkeveredés szempontjából lehet fontos szerepe, de jelen vizsgálatnál ennek hatásától eltekintettünk, mert az alacsony sebességű áramlásban a felszíni uszadék terjedését döntően az ún. advekción folyamatok határozzák meg, vagyis a szennyeződés terjedésében az áramlási sebességek területi alakulásának van döntő szerepe. A 3D megközelítés nagyon fontos szerepet kap pl. a folyókanyarulatokban, ahol ismert jelenség a centripetális erő okozta másodlagos keresztirányú vízmozgás, másnéven csavaráramlás, aminek eredményeképpen a vízfelszín közelében a homorú part felé áramlik a víz és így a felszínen úszó szennyezőanyag is. Fontos jelenség továbbá a hídpillérek környezetében kialakuló örvényes, összetett áramlás is, ami az uszadék mozgását befolyásolja.

A szimulációs eredményekből a vízfelszín közeli sebességmezőket használtuk fel az uszadék mozgásának értékelésére. A számított sebességvektorok alapján áramvonalakat számítottunk és azzal a feltételezéssel éltünk, hogy az uszadékok nem fognak egymással kölcsönhatni, hanem passzív módon utaznak a felszínen a lokális sebességnagyságok és irányok alapján. Az uszadékvádorlás időbeli alakulásához az áramvonalak mentén úszó részecskék időbeli viselkedését tártuk fel. Az alábbi ábrásorozat (28) a Duna Erzsébet-híd és Lágymányosi-híd közötti szakaszát mutatja be felülnézetből, egy tipikus középvízi állapotra (2200 m³/s dunai vízhozamra). A színek a felszín közeli áramlási sebességek nagyságát mutatják, ami alapján láthatóvá válik, hogy a nagyobb sebességű zónák, vagyis

a sodorvonal, a folyó vonalvezetése miatt inkább a jobb part környezetében (tehát a budai oldalon) alakulnak ki. Az ábrasorozaton a fehér színű részecskék a vízfelszínen vándorló, a felvízi irányból érkező hulladék modellezését illusztrálják. Feltéve, hogy a modellterület befolyási szelvényében (a Margit-hídnál) egyenletes a részecskék szelvény menti eloszlása, a Szabadság-hídhoz érve megfigyelhető, hogy a gyorsabb folyású zónákban már előrébb járnak a jelzőanyagok a magasabb áramlási sebességek miatt. Látható továbbá, hogy a pesti oldal mentén szinte egyáltalán nem utaznak részecskék, míg a budai oldalon sokkal nagyobb számban, vagyis a Duna BME előtti szakaszán valóban a jobb parti sáv van jobban kitéve a hulladék megjelenésének. Az ábrasorozaton a téglalappal jelölt parti sáv ábrázolja azt a területet, ahonnan a hulladék a gyűjtőbe bejuthat, vagyis – ahogy várható volt – a part közelében elhelyezett ponton nem képes a teljes szelvényen átvándorló anyag kigyűjtésére, de mégis, egy jelentős része ezzel a módszerrel kiszűrhető.

A lenti modelleredmények ismertetésének célja jelen tanulmányban pusztán az, hogy bemutassa egy ilyen szimulációs eszköz alkalmazási lehetőségeit. A modellvizsgálatok ismert mederdomborzat és hidrológiai viszonyok mellett bármilyen vízjárási állapotra elvégezhetők, sőt beépíthetők a modellbe jövőbeli beavatkozási módok is, amiknek az áramlásra és pl. az uszadék vándorlására kifejtett hatása így feltárható. A terepi adatgyűjtések mellett a modellezés egy fontos eszköz lehet a telepített uszadékfogó hatékonyságának vizsgálatára, és esetleges módosítások (pl. áthelyezés esetén) hatáselemzésére.



28. ábra: A Duna Erzsébet-híd és Lágymányosi-híd közötti szakasán modellezett áramlási sebességmező, és szimulált felszínközeli uszadékmozgás.

5 Összegzés

Jelen tanulmány a Magyar Nemzeti Bank és a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem közötti együttműködés keretében készült és célja az volt, hogy ismertesse egy folyami műanyag hulladék gyűjtő úszómű kialakítását. A tanulmányban bemutattuk a folyókat érintő műanyag hulladék terhelésének problémakörét, nemzetközi és hazai szinten egyaránt. A tanulmány legfontosabb elemeként, ismertettük a holland ClearRivers nevű cég által fejlesztett uszadékgyűjtő ponton műszaki kialakítását és annak a Duna BME Központi épülete előtti partjára telepített prototípusát. Az uszadékgyűjtő egy meglévő hajókikötő pontonhoz került csatlakoztatásra, és fő célja, hogy a Duna ezen szakaszán a jobb part környezetében vándorló műanyag hulladékot csapdázza. A leírásban kitérünk a hulladék eltávolításának módjára is.

A tanulmányban bemutattunk továbbá két tudományos fejlesztést is, amelyek a műanyagterhelés vizsgálatára alkalmasak: i) egy innovatív, mesterséges intelligenciát felhasználó eljárás, ami az uszadékgyűjtőre telepített kamera képei alapján ismeri fel a vízben úszó műanyagokat, és segítségével a jövőben vizsgálható lesz a folyóban utazó hulladék időbeli és területi dinamikája; ii) egy számítógépes áramlástan szimulációs modell, amely képes a vízfelszín közelében utazó tárgyak pályáinak számítására, és ezzel a hulladékcsapda tervezési és üzemeltetési feladatait támogatjuk.

Irodalomjegyzék

- [1] Miklósi G. (2018): Így néz ki egy 40 éve a Dunába dobott tejeszacskó. https://index.hu/mindekozben/poszt/2018/08/26/youngtimer_tejeszacsko/ Utoljára letöltve: 2021.06.30.
- [2] Geyer R., Jambeck J.R., Law K.L. (2017) Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances 3(7): e1700782, 6p.
- [3] FKF (2021): A fővárosi hulladékhasznosító mű működése. <https://www.fkf.hu/hulladekhasznosito-mukodese> Utoljára letöltve: 2021.06.30.
- [4] Matsui S., Hatta K. (2018): From India to Spain, plastic waste becoming a global threat to ecosystems. Translated by The Mainichi. <https://mainichi.jp/english/articles/20180716/p2a/00m/0na/024000c> Utoljára letöltve: 2021.06.30.
- [5] Lebreton L.C.M, van der Zwet J., Damsteeg J-W, Slat B., Andrady A., Reisser J. (2017) River plastic emissions to the world's oceans. Nature Communications 8:15611, 10p.
- [6] Tóth G. (2021): Percenként 100-120 műanyag palack ömlik át a román határon, részlegesen lezárták a Szamost. <https://telex.hu/belfold/2021/05/20/szamos-arhullam-hulladek-muanyag-romania> Utoljára letöltve: 2021.06.30.
- [7] Gyalai-Korpos M. (2019) Plastic pollution of rivers in the Danube region – Best practices towards reduction of plastic pollution. EUSDR Priority Area 4. (link: https://dunaregiostrategia.kormany.hu/download/3/7f/72000/EUSDR_20191.pdf) Utoljára letöltve: 2021.06.30.
- [8] Lechner A., Keckeis H., Lumesberger-Loisl F., Zens B., Krusch R., Tritthart M., Glas M., Schludermann E. (2014) The Danube so colorful: A potpourri of plastic litter outnumbers fish larvae in Europe's second largest river. Environmental Pollution 188:177-181.
- [9] Lengyel-Szabó P., Szilágyi M., Nyilas G., Simor. D. (2021): A szemét útja a Tiszán: Ukrajnától Magyarorszáig. <https://telex.hu/video/2021/03/24/ukrajna-karpatalja-tisza-szemet-hulladekgyujtes-dokumentumfilm> Utoljára letöltve: 2021.06.30.
- [10] Petkupa: https://petkupa.hu/hu_HU/ Utoljára letöltve: 2021.06.30.

- [11] Hankó G. (2018): Tisza – Tiszta műanyag. <https://afoldgomb.hu/magazin/a-foldgomb-2018-november/tisza-tiszta-muanyag> Utoljára letöltve: 2021.06.30.
- [12] Origo (2018): Kihúztak egy Ladát a Dunából, évtizedekig állhatott benne. <https://www.origo.hu/auto/20181029-kihuztak-egy-ladat-a-dunabol.html> Utoljára letöltve: 2021.06.30.
- [13] Owens K.A., Kamil P.I. (2020) Adapting Coastal Collection Methods for River Assessment to Increase Data on Global Plastic Pollution: Examples From India and Indonesia. *Frontiers in Environmental Science* 8:208, 11p.
- [14] van Lieshout C., van Oeveren K., van Emmerik T., Postma E. (2020) Automated river plastic monitoring using deep learning and cameras. *Earth and Space Science* 7:e2019EA000960, 14p.
- [15] Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.E. (2012) ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. *Advances in Neural Information Processing Systems* 25(2). 2012.jan. DOI: 10.1145/3065386
- [16] LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. (2015) Deep learning, *Nature*, Vol. 521., 436-444p.
- [17] Albelwi, S., Mahmood, A. (2017) A Framework for Designing the Architectures of Deep Convolutional Neural Networks, *Entropy*, Vol. 19 (6), 242p.
- [18] Chen, L., Zhu, Y., Papandreou, G., Schroff, F., Hartwig, A. (2018) Encoder-Decoder with Atrous Separable Convolution for Semantic Image Segmentation, *ArXiv*, 1802.02611
- [19] PyImageSearch: www.pyimageresearch.com Utoljára letöltve: 2021.06.30.
- [20] Olsen N.R.B (2018). SSIIM User's Manual. NTNU Trondheim, Norvégia
- [21] S. B. Pope (2001). *Turbulent Flows*. Cambridge University Press.

A Szerzőkről



Dr. Baranya Sándor PhD, egyetemi docens,
BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Építőmérnöki oklevelét a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen szerezte 2003-ban, PhD fokozatát ugyanitt 2010-ben. Jelenleg a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékének vezetője. A BME mellett vendégkutatóként egy-egy évet töltött a norvégiai NTNU egyetemen (2011) és az egyesült államokbeli University of Iowa-n (2014). Kutatási területe folyók medermorfológiai, áramlástani és hordalékvándorlási vizsgálata terepi eljárásokkal és számítógépes modellezéssel. Elnyerte a Magyar Állami Eötvös Ösztöndíjat, Korányi Ösztöndíjat, Bolyai János kutatási ösztöndíjat, az OTDT Mestertanár Aranyérmét, a BME-n Rektori dicséretben, „TDK Munkáért” oktatói emléklapokban és Pro Progressio Oktatói TDK díjban részesült. H-indexe 13.



Dr. Simongáti Győző PhD, egyetemi docens,
BME Repüléstudományi és Hajózási Tanszék

2002-ben szerezte meg a közlekedéstudomány PhD fokozatát, disszertációjának címe: STPI (a fenntartható közlekedés mutatója) kidolgozása a belvízi hajózás fenntarthatóság elve szerinti értékeléséhez. Kutatási területe belvízi hajózás, nagy és kishajók tervezése, speciális úszóművek, fenntartható közlekedés, hajtásrendszerek optimalizálása. Tudományos közleményeinek száma 38, független hivatkozásainak száma 59. Tagja a Közlekedéstudományi Egyesületnek.



Dr. Hargitai Csaba PhD, egyetemi docens,
BME Repüléstudományi és Hajózási Tanszék

PhD fokozatát közlekedéstudományból 2017-ben szerezte meg, disszertációjának címe: Folyami áruszállító hajók manőverképességét előrejelző mozgás – szimulációs módszer kidolgozása. Kutatási területe a belvízi hajók mozgásszimulációja. Tudományos közleményeinek száma több, mint 50, független hivatkozásainak száma meghaladja a 60-at. Tagja a Budapesti Mérnök Kamarának, és a Közlekedéstudományi Egyesületnek.



Ermilov Alexander Anatol, doktorandusz,
BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Doktori kutatását 2018-ban kezdte, melynek témája a folyami áramlás és a mederfenék kölcsönhatásának vizsgálata. 2015-ben TDK II. helyezés a „Balaton szélkeltette vízcseré folyamatának numerikus modell alapú vizsgálata” c. dolgozattal, majd ezen dolgozattal I. helyezés a Magyar Hidrológiai Társaság Lászlóffy Woldemár pályázatán. MSc diplomamunkáját a Norwegian University of Science and Technology-n írta meg, 2017-ben. 2020-ban az Élet és Tudomány pályázaton, valamint a BME Kutatói pályázaton is III. helyet ért el. Tudományos közleményeinek száma: 12.



Benkő Gergely, tudományos segédmunkatárs,
BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

Építőmérnöki alapidiplomáját a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen szerezte 2019-ban, jelenleg a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékén tudományos segédmunkatárs, és mellette a Budapesti Corvinus Egyetemen mesterképzéses hallgatója. 2018-ban Pro Progressio Hallgatói Ösztöndíjban részesült.