

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Földtudományok Doktori Iskola

Numerikus hidrológiai modellezés és folyami jégviszonyok előrejelzése

PhD értekezés tézisei

LIPTAY ZOLTÁN ÁRPÁD

Témavezetők:

dr. Czigány Szabolcs

Egyetemi docens

dr. Pirkhoffer Ervin

Egyetemi docens

PÉCS, 2018

A doktori iskola neve: PTE Földtudományok Doktori Iskola
Vezetője: Dr. Dövényi Zoltán DSc. egyetemi tanár
PTE TTK Földrajzi Intézet
Társadalomföldrajzi és Urbanisztika Tanszék

A doktori témacsoport neve: Természetföldrajz és tájértékelés
Vezetője: Dr. habil Lóczy Dénes egyetemi tanár,
MTA doktora
PTE TTK Földrajzi Intézet
Természet- és Környezetföldrajzi Tanszék

Az értekezés tudományága: Hidrológia
Témavezető: Dr. Czigány Szabolcs egyetemi docens
PTE TTK Földrajzi Intézet
Természet- és Környezetföldrajzi Tanszék

Dr. Pirkhoffer Ervin egyetemi docens
PTE TTK Földrajzi Intézet
Természet- és Környezetföldrajzi Tanszék

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés.....	4
1.1. Kutatási célkitűzés.....	4
1.2. Hipotézisek.....	4
2. Kutatási módszerek	5
3. Eredmények összefoglalása.....	7
3.1. Eredmények az alapösszefüggéssel.....	7
3.2. A fagypon alatti tartomány.....	8
3.3. A vízhőmérsékletek alakulása	9
3.4. A vízjárás hatása.....	10
3.5. Mellékvízfolyások hatása	12
4. Konklúzió.....	14
5. Irodalomjegyzék.....	16
6. Publikációk jegyzéke.....	18
6.1. A disszertáció alapjául szolgáló publikációk	18
6.2. Egyéb publikációk.....	18

1. BEVEZETÉS

1.1. Kutatási célkitűzés

A vízkörforgás intenzitásának növekedése az éghajlatváltozás következtében az elmúlt években számos szélsőséges árvízi esemény kialakulásához vezetett, de a jég képződéséhez szükséges hidrometeorológiai feltételek csak néhány esetben álltak fent, a két jelenség pedig még ritkább esetben kapcsolódik egymáshoz. Ilyen volt a 2017. évi dunai jéghelyzet, majd az azt közvetlenül követő tiszai jeges árvíz. Ezen események rámutattak arra, hogy az akkor igen alacsony mederteltségű Duna öt jégmentes esztendő elteltével is tud váratlan helyzetet előidézni, ugyanúgy, ahogy a Tisza vízgyűjtőjén egy időben kialakuló erős jégbeállás és hóolvadásból meginduló árhullám is. Ezek fokozott fenyegetést jelentenek anyagi kár, és emberélet szempontjából is, így biztonságos levezetésük kiemelten fontos, de összetett mérnöki feladat. Az ilyen és ehhez hasonló események előrejelzése és a felkészülés a jeges védekezés egyik legfontosabb eleme.

A hazai folyami jégviszonyok, jégészlelés és jégelőrejelzés rövid áttekintése mellett kutatásom fő célja egy alternatív jégelőrejelzési módszer kidolgozása, amely a jelenlegi gyakorlathoz képest csekély adatigényű és koncentrált paraméterű, de kielégítő pontosságú a jég megjelenésének, eltűnésének, valamint a vízhőmérsékletek napi alakulásának predikcióját illetően. A módszer a meteorológiai adatok mellett hidrológiai alapokon is nyugszik, hiszen a vízjárás és a morfológia is döntő tényező a jéghelyzetek kialakulását illetően. Ezért a módszer egy lefolyás-szimulációs rendszerre támaszkodik, így a jéggel kapcsolatos áttekintés mellett lényeges a numerikus hidrológia alapjainak, alapfeltételeinek, összefüggéseinek, valamint érvényességének áttekintése is.

Kutatásomat az Országos Vízjelző Szolgálat hidrológiai előrejelző rendszerébe ágyazva végeztem, így a szükséges lefolyásszámítást az itt üzemelő operatív lefolyásszimulációs rendszer szolgáltatta.

1.2. Hipotézisek

A dolgozatomban részletezett kutatást az alábbi hipotézisek mentén végeztem:

1. hipotézis: Az energiamérleg becslésén alapuló jégelőrejelzéshez hasonló pontosság érhető el a súlyozott középhőmérsékletek elve alapján, de egyszerűbb algoritmussal és kevesebb szabad paraméterrel, és az észlelt vízhőmérsékletek figyelembe vétele nélkül.

2. hipotézis: A potenciális jégmegjelenés, és a jég hatásának figyelembe vételével előrejelezhető a jég eltűnése is.
3. hipotézis: Egy jégmegjelenéstől kellően távoli vízhőmérséklet tartományban a módszerrel becsülhető a vízhőmérséklet alakulása az észlelt vízhőmérséklet adatok felhasználása nélkül.
4. hipotézis: A folyók vízjárásának és a folyóhálózatnak közvetlen hatása van a jégviszonyokra, ezért nem elegendő a pontszerű szemlélet, hanem a jégszámításokat térben és időben is hidrológiai számításokba kell ágyazni, tehát az algoritmust hidrológiai modellhez kell csatolni.
5. hipotézis: A jégviszonyok alakulását befolyásoló hidrológiai viszonyokon túlmenően, a korábbi hazai kutatásokra építve, a hidrodinamikai környezethez való csatolás is lehetséges és szükséges, amellyel egy komplex, elemei között interaktáló rendszer hozható létre.

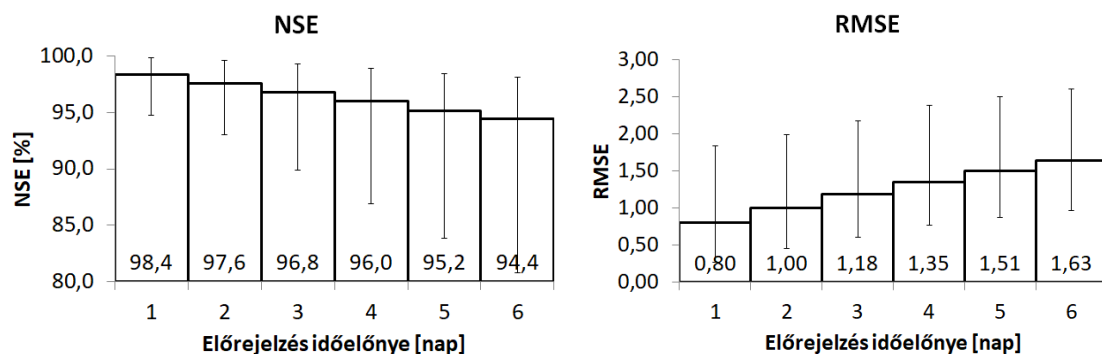
2. KUTATÁSI MÓDSZEREK

Jelen kutatás célja a jégelőrejelzés hidrológiai számításokkal történő támogatása, ezért munkámat a hidrológiai modellezés hazai és külföldi szakirodalmának feltárásával kezdtem (többek között: Nash 1957, Chow 1959, Cunge et al. 1980, V. Nagy 1970, Kozák 1977, Popescu 2014), áttekintettem a modellek csoportjait, a valós folyamatok numerikus leképezésének alap gondolatait, végül a főbb hidrometeorológiai tényezők (csapadék, hőmérséklet, párolgás, lefolyás) észlelési és előrejelzési gyakorlatát hazánkra fókuszálva. A szabadfelszíni nem-permanens hosszirányú vízmozgás leírására alkalmas Saint-Venant egyenletekből kiindulva bemutattam a hidrológiai transzformáció legismertebb módszereit, a kinematikus és a diffúziós megközelítést, valamint a Diszkrét Lineáris Kaszkádmodellt.

Feltártam a folyami jégviszonyok hazai és külföldi szakirodalmát (többek között: Altberg 1936, Ashton 1986, Buffin-Bélanger et al. 2013, Lászlóffy 1934, 1947, 1949, Horváth 1960, Csoma 1968, Starosolszky 1969, 1989, Bogárdi & Kozák 1978), az ismeretek alapján áttekintettem a jégmegjelenéshez szükséges feltételeket és a jégzajlás kialakulásának folyamatát, melyek elengedhetetlenek a jégelőrejelző módszer továbbfejlesztése

szempontjából. Röviden bemutattam a hazánk folyóinak jégviszonyait, ismertettem a 2017. évi jeges események főbb jellemzőit.

A jelenleg üzemelő hazai jégelőrejelző rendszert az Országos Vízeljáró Szolgálat fejleszti és üzemelteti, módszertana az energiamérleg becslésén alapul (Starosolszky 1969). Ennek megismerése, összefüggéseinek áttekintése fontos része a kutatásnak, eredményeinek összegyűjtése és kiértékelése pedig referencia az új módszer fejlesztése során. A 2009-2017 közötti időszak előrejelzett és észlelt (Duna – Paks vízmérce szelvényében) vízhőmérséklet értékei alapján kiszámítottam az RMSE és NSE értékeket, melyeket a 1. ábra szemléltet.



1. ábra: Az OVSZ paksi vízhőmérséklet előrejelzésének átlagos RMSE és NSE értékei a különböző időelőnyök esetén

Mivel az új jégelőrejelző algoritmus az OVSZ lefolyásszimulációs rendszerének részét fogja képezni, így áttekintettem a rendszer főbb elemeit, ismertettem a beépített összefüggéseket, és az adatfolyam főbb állomásait.

Az jégelőrejelzési módszer alapjául a súlyozott középhőmérsékletek elvét választottam (Rodhe 1952). A módszer azt feltételezi, hogy az energiamérleg tagjait hagyományos meteorológiai mérések eredményeiből nem tudjuk egzakt módon meghatározni, így a víz és levegő közötti közvetlen energiaáramon kívül mindent tagot elhanyagolunk. A számítás tehát a hőátadáson alapul, amely a különböző hőmérsékletű víz és levegő határfelületén indukálódik. Ez alapján állítja fel a kapcsolatot a léghőmérséklet és a jég megjelenése között, a léghőmérséklet súlyozásával, hiszen a rövid ideig tartó fagypon alatti hőmérséklet nem elegendő a jég megjelenéséhez. Részletesen bemutattam az alapegyenletek levezetését, a tagok szerepét, valamint a hazai szakirodalomban is kerestem korábbi alkalmazására példát.

A kutatásomhoz szükséges adatokat (jégadatok, vízhőmérséklet, vízállás, léghőmérséklet idősorok, vízrajzi állomások törzsadatai) a vizsgált 10 éves időszakra (2008-2017) az OVSZ adatbázisaiból gyűjtöttem, ahol az elmúlt 10 év jelentett jégállapotait átvizsgálva a kiválasztott vízmércékre, jelentési időszakonként (nov. 15. – márc. 15.) az alábbi, legalább úszó jeges időszakokat találjuk (1. táblázat):

1. táblázat: Jégállapotok a Dunán

Jégjelentési időszak	Jégjelenség		
	Duna		
	Nagybajcs (1801,0 fkm)	Budapest (1646,5 fkm)	Paks (1531,3 fkm)
2008-2009	01.15.-01.16.	01.09.-01.18.	01.06.; 01.10.-01.19.
2009-2010	01.29.-01.30.	01.24.-02.04.	01.27.-02.07.
2010-2011	jégmentes	12.19.-12.21.	12.20.-12.21.
2011-2012	02.05.-02.15.	02.05.-02.16.	02.06.-02.18.
2012-2013	jégmentes	jégmentes	jégmentes
2013-2014	jégmentes	jégmentes	jégmentes
2014-2015	jégmentes	jégmentes	jégmentes
2015-2016	jégmentes	jégmentes	jégmentes
2016-2017	01.08.-01.12.; 01.20.-01.22.	01.07.-01.13.; 01.20.-02.02.	01.07.-02.04.
2017-2018	jelenleg tart, egyelőre jégmentes		

3. EREDMÉNYEK ÖSSZEFOGLALÁSA

3.1. Eredmények az alapösszefüggéssel

A Rodhe (1952) által kidolgozott módszerrel kísérleti számításokat végeztem (Liptay 2018) a Duna hazai szakaszára, a nagybajcsi, budapesti, és paksi vízmérceszelvényekre, melynek eredményei igazolták a módszer korlátozott folyami érvényességét, de elfogadható eredményt adtak ahhoz, hogy a módszer a további kutatás alapja legyen. A 2008-2009 jégmegjelenést a szabad paraméter kalibrációjához felhasználva a számítási eredményeket a 2. táblázat tartalmazza:

2. táblázat: A jégmegjelenés napjának számítási pontossága

Jégjelentési időszak	Jégjelenség		
	Duna		
	Nagybajcs (1801,0 fkm)	Budapest (1646,5 fkm)	Paks (1531,3 fkm)

2008-2009		<i>kalibráció</i>	
2009-2010	-2	0	-1
2010-2011	<i>jégmentes</i>	+10	+16
2011-2012	+1	-2	-2
2016-2017	+2	-1	0

3.2. A fagy pont alatti tartomány

A folyóvizeken kialakuló jégjelenségek fizikájából tudjuk, hogy a kristályosodási hő kismértékű melegítő hatást gyakorol a túlhűtött víztestre, valamint a felszínen úszó jégformák bizonyos mértékig szigetelik a vízfelszínt a további légköri irányú energiaátadással szemben. Továbbá a víz fajlagos hőkapacitásának (4,1813 KJ/kgK) és fagyáshőjének (333,7 KJ/kgK) nagyságrendekkel való különbözőségéből adódóan tudjuk, hogy a fagy pontot elérve a további energia elvétel nem a folyadék további hűlését okozza, hanem a halmazállapot változásra fordítódik. A jég megjelenését követően egészen a teljes vízfelszínt borító jégig az úszó jégformák közötti szabad vízfelszín továbbra is érintkezik a levegővel, így a határfelületen az energiaátadás továbbra is végbemegy, de melegítés hatására csökken a víztest jégkristály képző potenciálja, a már keletkezett jég pedig az áramlással távozik. A súlyozott középhőmérsékletek elve a víz-levegő határfelületen történő energiaátadást egy komplex, időinverz hőátadási tényezővel jellemzi, ezt az értéket a jég megjelenésekor szétbontjuk több értékre, arra a feltételezésre alapozva, hogy a τ függvény értéke a 0°C alatti tartományban a fenti hatások miatt nem a 0°C feletti késleltetés függvénye.

Az alapegyenlet módosítása után a jégeltűnés napjára kapott új eredményeket a 3. táblázat szemlélteti:

3. táblázat: A jégeltűnés napjának számítási pontossága Nagybajcs és Paks állomásoknál (zárójelben az eredeti módszerrel kapott eredmények)

Jégjelentési időszak	Jégjelenség		
	Duna		
	Nagybajcs (1801,0 fkm)	Budapest (1646,5 fkm)	Paks (1531,3 fkm)
2008-2009		<i>kalibráció</i>	<i>kalibráció</i>
2009-2010	-	+8 (+15)	+10 (+15)
2010-2011	-	-	-
2011-2012	<i>kalibráció</i>	+2 (+11)	+6 (+12)

2016-2017	0	0 (+19)	-1 (+18)
-----------	---	---------	----------

A vizsgálattal beigazolódott az a **hipotézis** (2.), hogy a jégmegjelenés, és a jég hatásának figyelembe vételével a súlyozott középhőmérsékletek elve alapján előrejelezhető a jég eltűnése is.

3.3. A vízhőmérsékletek alakulása

A módszer a vízfelszín hőmérsékletére írja fel az egyszerűsített energiamérleget, majd a számítás során a τ függvényre, illetve sorokra hivatkozik, hiszen nem a vízfelszín hőmérsékletét, hanem a jég megjelenésének időpontját számítjuk. Ha mégis visszatérünk az alapfeltételhez, miszerint az egyszerűsített hőátadási egyenlettel a vízfelszínnek egy közelítő hőmérsékletét számítjuk, és a késleltetést nem a jég megjelenésére optimalizáljuk, hanem a mért és számított vízhőmérsékletek minél jobb illeszkedésére, akkor az észlelések és a számítás között szoros egyezést kapunk. A számszerű adatok (10 éves idősor, 3349 adatpár) 4. táblázatban láthatók:

4. táblázat: Az észlelt és számított vízhőmérsékletek kapcsolata

késleltetés	r^2	RMSE
17,4 nap	93,47	1,58
10 nap	95,65	1,33

A vizsgálatot a teljes 10 éves idősorra elvégeztem, de mivel jég idején és annak közvetlen környezetében az észlelt vízhőmérséklet adatok jelentősen eltérnek a súlyozott középhőmérsékletek alapján számoltaktól, ezeket a napokat nem vettem figyelembe. Az eltérés a 4°C-os vízhőmérséklet közelében jelentkezik, és attól lefelé növekvő mértékű. Az illeszkedés szorosságának vizsgálatához a determinációs együtthatót (r^2) és a négyzetes eltérések átlagának gyökét (*RMSE*) vettem alapul.

A módszer újabb kibővítése után elvégzett számítások eredményeit az 5. táblázat tartalmazza:

5. táblázat: A validáció eredményei a jég megjelenésének és eltűnésének napjaira, valamint az észlelt és számított vízhőmérséklet idősorok illeszkedésének szorossága a 4°C feletti tartományban

Jégjelentési időszak	Jégjelenség		
	Duna		
	Nagybajcs	Budapest	Paks

	(1801,0 fkm)	(1646,5 fkm)	(1531,3 fkm)
2008-2009	-	<i>kalibráció</i>	<i>kalibráció</i>
2009-2010	-	-3; 5	-1; 10
2011-2012	<i>kalibráció</i>	-1; 1	-1; 5
2016-2017	-1; 0	-1; 0	0; -1
RMSE	1,47	1,38	1,37
r²	93,3%	95,4%	95,1%

Fontos megjegyezni, hogy Nagybajcsra a 2008-2009, 2009-2010 jeges időszakokban a 2 napig tartó jégjelenséget a modell nem tudta követni, és a 2010-2011 jégmentes időszakban is ad jeget. Ugyanígy Budapest és Paks állomásra a 2010. decemberi 2 napos jégmegjelenést a számítás nem adja, de ebben a szezonban még kétszer hibásan számol jeget.

A vizsgálattal beigazolódott az a **hipotézis** (3.), mely szerint egy jégmegjelenéstől kellően távoli vízhőmérséklet tartományban a módszerrel becsülhető a vízhőmérséklet alakulása az észlelt vízhőmérséklet adatok felhasználása nélkül.

3.4. A vízjárás hatása

Rodhe (1952) az általa kidolgozott módszert nem folyóvizekre szánta, így az alapegyenletek esetünkben nem veszik figyelembe azt, hogy a középhőmérsékletekkel átadott információ nem csak az időben terjed, hanem folyásirányban, a térben is. A folyami jégviszonyok fizikájából tudjuk, hogy a hőmérsékletváltozással szembeni puffer kapacitás függ a vízfolyás méretétől, vagy egy adott vízfolyás esetén függ a szállított víz mennyiségétől, azaz a meder teltségétől. A mederben lévő víz a számításaink alapegységének választott Δt időlépés alatt nem az adott középhőmérséklettel jellemzett állomás környezetében áll, hanem a vízsebesség függvényében utazik.

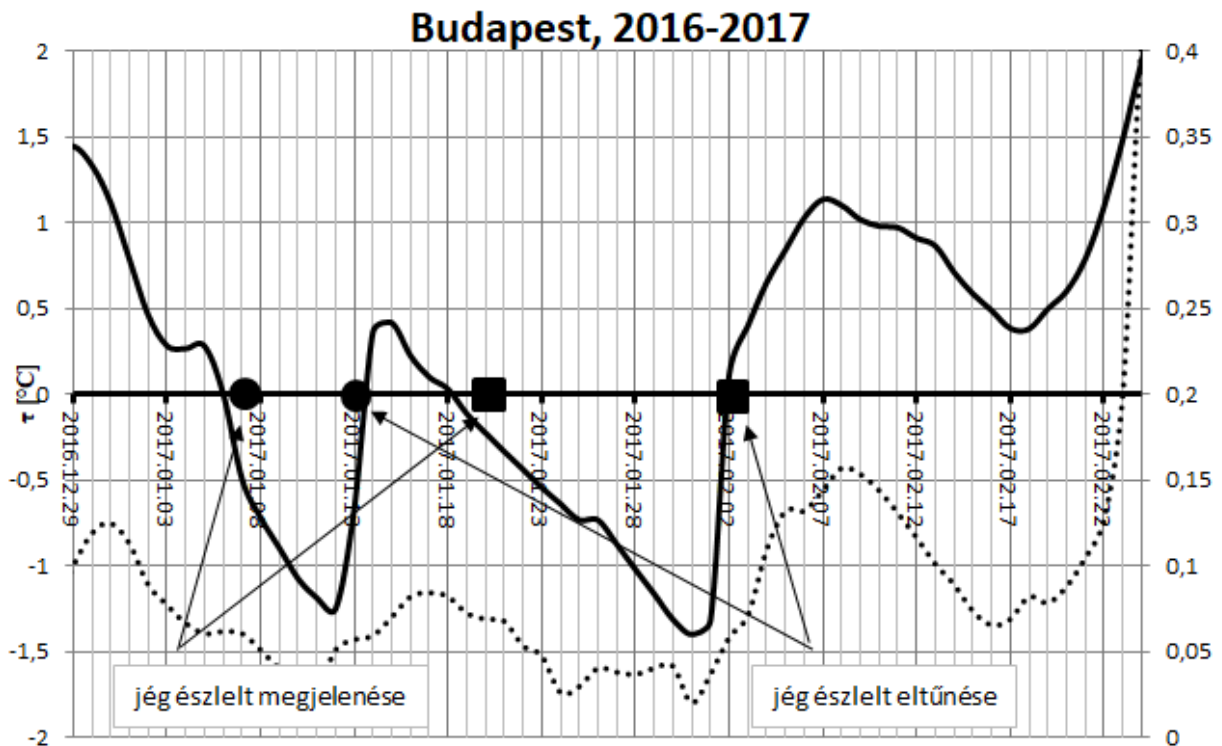
Ezek alapján feltételeztem, hogy a számításunkba t_n időpontban meghatározott vízhőmérséklet nem csak t_{n-1} időpontban számolt vízhőmérséklet és az adott állomás középhőmérsékletének függvénye, hanem fentebbi állomás a t_{n-m} időpontban észlelt középhőmérsékletének is függvénye, ahol m a két állomás közötti időkülönbség. Így Budapestre ez a 2 nappal korábbi nagybajcsi középhőmérsékletet jelenti, Paksra pedig az előző napi budapesti középhőmérsékletet.

Az így bevezetett új szabad paraméterek értékeinek megválasztásához az RMSE minimalizálását tűztem ki célfüggvénynek. A számítás elvégzése után az alábbi (6. táblázat) eredményekre jutottam:

6. táblázat: A számítás eredményei a jég megjelenésének és eltűnésének napjaira, valamint az észlelt és számított vízhőmérséklet idősorok illeszkedésének szorossága a 4°C feletti tartományban

Jégjelentési időszak	Jégjelenség	
	Duna	
	Budapest (1646,5 fkm)	Paks (1531,3 fkm)
2008-2009	<i>kalibráció</i>	<i>kalibráció</i>
2009-2010	0; 7	-1; 9
2011-2012	1; 1	-1; 1
2016-2017	0; 0	0; -1
RMSE	1,18	1,32
r²	96,3%	95,7%

Az így kapott eredményeken továbbra is megfigyelhető, hogy a módszer a tisztán középhőmérsékleteken alapuló számítás miatt olykor jégmentes időszakban is számol jeget. A mederteltség figyelembevételével azonban a jég megjelenés számítása a -1 nap és +1 nap közötti tartományba került, ami minden eddigi eredménynél jobb. Ezzel egyidejűleg olyan dinamika jelent meg a számolt jégjelenségekben, amit eddig szintén nem sikerült kimutatni (2. ábra).



2. ábra: A 2017. januári jeges időszak számítása a Dunán Budapestnél

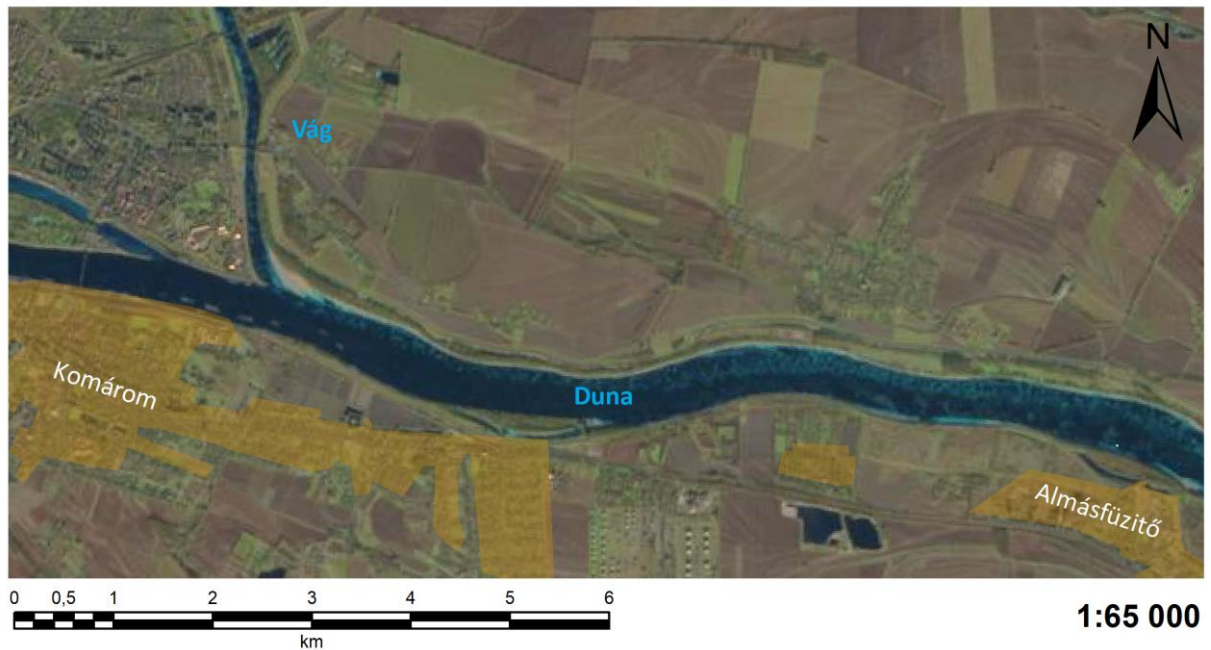
A vizsgálattal beigazolódott az a **hipotézis** (4.), mely szerint a folyók vízjárásának és a folyóhálózatnak közvetlen hatása van a jégviszonyokra, ezért nem elegendő a pontszerű szemlélet, hanem a jégszámításokat térben és időben is hidrológiai számításokba kell ágyazni, tehát az algoritmust hidrológiai modellhez kell csatolni.

3.5. Mellékvízfolyások hatása

A Duna Nagybajcs és Budapest közötti szakaszán első mellékvízfolyása a jobboldali Mosoni-Duna, amely a Lajta, a Rába és a Marcal vizét hozza magával. Vének és Gönyű térségében torkollik a főfolyóba. Komáromnál érkeznek be az első baloldali mellékvízfolyás, a Vág, majd kevéssel Esztergom alatt a Garam, és Szob térségében az Ipoly. Vízhozamuk töredéke a Duna vízhozamának, hármuk közül kiemelkedő a Vág, torkolati középvízhozama $128 \text{ m}^3/\text{s}$, de árvíz esetén $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ körüli vízhozam is előfordulhat, ami a Dunához viszonyítva is számottevő mennyiség. Részletesen megvizsgálva a 2017. januári jégviszonyokat, egyértelműen látszik a Vág hatása a jégzajlás kialakulásának kezdeti szakaszában.

A Jégjelentő Szolgálat pontszerű észlelései mellett rendkívül részletes információ nyerhető műholdképekből. A Sentinel-2A műhold az Európai Űrügynökség és az Európai Unió közös földmegfigyelési programjának keretében került felbocsátásra 2015 júniusában. Képeit 10×10 méteres maximális térbeli felbontással készíti, a látható és infravörös tartományban, 13 különböző hullámhosszon. A műhold maximális visszatérési ideje 10 nap, de 2017 januárjában a Duna e szakaszát érintve 1, 5, 8, 11, 15, 18, 25 és 31-én is készült felvételezés. Sajnos ezek közül több kép felhőborítottsága 100%-os vagy ahhoz közeli. A január 8-án készült műholdkép sorozat azonban nagyon jó áttekintést ad a hazai Duna szakasz jég helyzetéről. A 3. ábra mutatja a Vág torkolat környéki szakaszt.

Bármilyen képfeldolgozás nélkül is jól körvonalazhatóak a parti jég és az úszó jégtáblák világosabb képpontjai. A műholdképen jól látszik, hogy a torkolat feletti Duna szakaszon kevés parti jégen kívül nincs kimutatható jégjelenség. A Vágon jégzajlás látható, aminek hatására a Dunára érkeznek a Vág jégtáblái. Kezdetben a meder bal oldalán úsznak tovább, majd feltehetően a Duna jégképző potenciálját kihasználva szekunder kristályképződést indukálnak, aminek hatására a zajlás csóvaszerűen kiszélesedik, és Almásfüzitő alatt (a kép jobb oldalán) már a teljes vízfelszín érinti.



3. ábra: Sentinel-2A műholdkép 2017. január 8-án a Vág torkolatáról

Január 8-án Komáromban csupán parti jeget jelentettek, míg a nagyjából 50 fkm-re lévő esztergomi állomásnál már 50%-os jégzajlást. Ezt a Vág önmagában nem képes előidézni, ha a teljes vízfelszín borító 100%-os vági jégzajlást és közel azonos Duna-Vág vízsebességet feltételezünk, akkor a Vágról érkező jéghezam a Dunában a két folyó vízfelszínének arányával lenne egyenlő, ami ebben az esetben 10-15% körüli jégzajlást jelentene.

A Garam és az Ipoly torkolat környékének jégviszonyai ugyanezen a napon teljesen eltérőek a Vágtól. A két vízfolyás nem járul hozzá számottevő mértékben a már kialakult jégzajláshoz. Ezt a jelenséget a súlyozott középhőmérsékletek módszerével nem tudjuk figyelembe venni, csak azzal a feltételezéssel élünk, hogy a számításhoz felhasznált paraméterkészlet az esetek többségében jól leírja az adott szelvény jégviszonyait. Mégis tanulságos abból a szempontból, hogy bár Komáromnál a Duna vízének potenciálja rendelkezésre állt a jég képződéséhez, ám úszó jégformák mégsem jelentek meg. Rodhe módszerének paraméterezéséhez a késleltetést használtam, úgy, hogy ha a kalibrált τ sor metszi a 0°C -os vízszintes tengelyt, akkor jégmegjelenésre számítunk. A valóságban, ahogy a számítási eredmények validációja is mutatja, és ahogy az energiamérleg tagjai is szimbolizálják, a jég megjelenése nem csupán a 0°C -os vízhőmérséklet eléréséhez kötődik. Így helyesebb ezt az időpontot a potenciális jégmegjelenés időpontjának nevezni, a τ sor teljes 0°C alatti szakaszát pedig potenciális jégmegjelenési időszaknak, ahol a számított τ értékkel egyenesen arányos a folyó jégképző potenciálja, és bármilyen külső hatásra megindulhat a jégképződés.

A vizsgálat rámutatott, hogy 4. **hipotézis** állításai továbbra is helytállóak, de a jégviszonyok és a vízfolyáshálózat hidrometeorológiai helyzetének összefüggései további vizsgálatokat igényelnek.

4. KONKLÚZIÓ

A kutatás során elért eredmények alapján kijelenthető, hogy a súlyozott középhőmérsékletek elve a Rodhe (1952) által kidolgozott formájában korlátozott érvényességű a Duna hazai szakaszán kiválasztott három szelvényre. Az alapösszefüggésekkel végzett számítások a jégmentes időszakokban is adtak jeget, de a jég észlelt megjelenését a kalibrált sorozatok, a 2010. decemberi súlyos hibákat kivéve, -2 és +2 napos pontossággal eltalálják.

Az eredeti módszer kidolgozása a tengeri viszonyokon alapszik, amiből a számítások elvégzése nélkül is könnyű arra következtetni, hogy folyóink vízhőmérsékletének alakulását, és jégviszonyait nem tudja kellő pontossággal leírni. Az alapegyenletből hiányoznak olyan jelentős súlyú tagok, melyek kifejezik a folyó pillanatnyi hidrológiai és hidraulikai viszonyait, és amelyek számottevő mértékben alakíthatják a jég megjelenéséhez szükség feltételek előállítását.

A kutatásom során végzett módosítások, mint az észlelt vízhőmérsékletekre történő illesztés, a jégzajlás megindulását követő viszonyok, és a vízjárás hatásának figyelembe vétele mind pozitív irányba változtatták a módszer jóságát, és erősítették érvényességét a kiválasztott szelvényekre, ezért egyértelmű célként fogalmazódik meg a hidrológiai modellezésbe mind mélyebben történő beágyazás. A kapott eredmények és a becsült energiamérleg módszerrel számítottak összevetése lényeges ahhoz, hogy a pontosság képzeletbeli tengelyén elhelyezhessük az alternatív módszert a jelenleg operatív alkalmazott módszer pontosságához viszonyítva. Ezt a vízhőmérséklet számítása során kapott statisztikai adatok összevetésével végezzük (7. táblázat). Megjegyzendő, hogy az összehasonlítás csak tájékoztató jellegű, mert míg az energiamérleg adatai az operatív használatból erednek, vízhőmérsékleti tényadaton, de csak meteorológiai előrejelzéseken alapulnak, addig a súlyozott középhőmérsékletek elvével végzett számítások meteorológiai tényadaton alapulnak, és vízhőmérsékletet semmilyen formában nem tartalmaznak.

A két számítás összetettsége nagyságrendekkel eltér egymástól. Az energiamérleg minden egyes tagjára tapasztalati összefüggések csoportja használandó, ezzel szemben a súlyozott középhőmérsékletek elve egy kompakt összefüggésen alapul. A számítógépes algoritmizálás

során ez a különbség gyakorlatilag megszűnik, mivel egyik esetben sincs olyan mennyiségű számításról szó, ami egy korszerű, de általános számítási kapacitású számítógép erőforrásait jelentősen igénybe venné. Fontos különbség azonban a módszerek rugalmassága, a paraméterek száma és hatásuk követhetősége a rendszer működésének egészére.

Mindezen megállapításokat összegezve és a két módszer alapelveinek, valamint összefüggéseinek ismeretében pontosabb eredményt várunk az energiamérleg számításától, de a nagyfokú rugalmasság és az egyszerű paraméterkészlet jelentős gyakorlati hasznot ad a súlyozott középhőmérsékletek elvének. Az adatokból látható, hogy a súlyozott középhőmérsékletek elvének vízhőmérséklet előrejelzési pontossága az energiamérleg 3 és 4 napos időelőnyű pontossága környékén van. Az energiamérleg 0. napi értéke az észlelt vízhőmérséklet, és átlagos hibája a 6. napig monoton nő. A másik módszer 0. napi értéke ezzel szemben egy számított érték, és az átlagos hibája a teljes időszakon állandónak tekinthető. Jelenleg nem állnak rendelkezésre operatív használatból származó tapasztalatok a súlyozott középhőmérsékletek elvét illetően, de feltételezhető, hogy a korábban taglalt autokorreláltság okán a 0. napi vízhőmérsékleti tényadatok jelentős mértékben javítják a számítás pontosságát.

7. táblázat: Az energiamérleg és a súlyozott középhőmérsékletek elvének összehasonlítása (RMSE és r^2)

	1	2	3	4	5	6
módszer	napra	napra	napra	napra	napra	napra
Energiamérleg	0,80	1,00	1,18	1,35	1,51	1,63
	98,36	97,59	96,81	95,97	95,16	94,41
Súlyozott középhőmérsékletek elve	<i>Budapest</i>				<i>Paks</i>	
		1,18			1,32	
		96,3			95,7	

A kutatás összességében alátámasztotta azt a **hipotézist** (1.), mely szerint az energiamérleg becslésén alapuló jégelőrejelzéshez hasonló pontosság érhető el a súlyozott középhőmérsékletek elve alapján, de egyszerűbb algoritmussal és kevesebb szabad paraméterrel, és az észlelt vízhőmérsékletek figyelembe vétele nélkül. Ezen utolsó feltétel oka a jelenlegi operatív vízhőmérséklet mérési gyakorlat és a jégmegjelenés előrejelzéséhez szükséges információk körének ellentmondása (Keve 2012).

Jövőbeli kutatási célkitűzés a jégelőrejelző módszert alátámasztó hidrológiai rendszer fejlesztése. A jelenleg használt DLCM medetrenszformáció a helyi viszonyok figyelembe

vétele nélkül transzformálja az árhullámot két szelvény között, és térben részletesebb eredmények előállítására sem alkalmas, továbbá olyan hidraulikai jellemzők sem ismerhetők meg általa, amelyek a jégjelenségek pontosabb modellezéséhez elengedhetetlenek. Ha a Saint-Venant egyenletrendszer dinamikai egyenletét teljes alakjában megoldó medertranszformációs számítás történne, akkor erre alapozva új távlatok nyílnának a jégelőrejelzés terén is. A szabadfelszínű nempermanens vízmozgások számítása alaposan körüljárt téma (Chow 1959, Kozák 1977, Cunge et al. 1980, Popescu 2014), így ennek gyakorlati megvalósítása az operatív üzemeléssel szemben támasztott követelmények mellett is lehetséges. A jégmozgás hidraulikája korábban hazánkban is kutatott téma volt (Zsilák 1974, Bogárdi & Kozák 1978, Bakonyi 1987), és jelenleg is folynak kutatások ezen a területen, de a jégelőrejelzéssel való összekapcsolására nincs példa. A nemzetközi szakirodalomban a jégelőrejelzés neurális háló alapú megközelítésére találunk példákat, de ez szintén nem épít a hidrodinamikai viszonyokra. A fentieket összegezve előrevetíthető egy számítógépes rendszer, melynek olyan építőelemei, mint a hidrológiai és hidrodinamikai modellek, valamint a jégmozgás hidraulikáját leképező modellek mind ismert alapokon nyugszanak, és a köztük lévő kapcsolatot, azaz a jégmegjelenés számítását egy ezekbe beágyazott alrendszer végzi. Az Országos Vízügyi Szolgálatnál operatíván működő, becsült energiamérleg alapú módszer esetén ezen elemek hiányoznak, a jégelőrejelzést a víz hőmérséklet észleléséből kiindulva közvetlenül a meteorológiából származtatjuk, majd a jég megjelenését követően statisztikai alapokra helyezzük. Jelen kutatás eredményei alapján azonban elvégezhető a hidrológiai modellezésbe történő ágyazás, de a hidraulikai számítások felé való továbblépéshez először a megalapozó fejlesztések elvégzése szükséges. Így megalapozottnak tekintem az 5. **hipotézis** kijelentését, mely szerint a jégviszonyok alakulását befolyásoló hidrológiai viszonyokon túlmenően, a korábbi hazai kutatásokra építve, a hidrodinamikai környezethez való csatolás is lehetséges és szükséges, amellyel egy komplex, elemei között interaktáló rendszer hozható létre.

5. IRODALOMJEGYZÉK

- Altberg, W., J.** (1936): *Twenty years of work in the domain of underwater ice formation (1915 - 1935)*. International Association of Scientific Hydrology. 6. 373-407.
- Ashton, G., D.** (1986): *River and Lake Ice Engineering*. Water Resources Publications.
- Bakonyi, P.** (1987): *A jégtorlaszképződés numerikus modellezése*. Vízügyi Közlemények. 69/4, 548-556.

- Bogárdi, J., Kozák, M.** (1978): *Hidraulika II.* Budapesti Műszaki Egyetem, Tankönyvkiadó Vállalat
- Buffin-Bélanger, T., Normand E., Bergeron, N., E., Dubé, J.** (2013): *Ice formation in small rivers.* Committee on River Ice Processes and the Environment and Hydrology Section of the Canadian Geophysical Union, szerk.: Beltaos, S., pp.385-409
- Chow., V., T.** (1959): *Open-channel hydraulics.* New York, McGraw-Hill Inc.
- Cunge, J., A., Holly, F., M., Verwey, A.** (1980): *Practical Aspects of Computational River Hydraulics.* London: Pitman
- Csoma, J.** (1968): *A Tisza jégjelenségeinek előrejelzése.* Vízügyi Közlemények. 50/3, 326-365.
- Horváth, S.** (1960): *A folyócsatornázás hatása a Közép-Duna jégjárására.* Vízügyi Közlemények. 42/4, 537-570.
- Keve, G.** (2012): *2012. évi dunai jégészlelés tapasztalatai.* ADU-NEKI beszámoló jelentés a 2012. évi dunai jégészlelésről. Baja.
- Kozák, M.** (1977): *A szabadfelszínű nempermanens vízmozgások számítása.* Akadémiai Kiadó, Budapest
- Lászlóffy, W.** (1934): *Folyóink jégviszonyai különös tekintettel a magyar Dunára.* Vízügyi Közlemények. 16/3, 369-435.
- Lászlóffy, W.** (1947): *A jeges árvizekről.* Hidrológiai Közlöny, Budapest, 27/1-4, 9-16.
- Lászlóffy, W.** (1949): *A folyók jégviszonyai.* Magyar Technika, 2-15.
- Liptay, Z., Á.** (2018): *Jégmegjelenés előrejelzése a súlyozott középhőmérsékletek elve alapján a Duna hazai szakaszára.* Hidrológiai Közlöny 98, 1, 25-32
- Moriassi, D., N., Arnold, J., G., Van Liew, M., W., Bingner, R., L., Harmel, R., D., Veith, T., L.** (2007): *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.* American Society of Agricultural and Biological Engineers 50/3, 885-900
- Nash, J., E.** (1957): *The form of insantaneous unit hydrograph.* International Association of Hydrological Sciences General Assembly, Toronto. 45(3), 114-121.
- Nash, J., E., Sutcliffe, I., V.** (1970): *River flow forecasting through conceptual models, Part I,* Journal of Hydrology 10, 282-290
- Popescu, I.** (2014): *Computational Hydraulics.* IWA Publishing.
- Rodhe, B.** (1952): *On the relation between air temperautre and ice formation in the Baltic.* Geografiska Annaler. 34, 175-202, Stockholm
- Starosolszky, Ö.** (1969): *A jég a vízepítésben.* Vízgazdálkodási Tudományos Kutató Intézet. Budapest.
- Starosolszky, Ö.** (1989): *A vízlépcsők hatása a jégjárásra.* Vízügyi Közlemények. 71/3, 374-386.
- V. Nagy, I.** (1970): *Hidrológia II.* Budapesti Műszaki Egyetem, Tankönyvkiadó Vállalat
- Zsilák, E.** (1974): *A nagyfedettségű, telített jégmozgás néhány elméleti kérdése.* Vízügyi Közlemények. 55/1, 105-113

6. PUBLIKÁCIÓK JEGYZÉKE

6.1. A disszertáció alapjául szolgáló publikációk

1. **Liptay, Z., Á.** (2018): *Jégmegjelenés előrejelzése a súlyozott középhőmérsékletek elve alapján a Duna hazai szakaszára.* **Hidrológiai Közlöny** 98, 1, 25-32
2. **Liptay, Z., Á.,** Czigány, Sz., Pirkhoffer, E., Klug, H. (2018): *Hydrological modelling of small Alpine watersheds with the Nam model.* **Carpathian Journal Of Earth And Environmental Sciences** 13, 1, pp. 235-248.
3. Csík, A., Gauzer, B., Gnant, B., **Liptay Z., Á.,** Molnár K. (2017): *Extending the OLSEr forecasting system for small catchments in Hungary.* In: Plamen Ninov, Elena Bojilova (szerk.) Electronic book with full papers from XXVII Conference of the Danubian Countries on Hydrological Forecasting and Hydrological Bases of Water Management, 291-294, ISBN:978-954-90537-2-2
4. **Liptay, Z., Á.,** Czigány, Sz. (2014): *Kis és közepes vízgyűjtők hidrológiai modellezése a MIKE 11 NAM moduljával a Mondsee vízgyűjtőjének példáján.* Magyar Hidrológiai Társaság XXXII. ORSZÁGOS VÁNDORGYŰLÉS, ISBN 978-963-8172-32-7., 16
5. **Liptay, Z., Á.** (2013): *A számítógépes modellek alkalmazásának jövője.* Magyar Hidrológiai Társaság XXXI. Országos Vándorgyűlés, ISBN:987-963-8172-31-0., 10/7.
6. **Liptay, Z., Á.,** Veverka, M. (2012): *Online árvíz-előrejelzés és adatigénye.* Magyar Hidrológiai Társaság XXX. Országos Vándorgyűlés, ISBN:978-963-8172-29-7., 67-78.
7. **Liptay, Z., Á.** (2010): *Szoftver fejlesztése vízszint-szabályzó műtárgyak tervezéséhez.* **Hidrológiai Közlöny** 90, 3, 32-36

6.2. Egyéb publikációk

1. Engloner, A., Barreto, S., Bártfai, B., **Liptay, Z., Á.,** Vargha, M., Baranya, S., Felföldi, T., Honti, M., Kardos, L., Kása, I., Lakatos, M., Madarász, T., Somogyi, B., Szilágyi, J., E., Ungvári, G. (2018): *A nemzeti víztudományi kutatási program kihívásai és feladatai.* Magyar Tudományos Akadémia
2. Barreto, S., Bártfai, B., Engloner, A., **Liptay, Z., Á.,** Madarász, T., Vargha, M. (2017): *Water in Hungary.* Magyar Tudományos Akadémia
3. Van Leeuwen, B., Právetz, T., **Liptay, Z., Á.,** Tobak, Z. (2016): *Physically based hydrological modelling of inland excess water.* **Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences** 11, 2, pp 497-510.

4. **Liptay, Z., Á.**, Právetz, T., Van Leeuwen, B. (2014): *Belvízi elöntések fizikai alapú numerikus modellezése*. Magyar Hidrológiai Társaság XXXII. Országos Vándorgyűlés, ISBN 978-963-8172-32-7., 11/11.
5. **Liptay, Z., Á.** (2013): *Elöntési térképezés 1D és összekapcsolt 1D-2D modellekkel*. Magyar Hidrológiai Társaság XXXI. Országos Vándorgyűlés, ISBN:987-963-8172-31-0., 10/6.
6. Somogyi, P., **Liptay, Z., Á.**, Nagy, Zs., Veverka, M. (2011): *A Mura árvíz előrejelző modell kiterjesztése a magyarországi vízgyűjtőre*. Magyar Hidrológiai Társaság XXIX. Országos Vándorgyűlés, ISBN:978-963-8172-28-0., 406-414.