

SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM
Természettudományi és Informatikai Kar
Földtudományok Doktori Iskola
Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék

**A HULLÁMTÉRI NÖVÉNYZET VIZSGÁLATA LÉGI LIDAR ADATOK
ALAPJÁN**

Doktori (PhD) értekezés tézisei

FEHÉRVÁRY ISTVÁN

Témavezető:
Dr. Kiss Tímea
egyetemi docens

Szeged, 2023

1. Előzmények, célkitűzések

A mederszabályozási és ármentesítési munkák következményeként a hidrológiai és geomorfológiai folyamatok alapvetően megváltoztak az ártérből immár hullámtérré vált térszíneken. A Tisza hullámtéren intenzívebbé vált az oldalirányú és vertikális feltöltődés, megváltozott a felszínborítás, invazív növények terjedtek el, és így a növényzeti sűrűség és a hullámtéri érdeesség megnövekedett (Fiala és Kiss 2005; Sándor 2011; Amissah et al. 2018; Nagy et al. 2018ab; Kiss et al. 2019a; Vass et al. 2019). A folyamatok végeredményeként a Tisza partélek közötti (középvízi) medre és a gátak közötti hullámtér (nagyvízi meder) mederkeresztmetszete is csökkent (Kiss et al. 2019b). Ezért a 20. század végén a folyó hidro-morfológiai paraméterei már egyensúlyvesztésre utaltak, amelyet az 1998 és 2006 közötti évek áradásai és az utána következő árvízmentes évtized szélsőségei is igazoltak (Kiss 2014).

Felismerve a hullámtéren és a mederben bekövetkező változásokat, és az ezekből fakadó kihívásokat a vízügyi ágazat szereplői is elkezdtek a problémán dolgozni. A sikeres árvízi védekezés esélyének megőrzésének alapját képezi a „Nagyvízi Mederkezelési Terv” Kormányrendelet (2014), amelynek alapját a vízgazdálkodásról szóló 1995. évi LVII. törvény teremtette meg. A Nagyvízi Mederkezelési Tervek mérlegelési lehetőséget teremtenek a hullámtéri viszonyok megváltoztatásához, hogy az kedvezőbb lefolyási viszonyokat eredményezzen. A gyakorlatban már több példa is látható a hullámtéri mederkezelés megvalósítására (Sági 2015, Vizi 2021), azonban a tervek továbbfejlesztése azok részletesebb, pontosabb adatokkal való feltöltése, valamint az összefüggések feltárása elengedhetetlen mind a vízügyi ágazat, mind pedig az érdekeltek széles köre számára.

A korábbi, pont-szerű kutatások (pl. Oroszi 2009; Sándor 2011; Nagy et al. 2018b; Kiss et al. 2019a; Vass et al. 2019) arra utalnak, hogy a Tisza vízrendszerében a 19. századi, közel természetes állapotok óta a növényzet jelentősen átalakult, amelynek következtében a növényzeti érdeességi viszonyok jelentősen romlottak. Így a hullámtéri növényzet egyre nagyobb mértékben járul hozzá a vízszintek növekedéséhez. Hipotézisem szerint a növényzet alapvetően befolyásolja a levonuló árvízszinteket a vízsebesség csökkentése révén. Ugyanakkor növényzet sűrűségéről és a hullámtér vízszállító kapacitásának csökkenéséről csupán pontszerű adatokkal rendelkezünk (Oroszi 2009; Sándor 2011; Nagy et al. 2018b; Kiss et al. 2019a), miközben térbeli változásairól gyakorlatilag nincs adat. Ugyanakkor véleményem szerint az árvízi kockázat csökkentéséhez és a fluvialis egyensúlyi állapot helyreállításához a hullámtéri növényzeti érdeesség szabályozásán keresztül vezet az egyik megvalósítható út. Ugyanis a hullámtéri növényzet (pl. parlagok, ültetett

erdők, özönfajok bokros foltjai) megfelelő kezelésével javítani lehetne a hullámterek vízszállító képességét, mérsékelni lehetne a feltöltődés mértékét és ezáltal a teljes hullámterei keresztmetszet csökkenésének ütemét, így biztosítva a biztonságos árvízszállítást.

A hullámterei növényzettel kapcsolatos problémák, azaz a területhasználat megváltozása, az invazív fajok robbanásszerű terjedése, és a növényzeti érdesség erőteljes növekedése a teljes hazai Tisza szakaszon jellemzőek (Vass et al. 2019; Gábris és Somhegyi 2003; Nagy et al. 2018a, Kiss et al. 2019ab). Általános célom az, hogy a korábbi pontszerű adatok helyett nagyobb területre is alkalmazható módszerek kidolgozásával meghatározzam a hullámteret borító ártéri növényzet sűrűségét, és az adatok alapján modellezem a hullámterén a víz áramlását, és javaslatokat tegyek a hullámter megfelelő kezelésére.

A PhD dolgozatomban az alábbi részletes célokat tűztem ki:

A hullámter növényzeti típusainak meghatározása

- Milyen statisztikai paraméterek alapján azonosíthatók a LiDAR pontfelhő alapján a hullámterén található főbb növényzeti típusok (ártéri füzes, nemes nyáras, fehér nyáras, gyalogakácos bozót, és nyílt felszín)?
- Milyen pontossággal lehet elkülöníteni a vizsgált növényzeti típusokat? Melyek az osztályozási algoritmusnak a gyengeségei és erősségei?
- Milyen arányban vannak jelen a vizsgált növényzeti típusok a hullámterén? Térben hol találhatóak a sűrű bozótosokat alkotó gyalogakácosok?

A hullámter növényzet sűrűségének meghatározása

- Milyen sűrű a növényzet az árvízzel érintett különböző elöntési magasságokban?
- A vizsgált növényzeti típusokra milyen növényzeti sűrűség a jellemző?
- Hogyan alakul térben a hullámter növényzeti sűrűsége?

A hullámter növényzeti sűrűsége, a vízsebesség és a vízállások kapcsolatának meghatározása

- Hogyan változik a vízsebesség és vízállás a különböző hullámterkezelési scenáriókban?
- Hol vannak a hullámtereken a lefolyási sávok? Hogyan változik a vízsebesség a lefolyási sávokban különböző hullámterkezelési scenáriók mellett?
- Hogyan befolyásolja a növényzet a különböző morfológia paraméterekkel rendelkező kanyarulatokban a hullámterei vízsebességet és áramlási viszonyokat?

2. Vizsgálati módszerek

A növényzeti típusok lehatárolását egy döntési fa alapú osztályozó algoritmussal végeztem el, majd a lehatárolt növényzeti kategóriákban a növényzeti sűrűség meghatározását a visszaverődési arányok elemzésével készítettem el az NRD módszerrel alkalmazásával. A növényzeti sűrűség vízállásra és vízsebességre kifejtett viszonyait a különböző morfológiájú kanyarulatokban HEC-RAS 2D hidrodinamikai szoftverben modelleztem a 2006-os rekord magas vízszintet elérő árhullám alapján. A 2006-os árhullámra kalibrált modellt a 2000-es árhullámra validáltam a vízállások alapján, míg a vízsebességek validációját a 2006-os árvíz során a hullámtér különböző pontjain mért vízsebesség adatok (Sándor 2011) alapján végeztem el.

2.1. A hullámtér növényzeti típusainak meghatározása

A LiDAR (2015) pontfelhő elemzéséhez a Fusion 3.8 és az ArcMap 10.6.1 szoftvereket használtam, az osztályozó algoritmust – döntési fát – pedig Python program nyelven a scikit-learn (0.22.1) könyvtár (Pedregosa et al. 2011) felhasználásával írtam meg. A döntési fa alapján, a teljes mintaterületen meghatároztam az egyes pixelek növényzeti típusát, majd az eredményeket terepi mérésekkel validáltam. A tanulóterületek kijelölésének első lépéseként meghatároztam az azonosítandó növényzeti típusokat: nyílt felszín, gyalogakácos bozót, fiatal nemes nyáras, idős nemes nyáras, ártéri füzes és fehér nyáras. A kategóriák előzetes meghatározását korábbi terepi bejárásaink és Magyarország Erdészeti Webtérképe alapján végeztem. Terepi bejárások és a rendelkezésre álló ortofotó alapján homogén növényzetű, 15x15 m pixelméretű tanulóterületeket jelöltem ki, osztályonként 40-50 darabot. A következő lépésben a növényzetet reprezentáló pontfelhő leíró statisztikai paramétereit számítottam ki 15x15 m felbontásban (cellákban), a Fusion program GridMetrics eszközének segítségével. A következő lépésben a döntési fa algoritmust parametrizáltam. Az általam használt döntési fa a Gini-index alapján határozta meg az osztályokat elválasztó értékeket. A döntési fa paramétereinek beállítását automatizáltan végeztem el a GridsearchCV modul segítségével, figyelembe véve a (1) döntési fa maximális mélységét; (2) a döntési fa leveleinek minimális elemszámát; és a (3) döntési fa leveleinek további felosztását meghatározó minimális elemszámot. Az alábbi paramétereket használtam az osztályozás végrehajtásához: lombkorona relief-arány, magassági értékeinek szórása, a magasság 95%-hoz tartozó magassági érték, magassági pontjainak eloszlásgörbéjének ferdesége, a magasság 99%-hoz tartozó magassági érték. Az algoritmus pontosságának ellenőrzésére kereszt-validációs technikát alkalmaztam, melyet elterjedt a gépi tanulásos problémák megoldásában (Bengio és

Grandvalet 2004). A tanulótérületre kialakított döntési fa pontossága a tízszeres kereszt-validálás alapján 92%. Az osztályozás eredményességét terepi mérésekkel ellenőriztem 2019 telén, amikor DJI Phantom III Pro drónnal légifotókat készítettem 72 ponton. A terepi validáció szerint az osztályozás pontossága 83%.

2.2. A hullámtér növényzet sűrűségének meghatározása

A növényzeti sűrűség kiszámításához különböző magassági (előntési) zónákban (pl. 1-2 m, 2-3 m) méterenként, 15x15 m felbontásban kiszámítottam a LiDAR visszaverődések arányát. A számításokhoz Fusion program DensityMetrics funkcióját használtam, a bemenő adatokat a domborzatmodell és a pontfelhő jelentette. A különböző magassági zónák visszaverődési arányai jelentették a sűrűség számítás alapját. A sűrűség kiszámításhoz az NRD módszert alkalmaztam (Seielstad és Queen, 2003): a vizsgált növényzeti zónából visszaverődő pontok számát elosztottam az adott növényzeti zónából érkező és az alatta lévő visszaverődések összességével. A számításokat méterenként végeztem el, de vizsgálataim során csak a felszín feletti 1-5 méteres zónát elemeztem részletesen, mivel egy árvízi előntés esetén a mintaterületeken ebben a magassági zónában kritikus a növényzeti sűrűség vízsebességre kifejtett hatása.

A növényzet sűrűségét a korábban azonosított növényzeti típusokként tovább elemeztem. Minden felszínfedettségi osztályban méterenként kiszámítottam az NRD sűrűség érték mediánját (Dv_{50}), mivel ez a paraméter az átlagnál kevésbé érzékeny a vegyes pixelekből és az osztályozási hibákból adódó kiugró értékekre; továbbá kiszámítottam felszínfedettségi kategóriánként a felső (Dv_{10}) és alsó tizedbe eső értékek (Dv_{90}) mediánját is, hogy bemutassam a kategóriákon belüli szélsőértékeket.

A növényzeti sűrűségi kategóriák meghatározásához elkészítettem a sűrűség adatok eloszlásvizsgálatát. A hisztogram egycsúcsú, és erősen eltolódott (a 0,1-nél alacsonyabb értékek irányába). Az ilyen erősen "ferde" (skewed) és egy csúccsal rendelkező eloszlásokat a szakirodalom alapján (Francisci 2021; Li és Shan 2022) a geometria eloszlást követő osztályhatárokkal lehet a leghatékonyabban kategóriákba sorolni. Az eloszlásgörbék és a mindszeint illetve algyői területen szerzett terepi tapasztalatok alapján végül öt növényzeti sűrűség kategóriát hoztam létre: nincs aljnövényzet, gyér, közepes, sűrű, nagyon sűrű.

2.3. A hullámtér növényzeti sűrűsége, a vízsebesség és a vízállások kapcsolatának meghatározása

A növényzeti sűrűségviszonyok hidrodinamikai modellezéshez HEC-RAS 2D modellt használtam, melyet a 2006-os árhullámra kalibráltam és a 2000-es

árhullámmal validáltam a vízszintekre vonatkozóan, a vízsebességeket pedig Sándor (2011) mérései alapján validáltam a 2006-os árhullámra. A modellezés során a növényzetsűrűség vízszintekre és vízsebességre kifejtett hatásának vizsgálata volt a cél. A modell felépítse a geometria adatok beépítésével (domborzat, érdesség), a hidrológia hatérfeltételek megadásával (vízállás és vízhozam), a kalibrációs futtatások elvégzésével és a validációjából áll össze. A modell geometria alapjául szolgáló domborzatmodell tartalmazta a hullámtér és a meder magassági adatait. A geometria adatok és a Manning-féle érdességi együtthatók helyes megadása rendkívül fontos a vizsgálat pontossága szempontjából, hiszen ezáltal jellemezhető a hullámtér illetve a meder vízszállító képessége. Az érdességek értékei rendkívül változatosak lehetnek, és nagymértékben függenek különböző környezeti tényezőktől, például a mederanyagtól, a mederfelszíntől, a meder növényzettől, a meder vonalvezetésétől illetve a leülepedett és lebegő hordalék mennyiségétől és minőségétől. A hullámtér növényzete is jelentős befolyásoló tényező, továbbá a műtárgyak (hidak, töltések) is hatással vannak az érdességre (Chow 1959).

A modellezés során az alapváltozaton kívül három modellváltozatot hoztam létre a növényzet sűrűség hatásának kimutatása érdekében. Az alap szcenárió (Sz_jelenlegi) a hullámtéri növényzet jelenlegi állapotának felel meg, így tartalmazza a LiDAR adatok alapján térbelileg kijelölt és a szakirodalmi adatok alapján meghatározott érdesség értékeket. Az (Sz_karbantartott) szcenárióban azt modelleztem, hogy mi történne akkor, ha a hullámtéren a jelenlegi sűrű és nagyon sűrű aljnövényzettel rendelkező, főként invazív fajokkal benőtt növényzeti foltok karbantartott aljnövényzetűek lennének. A legkevésbé kívánatos változásokat bemutató szcenárióban (Sz_invizív) a mai állapotokhoz képest a helyzet tovább romlana az invazív fajoktovábbi terjeszkedése, a szántók feladása és a gondozatlan erdők miatt. Így a nagyon sűrű aljnövényzetű foltok váltanak fel a sűrű, közepes és a gyér aljnövényzetű foltokat. A legkisebb érdességű (Sz_rét) modellváltozat esetében, a teljes hullámteret alacsony fűvű gyepek borítja. Ez a szcenárió egy valóságtól jelentősen eltérő állapotot jelent, amely közelít a szabályozások előtti állapotokhoz: hiszen az I. katonai térkép szerint mindkét mintaterületen mocsarak vagy vízenyős rétek voltak.

A modellezés a 2006-os árvíz április 5-től május 5-ig tartó időszakát fedte le, mivel utoljára ekkor került teljes elöntés alá a hullámtér. Ráadásul a legmagasabb vízszint csaknem a gátak tetejéig ért (vízboritottság átlagosan 5-6 m), így ez az időszak volt a legideálisabb a hullámtéri növényzet lefolyásra kifejtett hatásának vizsgálatára. A felső peremfeltételt vízhozamként, míg az alsó peremfeltételt vízállásként adtam meg. Mivel a modell output adatai közül a kutatás céljainak megfelelően a mintaterületen kialakult sebességviszonyok voltak a legfontosabbak,

így a teljes megoldó képletet tartalmazó SW Momentum algoritmust használtam, amely képes a bonyolultabb áramlási viszonyok modellezésére megnövekedett számítási kapacitás mellett.

A kalibráció során a 2D áramlásmodellek a 2006. évi árvízre kerületek bearányosításra a vízrajzi adatok, valamint az aljnövényzet térbeli eloszlása alapján. A modellek kalibrációja a 2006. évi árvíz tetőzésekor érvényes, a töltéseken végzett vízszintrögzítés adatai alapján készült. A hossz-szelvényekről megállapítható, hogy a kialakult vízszinteket megfelelően leképezi a modell, a legnagyobb eltérések a modellezett terület felvízi szakaszán tapasztalhatók (Mindszent -9 cm, Algyő -7 cm). Ezért részletesen csak a modellezett területek központi részét (Mindszent: 214-211 fkm; Algyő: 184- 181 fkm) elemeztem, ahol a pontosság ± 5 cm-en belüli volt.

A kalibrált modell validálása a 2000. évi árvíz tetőzésekor érvényes hidrológiai adatok felhasználásával készült. A validációhoz felhasználásra kerültek határfeltételként a 2000-es árhullámra a KÖTIVIZIG által kalibrált modell adatai, valamint az adott időszakra előállított felszínfedettség adatok. A növényzeti adatokat – egy 2000-ben készült 10 cm felbontású ortofotó alapján becsültem meg, melyet az ATIVIZIG bocsátott rendelkezésemre. Az ellenőrző illesztés (2000 árvíz vízszintrögzítés értékei és a 2000-es árvíz modellezett vízállás) értékei tetőzéskor nem adtak kielégítő egyezést, mivel az eltérések több helyen meghaladták a 20 cm-t. Ennek lehetséges okai a (1) vizsgált árhullámok során létrejött átlagos hullámtéri vízmélységek különbsége, és a (2) a 2000 és 2006 között az aljnövényzet sűrűségének növekedése. Ezt figyelembe véve, a validáció során az erdőművelési ágú területekre meghatározott Manning érdességi együttható értékeit egységesen csökkentettem. A vizsgált folyószakasz teljes hosszszelvénye mentén a mért és számított vízszintek nagyon jó egyezést mutattak, a különbségek 10 cm-en belül alakultak.

Sándor (2011) méréseinek köszönhetően a modellt nem csak a vízállásra, hanem vízsebességekre is tudtam validálni, összesen 23 mérési pont alapján. A méréseket a mindszenti mintaterület a bal parti hullámtéren végezte Sándor Andrea és Kiss Tímea 2006, április 30-án 1018 cm-es vízállásnál, 8 nappal az árhullám tetőzése után. A mérések összesítése alapján a modellezett és a mért sebességek között átlagosan 0,1 m/s volt az eltérés, ami, figyelembe véve a műszer mérési pontosságát elfogadható eredménynek számít. A legnagyobb eltérés 0,3 m/s volt, amikor a 0,12 m/s mért érték helyett 0,42 m/s lett a modellezett, viszont 6 olyan mérési pont is volt (azaz a mérések több mint negyede), ahol az eltérések $\pm 0,01$ m/s pontosságúak voltak.

3. Eredmények

1. Egy terület növényzeti típusai nagy pontossággal meghatározhatók LiDAR alapú adatok alapján gépi tanulással, még a sűrű aljnövényzetű hullámtereken is. A felhasznált döntési fa algoritmussal az alsó-tiszai hullámterén az erdők tovább osztályozhatóak (ártéri füzesek, fehér nyárasok, idős nemes nyárasok, fiatal nemes nyárasok), illetve a nyílt felszínnek és gyalogakácós bozótosok jól elkülöníthetők.

Nagyon sűrű növényzet esetén fennáll az elvi veszélye annak, hogy a sűrű lombkorona miatt az alsóbb szintek a LiDAR pontfelhőn alig látszódnak, ami pontatlan osztályozást eredményezhet. Ennek ellenére az általam végzett osztályozás pontossága (83%) a szakirodalomban található adatokhoz illeszkedik, mivel sűrű bokros illetve ártéri területeken hasonló eredmények születtek. Például ártéri erdőben Saarinen et al. (2013) mobil lézer szkennerek adatok osztályozásával 72,6%-os pontosságot ért el, míg Michez et al. (2016) 79,5-84,1%-os pontosságot kapott drónnal felmért pontfelhő osztályozása során. Bokros területen Madsen et al. (2020) 86,9-95,2%-os osztályozási pontosságot ért el légi LiDAR adatok osztályozása során.

A Mindszenti területen az erdők a terület 74,1%-át borítják, és itt a leggyakoribb növényzeti kategóriát (32%) az idős nemes nyárasok alkotják. Ezzel szemben az algyői mintaterületen az erdők aránya 81,4 %, amelyekben dominálnak az ártéri füzesek (38,2%). Tehát az erdők területe a korábbi alsó-tiszai mérésekkel egyezik (Kiss et al. 2019b; Nagy 2020), de az általam alkalmazott módszerrel az erdők típusa is megadható. Az eredmények a modellezési és tervezési munkálatok során, illetve a természetvédelemben is jól hasznosulhatnak, nagyfelbontású pontos képet adnak raszteres vagy vektoros formában a hullámterei vegetációról.

2. A LiDAR pontfelhőből számított NRD (normalizált relatív pontsűrűség) értékek meghatározásával a növényzeti kategóriákon belül, illetve az árvízi elöntés magassági zónáin belül a növényzeti sűrűség pontosan megadható adott időpillanatban, még olyan sűrű növényzet esetén is, mint ami a Tisza árterén jelenleg jellemző.

Az erdők zöme, azaz Mindszentről 48%-a, Algyőnél pedig 62% a közepes vagy nagyobb sűrűségű kategóriákba tartozik, és ezen belül a vizsgált mintaterületek harmada (Mindszenti 28%, Algyő 37%) sűrű vagy nagyon sűrű aljnövényzettel rendelkezik. A sűrűség értékek térbeli elemzése azt mutatja, hogy a mintaterületek a sűrű növényzeti foltok a partmenti sávban helyezkednek el legtöbbször felhagyott erdő, illetve szántóterületeken. A terepbejárásaink azt igazolják, hogy a

megnövekedett aljnövényzeti sűrűségért elsősorban a gyalogkakác és egyéb özönnövények felelősek, amelyek csaknem teljesen kiszorítják az őshonos cserjeszintet. Bár Sándor (2006) és Delai et al. (2018) hasonló következtetésre jutott néhány pont vizsgálata alapján, de vizsgálatom igazolta, hogy a mintaterület egészen az özönfajok terjedése az aljnövényzet sűrűségének jelentős növekedését okozza, ugyanakkor az is bizonyítást nyert, hogy ez térben nem egyenletes.

Az alkalmazott módszerrel az árvízi lefolyást akadályozó növényzeti foltok pontosan lehatárolhatók, ami – az olyan nagy kiterjedésű területeken, mint a hullámtér – segítheti a növényzet gondozásának (management) pontos tervezését, illetve a hatóságok ellenőrzését.

3. Az előállított növényzeti sűrűség térképek felhasználásával a Manning-féle érdességi együtthatón belül a növényzeti érdesség térbelisége pontosan és naprakészen meghatározható az egyes elöntési zónákhoz kapcsolódóan.

Eredményeim szerint az 1-2 méteres zónában a gyalogkakácok voxeljei rendelkeznek a legmagasabb sűrűségi értékkel (NRD₅₀: 0,051). Ugyanebben a magassági zónában az ártéri füzesek aljnövényzete már csaknem fele ilyen sűrű (NRD₅₀: 0,029), míg az idős nemes nyárasok ezen zónájában a sűrűség medián értéke (NRD₅₀: 0,024) további 17%-kal kisebb mint a füzesekben mért érték, és 53%-kal kisebb, mint a gyalogkakácokban. A fehér nyárasokban a sűrűség medián értéke (NRD₅₀: 0,021) 28%-kal kisebb, mint a füzesekben és 59%-kal alacsonyabb, mint a gyalogkakácokban. A legalacsonyabb növényzeti sűrűség értéket az időnként karbantartott aljnövényzetű fiatal nemes nyárasok esetében mértem (NRD₅₀:0,007).

A különböző növényzeti kategóriák sűrűségének változásai a különböző magassági zónákban jól magyarázhatók a jellegzetes társulás- és ágszerkezetükkel. Az erdők természetes felújulásának hiánya, illetve az őshonos bokrok kiszorulása miatt a cserjeszintben ma már dominál a gyalogkakác. Ennek jellegzetes magassága 3 m körüli, bár az idősebb példányok e magasság fölé is nyúlhatnak. A gyalogkakácokban, illetve a gyalogkakáccal fertőzött erdőfoltokban – főleg azok peremén, ahol elegendő fény áll rendelkezésre – az 1-3 m közötti elöntési szintben igen sűrű növényzetű. Efölött, a 3-5 méteres sávban már a természetes füzesek és fehér nyárasok fainak lombkoronájának talpa teszi sűrűvé a zónát. Az ültetett nyáragyér ágszerkezete, illetve a fiatal állományok aljnövényzetének ritkítása miatt ezeknek a foltoknak a legkisebb a növényzeti sűrűsége az egyes szintekben.

A kis esésű, síkvidéki hullámterek elsődleges hidrológiai funkciója, hogy biztosítsák az árvizek akadálytalan lefolyását. Ezzel összefüggésben kiszámítottam, hogy az elemzett magassági zónákat (1-5 m) milyen visszatérési idejű árvizek

önthetik el. A vizsgált algyői hullámtéren az 1-2 méteres magassági zónában a sűrű növényzeti foltok foglalták el a legnagyobb területet (39%), és így a nagyon sűrű növényzeti oszállyal (12 %) együtt a mintaterület felét (51%) borítják. Ezek a térszínek kb. 2 évente kerülnek elöntés alá, lassítva a levonulót, 550-650 cm magas árhullámokat. Az adatok azt is mutatják, hogy ezek a viszonylag gyakori, de kis magasságú árvizek lassulhatnak le leginkább a sűrű aljnövényzet miatt. A két mintaterület növényzeti érdekessége hasonló, ráadásul az egymáshoz való közelségük miatt nincs olyan hidrológiai befolyásoló tényező sem, ami különböző eredményre vezetne.

Véleményem szerint az ortofotó alapú módszerek nem nyújtanak lehetőséget a növényzeti sűrűség pontos vizsgálatára, hiszen a lombkorona tetejét mutatják és nem az aljnövényzet sűrűségét, míg a terepi mérések alapján csupán pontszerű adat gyűjthető kis és megközelíthető területeken. Az általam bemutatott módszerrel azonban nagy területen lehet képet kapni a sűrűségviszonyok aktuális helyzetéről.

4. A különböző növényzeti sűrűségű hullámtéri viszonyok modellezése alapján minél sűrűbb a hullámtér növényzete, annál inkább növeli a tetőzési vízszinteket (Mindszent +24 cm, Algyő +18 cm), csökkenti a vízsebességek területi átlagát a hullámtéren (0,41 m/s-ról 0,17 m/s-ra) és növeli a mederbeli vízsebességek átlagát (0,59 m/s-ról 0,98 m/s-ra).

A modellezések alapján a mindszeinti mintaterület közepénél (213,4 fkm) levő szelvény mentén amennyiben az erdőben az aljnövényzet karban lenne tartva (Sz_karbantartott), tetőzéskor az Sz_jelenlegi és Sz_karbantartott scenárió közötti vízszint különbség elérte a 10 cm-es különbséget, azaz az erdők karbantartása a mintaterületen 10 cm-es csökkenést okozna a tetőző vízszintekben. A benőtt aljnövényzetű sűrű erdők hatását a vízállásokra Sz_invizív scenárió vízállásgörbéje szemlélteti Sz_jelenlegi scenárióhoz képest tetőzéskor 7 cm-rel adódott magasabb vízállás. Amennyiben az árvízi levonulás szempontjából legideálisabb legelő vagy rét lenne a mindszeinti hullámtéren, a tetőzés időpontjában 17 cm-rel alacsonyabb lenne a vízállás az Sz_jelenlegi scenárióhoz képest. Összehasonlítva az Algyőnél (182,6 fkm) bekövetkezett vízállásváltozásokat a mindszeinti változásokkal azt láthatjuk, hogy a két mintaterületen az árhullám görbéje szinte teljesen megegyezik, melynek oka az alacsony esés, és az, hogy a mintaterületeken a folyamatokat ugyanazon tényezők befolyásolják. Algyőnél az Sz_karbantartott scenárióban 6 cm-rel adódtak alacsonyabb vízállások, mint az Sz_jelenlegi scenárióban. Az algyői mintaterületen az erdőterületek aljnövényzetének további sűrűség-növekedése (Sz_invizív) 6 cm-rel növelné meg a kialakuló vízállásokat továbbá Sz_rét

modellváltozat esetében a jelenlegi állapothoz képest 12-cm-rel alacsonyabb vízállások alakulnának ki a vizsgált szelvényben.

Amennyiben a mindszei mintaterületen a sűrű és nagyon sűrű osztályokba sorolt erdők aljnövényzetét gondoznák (Sz_karbantartott), a hullámtéren a sebességmezők átlaga tetőzéskor 0,28 m/s-ra nőne, azaz 16%-kal emelkedne a hullámtéri átlagsebesség, tehát felgyorsulna az árhullámok levonulása. A negatív szélsőséget a lefolyás szempontjából az jelentené, ha az erdőkben sűrű lenne az aljnövényzet, és a parlagokat is ellepnék az invazív fajok (Sz_invazív). Tetőzéskor Sz_invazív (0,17 m/s) és Sz_jelenlegi (0,24 m/s) szcenárió között 30%-os sebességcsökkenés jelentkezik. Amennyiben a vizsgált hullámteret teljes mértékben rétnyílt felszín borítaná (Sz_rét), a területi átlagsebesség tetőzéskor 0,41 m/s-nak adódna, ami 68%-kal haladja meg az alap állapot (Sz_jelenlegi) sebességviszonyait.

A mederben az árvíz vízsebessége szoros kapcsolatban van a hullámtér vízsebességével, ugyanis a modellek azt mutatják, hogy ha a hullámtéren nő a vízsebesség, akkor a mederben csökken. Sz_karbantartott szcenárió során a mederben tetőzéskor 7%-kal kisebb volt a mederben a vízsebesség területi átlaga (0,8 m/s), mint a kiindulási szcenárióban (0,86 m/s). A fentiekkel szemben az aljnövényzet sűrűségének növekedésével (Sz_invazív) a mederben az átlagsebesség növekedése figyelhető meg. Az Sz_invazív szcenárió során a mederben a vízsebesség átlaga 0,86 m/s-ról 0,98 m/s-ra nőtt a tetőzésig, ami 14%-kal magasabb, mint az Sz_jelenlegi szcenárió esetében. Sz_rét szcenárióban, melyben a hullámtér növényzeti akadályok megszűnése miatt teljes szelvényében le tudja vezetni az árhullámot a tetőzés időpontjában a meder területi átlagának (0,59 m/s) vízsebesség értéke 32%-kal kevesebb, mint az Sz_jelenlegi szcenárióban (0,86 m/s).

5. A hullámtér és meder átlagsebességeinek kapcsolatát egy hurokgörbe írja le, azaz a meder és a hullámtér sebességviszonyai közötti összefüggés az árhullám csúcsán megváltozik.

A hullámtéri növényzet sűrűségének növekedésével a hurokgörbe egyre inkább a mederbeli vízsebességek tengelye felé (órmutató járásával ellentétesen) tolódik el, azaz a mederben egyre nőnek a vízsebességek a növényzeti sűrűség növekedésének hatására.

Az árvíz áradó ágában (hurokgörbe első szakasza) a mederben a sebességek alig változnak, míg a hullámtéren intenzív sebességnövekedés látható, ami a hullámtéren szétterjedő árhullámmal magyarázható. Miután az árhullám kiterül a hullámtérre, a mederben intenzívebbé válik a sebesség növekedése a növényzeti érdesség függvényében. Tetőzéskor a görbe megfordul, majd a tetőzés után az apadás lassú folyamatként indul meg, a hullámtéren és a mederben is mérséklődnek a sebességek.

A árvíz intenzíven apadó ágában a víztömeg nagy része a mederben indul meg, itt kezdenek el újból növekedni a sebességértékek, míg a hullámtéren továbbra is lassan csökkenek.

6. A hullámtérre kiáramló víz jellegzetes útvonalakat követ, amelyek hatékonysága függ a növényzet sűrűségétől. Minél kisebb a partmenti sáv növényzeti sűrűsége, annál szélesebb sávban továbbítják a fokok a vizet és annál nagyobb vízsebességgel a hullámtér távolabbi területei felé.

A hullámtéren a víz mozgását alapvetően befolyásolják a víz továbbítását segítő fokok és sarlólaposok, illetve a vízmozgást eltérítő vagy gátló magasabb formák (pl. folyóhátak, mesterséges gátak). A mindszei mintaterületen a 2006-os árhullámot bemutató Sz₂ jelenlegi szcenárióban a bal oldali hullámtéren a sűrű aljnövényzetű, folyóparti zónában a vízsebesség még tetőzéskor sem haladja meg 0,1-0,2 m/s-ot, ugyanakkor ez a nagy érdességű sáv szinte a töltésnek szorítja a vízáramlást. A gyér növényzetű nemes nyárasban, különösen annak mélyfekvésű területein (egykori elszántott kubikgödrök) 0,5-0,6 m/s-ra gyorsul a víz és jól kirajzolódik, hogy az ártér közepén húzódó csatorna, illetve a fásorok ebben a helyzetben alapvetően képesek befolyásolni a vízáramlást. A mederben 1-1,1 m/s a jellemző vízsebesség. A mederből több kisebb fokon lép ki a víz a hullámtérre, egyikük egy mélyfekvésű sarlólapossal a szántóterületre vezeti a vizet, ahol 0,4-0,5 m/s sebesség értékek alakulnak ki. Ezzel szemben a sűrű és nagyon sűrű aljnövényzetű területeken 0,1-0,2 m/s-ra lassul le a vízáramlás sebessége.

A mindszei területtel összehasonlítva az algyői területen az átlagsebességek értéke csupán 5-10%-os eltérést mutat, ami a különböző medergeometriának és az eltérő növényzetnek tudható be. Az algyői egyenes folyószakaszon hullámtéri sebességek eloszlása egyenletesebb, és az alvízi elhelyezkedés miatt az apadás hatása időben később érzékelhető. Az összehasonítás azt mutatja, hogy a hullámtéren a vízsebességet leginkább befolyásoló tényező a növényzet, de befolyásolja a domborzat (sarlólaposok, kubikgödrök) és a hullámtér szélessége is.

A jövőbeli tervezés szempontjából azt is jelentheti, hogy érdemes a vízvezető sávokat fenntartani, növényzetüket kiemelten gondozni, így a vízkilépést elősegíteni. Ez pozitívan befolyásolhatná a mederbéli folyamatokat is, mivel csökkentené a meder vízsebességét és bevágódását.

7. A hullámtéren a sűrű vegetáció árvízvédelmi szempontból káros, mivel egyrészt növeli a tetőző vízszinteket, másrészt nemkívánatos irányba tolja a hullámtéri vízsebességeket.

Az elemzett scenáriókból (Sz_karbantartott, Sz_invazív) kitérünk, hogy az özönfajok további terjedése és az ehhez köthető növényzeti érdesség növekedés tovább növelné az árvízszinteket (Mindszent +7 cm, Algyő +6 cm), míg a növényzet karbantartása (Mindszent -10 cm, Algyő -6 cm) csökkentené. De az tény, hogy a vízszint már „csak” 7 cm-rel emelkedne a gondozatlan aljnövényzet miatt, jól mutatja, hogy már a jelenlegi állapotban is sűrű cserjeszintű növényzet, elsősorban invazív fajokkal benőtt térszínek uralják a hullámteret. Amennyiben rövid fűvű rét és legelő borítaná a hullámteret a mintaterületeken egy a 2006-os árvízhez hasonló ár hullám esetén a lokálisan Mindszentnél 17 cm-rel míg, Algyőnél 12 cm-rel alacsonyabb vízállás alakulna ki, ami jelentősnek mondható, hiszen bizonyos helyeken a gát tetejével egy szintben tetőzött a 2006-os árvíz.

A hullámtéren, illetve elsősorban a part menti sűrű vegetáció nagyobb vízsebességű áramlási zónákat (0,5-0,6 m/s) hoz létre az árvízvédelmi töltés előterében és a mederben (1-1,2 m/s). Ez részben árvízvédelmi szempontól káros, hiszen a védműveknek nekifeszülő víz a gátakat megbonthatja (Altinakar et al. 2008). A hullámtéren a vízszállítás lelassulása az akkumuláció felgyorsulását eredményezi (Sándor és Kiss 2008; Nagy et al. 2018b; Kiss et al. 2019b), és ez tovább emeli az árvízszinteket (Kiss et al. 2019a). A mederben a nagy vízsebesség fokozza a bevágódást, ami megnehezíti kisvízkor a vízkivételt, és csökkenti szárazság idején a környező talajvízszinteket (Lóczy et al. 2016).

8. A hullámtéren a növényzetet érintő beavatkozások (pl. invazív fajok eltávolítása, alacsonyabb növényzeti érdességű sávok kialakítása) csak hosszabb folyószakaszon (több 10 km) megvalósítva képesek fenntarthatóan csökkenteni az ár hullámok csúcsait.

A Maroson, a Közép- és az Alsó-Tiszán végzett modellezéseim eredményei alapján (Nagy et al. 2018b, Kiss et al. 2019) a kezelt terület vízszintekre kifejtett hatása függ a terület nagyságától, és az esésviszonyoktól. Az alsó tiszai mintaterületen egy 10 km szakaszon történő növényzeti karbantartás a mintaterület felvízi szelvényében 22 cm apasztó hatást jelent, míg a nagyobb esésű marosi mintaterületen 34 cm a különbség a karbantartott terület felvízi szelvényben. Fontos kiemelni, hogy ezen csúcserőterek alvízi irányba haladva egyre csökkennek. Az alvízi szelvényben a marosi mintaterület esetében már csak 2 cm apasztás figyelhető meg, míg az alsó-tiszai mintaterületen visszaduzzasztás figyelhető meg és az alvízi részen 5 cm-rel magasabb vízállások alakulnak ki, mint a karbantartás előtt, mivel az alvízi szakasz sűrű növényzete lassítja a vízmozgást.

Tehát foltokban karbantartott hullámtéri területeknek nincs jelentős hatása a vízszállításra, ezért a hullámterek menedzsmentjét átfogóan, nagy területekre

vonatkozóan kell megtervezni. Ezen tervek létrehozására eredményesen alkalmazhatóak a LiDAR és gépi tanulás alapú osztályozási módszerek, melyek kombinálva a 2D hidrodinamikai modellezéssel pontos képet adnak a beavatkozások hatásairól és a hatások mértékéről.

5. Irodalomjegyzék

- Amissah G.J., Kiss T., Fiala K. 2018: Morphological Evolution of the Lower Tisza River (Hungary) in the 20th Century in Response to Human Interventions *WATER* 10/7, 884, p. 20.
- Bengio, Y., Grandvalet, Y. 2004: No Unbiased Estimator of the Variance of K-Fold Cross-Validation. *J. of Machine Learning Research* 5, 1089–1105.
- Bogdánfy Ö. 1901: Hidrológia. Pátria Nyomda, Budapest, p. 165.
- Chow, V.T. 1959: Open channel hydraulics. McGraw-Hill, New York, p. 364.
- Delai, F.; Kiss, T.; Nagy, J. 2018: Field-based estimates of floodplain roughness along the Tisza River (Hungary): The role of invasive *Amorpha fruticosa*. *Appl. Geogr.* 2018, 90, 96–105.
- Dunka S., Fejér L., Vágás I. 1996: A veritékes honfoglalás: A Tisza-szabályozás története. Vízügyi Múzeum, Budapest, p. 215.
- Fiala K., Kiss T. 2005: A középvízi meder változásai az 1890-es évektől az Alsó-Tiszán. *Hidrológiai Közlöny*, 85/3. 60-65.
- Francisci D. A. 2021: Python Script for Geometric Interval Classification in QGIS: A Useful Tool for Archaeologists. *Environ. Sci. Proc.*10/1.
- Gábris Gy., Somhegyi A. 2003: Árvízi tározás vagy ártéri gazdálkodás a Tisza mentén. in: Csorba P.(szerk.): Környezetvédelmi mozaikok - Tiszletekötet Kerényi Attila 60. születésnapjára. CIVIS-COPY Kft, Debrecen. 81-95.
- Kiss T. 2014: Fluviális folyamatok antropogén hatásra megváltozó dinamikája: egyensúly és érzékenység vizsgálata folyóvízi környezetben. Akadémiai doktori értekezés, Szeged, p. 163.
- Kiss T., Fiala K., Sipos Gy., Szatmári G. 2019b: Long-term hydrological changes after various river regulation measures: are we responsible for flow extremes? *Hydrology Research*, 50/2. 417-430.
- Kiss T., Nagy J., Fehérváry I., Vaszkó Cs. 2019a: (Mis)management of floodplain vegetation: The effect of invasive species on vegetation roughness and flood levels. *Science of The Total Environment* 686, 931-945.
- Kormányrendelet (2014): A 83/2014. (III. 14.) Korm. rendelet a nagyvízi meder, a parti sáv, a vízjárta és a fakadó vizek által veszélyeztetett területek használatáról, hasznosításáról, valamint a folyók esetében a nagyvízi mederkezelési terv készítésének rendjére és tartalmára vonatkozó szabályokról.

- Lászlóffy W. 1982: A Tisza. Vízi munkálatok és vízgazdálkodás a Tisza vízrendszerében. Akadémiai Kiadó, Budapest. p. 610.
- Li S., Shan J. 2022: Adaptive Geometric Interval Classifier. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 11. 430.
- Madsen B., Treier A. U., Zilinszky A., Lucieer A., Normand S. 2020: Detecting shrub encroachment in seminatural grasslands using UAS LiDAR. Ecology and Evolution 10(11): 4876–4902.
- Michez A., Piégay H., Jonathan L., Claessens H., Lejeune P. 2016: Mapping of riparian invasive species with supervised classification of Unmanned Aerial System (UAS) imagery. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 44. 88–94.
- Mustafa, A., Mcgrath, M., Ozeren, Y., Hamzeh O. 2008: Modeling and Risk Analysis for Floods due to Failure of Water Control Infrastructures.
- Nagy J. 2020: Hullámtéri akkumuláció és az azt befolyásoló tényezők vizsgálata az Alsó-Tiszán. PhD Doktori értekezés. SZTE, TFGT, p. 151.
- Nagy J., Kiss T., Fehérvári I., Vaszkó, Cs. 2018b: Changes in floodplain vegetation density and the impact of invasive *Amorpha fruticosa* on flood conveyance. J. Environ. Geogr. 11. 3–12.
- Nagy J., Kiss T., Fiala K. 2018a: Hullámtér-feltöltődés vizsgálata az Alsó-Tisza mentén. II. Folyóhátak (parti hátak) feltöltődését befolyásoló tényezők. Hidrológiai Közlöny 2018/98. 33-39.
- Oroszi V. 2009: Hullámtér-fejlődés vizsgálata a Maros magyarországi szakaszán. Doktori értekezés, SZTE, TFGT, p. 127.
- Pedregosa F., Varoquaux G., Gramfort A., Michel V., Thirion B., Grisel O., Blondel M., Prettenhofer P., Weiss R., Dubourg V., Vanderplas J., Passos A., Cournapeau D., Brucher M., Perrot M., Duchesnay É. 2011. Scikit-learn: Machine Learning in Python. J. of Machine Learning Res. 12/85, 2825–2830.
- Saarinen N., Vastaranta M., Vaaja M., Lotsari E., Jaakkola A., Kukko A., Kaartinen H., Holopainen M., Hyypä H., Alho P. 2013: Area-based approach for mapping and monitoring riverine vegetation using mobile laser scanning. Remote Sens. 5. 5285–5303.
- Sági R. 2015: A Tisza folyó 159,6-253,8 fkm közötti szakaszának nagyvízi mederkezelési tervéhez kapcsolódó kétdimenziós hidrodinamikai modellvizsgálat. Modellvizsgálati dokumentáció p. 55.
- Sándor A. 2011: A hullámtér feltöltődés folyamatának vizsgálata a Tisza középső és alsó szakaszán. Doktori értekezés. SZTE, TFGT, p. 121.
- Seielstad C.A.; Queen L.P. Using Airborne Laser Altimetry to Determine Fuel Models for estimating fire behaviour : 2003 J. For. 101. 10–15.
- Somogyi S. 2000: A XIX. századi folyószabályozások és ármentesítések földrajzi és ökológiai hatásai. MTA FKI, Budapest, p. 302.

- Szlávik L. 2000: Az Alföld árvízi veszélyeztetettsége. In: Pálfi I.(szerk.): A víz szerepe és jelentősége az Alföldön. A Nagyalföld Alapítvány Kötetei 6, 64-84.
- Vágás I. 1982: A Tisza árvizei. Vízügyi Dokumentációs és Továbbképző Intézet, Budapest, p. 283.
- Vágás I., Bezdán M. 2015: A Tisza és árvizei. Szeged, p. 189.
- Vass R., Takács L., Czomba P. 2019: A hullámtéri érdeesség változásának kapcsolata a feltöltődéssel a Felső-Tisza mentén. Térinformatikai Konferencia és Szakkiállítás, Debrecen, 10p.
- Vizi D.B. 2021: Floodplain restoration with dyke relocations in the Middle Tisza District, Hungary In: Rivers and Floodplains in the Anthropocene - Upcoming Challenges in the Danube River Basin. 34-34.

Az értekezéshez felhasznált publikációk

- Fehérvári I., Kiss T.** 2020: Identification of Riparian Vegetation Types with Machine Learning Based on LiDAR Point-Cloud Made Along the Lower Tisza's Floodplain. *Journal of Environmental Geography* 13, 53-61.
- Fehérvári I., Kiss T.** 2020: Növényzettípusok lehatárolása gépi tanulással légi LiDAR felvételek alapján egy alsó-tiszai hullámtéri mintaterületen *Tájökológiai Lapok / Journal of Landscape Ecology*, 18, 127-140.
- Fehérvári I., Kiss T.** 2021: Riparian Vegetation Density Mapping of an Extremely Densely Vegetated Confined Floodplain. *Hydrology*, 8/4 176, p. 25.
- Kiss T., Nagy J., **Fehérvári I.,** Amisshah G. J., Fiala K., Sipos Gy. 2021: Increased flood height driven by local factors on a regulated river with a confined floodplain, Lower Tisza, Hungary. *Geomorphology* 389. p. 14.
- Kiss T., Nagy J., **Fehérvári I.,** Vaszkó Cs. 2019: (Mis) management of floodplain vegetation: The effect of invasive species on vegetation roughness and flood levels *Science of the Total Environment*, pp. 931-945.
- Nagy J., Kiss T., **Fehérvári I.,** Vaszkó Cs. 2018: Changes in Floodplain Vegetation Density and the Impact of Invasive *Amorpha fruticosa* on Flood Conveyance *Journal of Environmental Geography* 11/3-4, pp. 3-12.