

Jégfedettség meghatározása webkamerák segítségével

Keve Gábor

Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Víz tudományi Kar (keve.gabor@uni-nke.hu)

Kivonat

A hazai folyók – különösen a Duna – esetében a jég okozta árvizek illetve egyéb károkozások jelentős gondokat okoztak és okoznak még ma is. Ezzel együtt, a jég elleni védekezés hatékonyságát javító, jégjelenségekkel foglalkozó hazai kutatások száma alacsony és az ez irányú szakmai fejlesztések jelenleg sem számottevőek.

2002-ben a 70-es évek hagyományos jégfotózási tapasztalataira alapozva webkamerát helyeztem el egy, a bajai Duna-parton álló magas építmény tetejére. Kezdeti jégmegfigyelési sikereim 2008-ban további 5 kamera kiépítésére sarkalltak. A kamerák elmentett képei így az ADUVIZIG (Alsó-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság) kezelésében álló Duna szakasz (130 km) 30-40 km-es részeinek egy-egy kiemelt szelvényében zajló eseményeket örökítették meg. 2009-ben, 2010-ben és később 2012 télen is sikerült jégzajlási felvételeket készíteni a vizsgált szelvényekben. A felvételekből nyert tapasztalatok segítettek a jégelőrejelzés tökéletesítését, csökkentették a jégészlelő járőrszolgálat terhelését és egyben a további kutatómunkát is megalapozták. Sajnos a kamera-rendszer karbantartásának elmaradása a 2017. januári zajlás részleges felvételezését tette csupán lehetővé.

A kamerák által készített képek elég hosszú ideig feldolgozatlanok maradtak, mert az ahhoz szükséges gyors, automatizált, költségkímélő és folyamatos jégfedettség-értékelő megoldás kifejlesztése váratott magára. Doktori értekezésemben ezen a hiány pótlásával foglalkoztam, melyből jelen cikk egy rövid kivonatot képez. Eredményeim pontossága jelentősen meghaladta a manuális vagy becslési eljárásokat, a kifejlesztett megoldás igazolása hibaelemzés útján történt. A bemutatott nagyfrekvenciájú mérési eljárással immár objektíven elemezhetővé vált a Dunán zajló jégfedettségi arány időbeli pulzálása és annak napi menetgörbéje is.

Kulcsszavak

folyami jég, jégészlelés, jégfedettség, webkamera

BEVEZETÉS

A globális felmelegedés folyamatai ellenére, ami az elmúlt évtizedek hidrológiai adataiból is kirajzolódni látszik, a hidrometeorológiai tényezők kedvezőtlen összjátéka bármely télen okozhat komoly jegesedést a Dunán, következőképp jeges árvizet is. 2002-ben a 70-es évek hagyományos jégfotózási tapasztalataira alapozva webkamerát helyeztem el egy, a bajai Duna-parton álló magas építmény tetejére. Kezdeti jégmegfigyelési sikereim 2008-ban további 5 kamera kiépítésére sarkalltak. A kamerák elmentett képei így az ADUVIZIG (Alsó-Duna-völgyi Vízügyi Igazgatóság) kezelésében álló Duna szakasz (130 km) 30-40 km-es részeinek egy-egy kiemelt szelvényében zajló eseményeket örökítették meg. 2009-ben, 2010-ben és később 2012 télen is sikerült jégzajlási felvételeket készíteni a vizsgált szelvényekben. A felvételekből nyert tapasztalatok segítettek a jégelőrejelzés tökéletesítését, csökkentették a jégészlelő járőrszolgálat terhelését és egyben a további kutatómunkát is megalapozták. Sajnos a kamera-rendszer karbantartásának elmaradása a 2017. januári zajlás részleges felvételezését tette csupán lehetővé.

A vízügyi szolgálat számára korábban készült Műszaki Irányelvek és Vízügyi Műszaki Segédletek - melyek a jégészlelés témakörét ölelik fel - felülvizsgálata és esetleges újragondolása feltétlenül időszzerű kérdés. A megújítás időszzerűségét nem elsősorban a dokumentumok elavultsága indokolja, sokkal inkább az, hogy a vízügyi szolgálat erősen átstrukturálódott. A vízzel foglalkozó ágazat létszámában, képzettségében, eszközrendszerében és anyagi háttérében egyaránt rengeteg változás történt, ami feltétlenül maga után vonja fenti szabályozások ismételt vizsgálatát, napirendre tűzését.

A folyami jéggel való foglalkozás eddigieknél is fontosabb, de elég nyilvánvaló oka az, hogy a legpusztítóbb árvizeket a Duna magyarországi alsó szakaszán szinte kivétel nélkül jégtorlaszok okozták (Lászlóffy, 1934). Az elmúlt csaknem 180 évben rendkívüli jeges árvizek a Dunán a következő alkalmakkor fordultak elő: 1838., 1839., 1850., 1876., 1878., 1883., 1891., 1920., 1923., 1926., 1929., 1940., 1941. és végül, de nem utolsó sorban mindmáig a legmagasabb szinttel tetőző 1956-ban (Horváth, 1979). Ha nem is megyünk túl messzire a múlt eseményeit kutatva elegendő a 2017. évi (legutóbbi) hazai folyami jégjelenségekből adódó károkat áttekintnünk. A Dunán 2017. január 7-én megindult (előre nem jelzett) zajlás szinte a teljes hazai szakaszon megrongálta a folyami hajóútleleteket és súlyos károkat okozott. Február közepén a Tiszán végig vonuló jégömeg gyakorlatilag minden folyóparti település vízeszköz készletében komoly károkat okozott. A média által talán legfelkapottabb esemény a tiszacsegei komp esete volt, ahol kicsi szerencsén múltott csak a halálos baleset elkerülése.

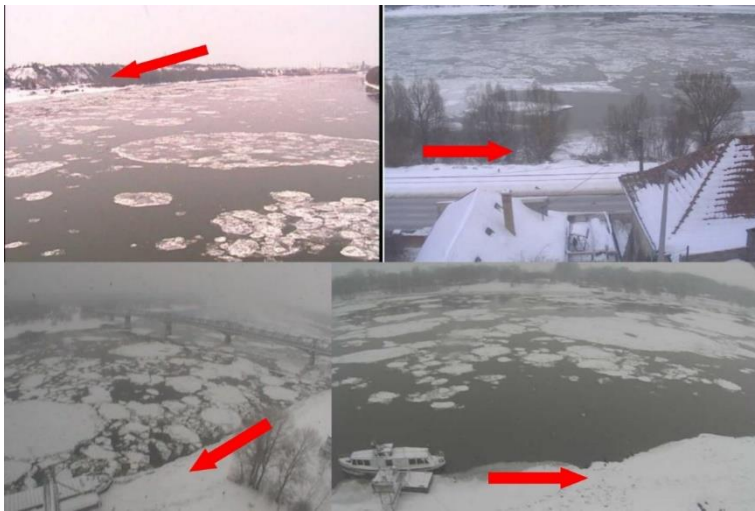
A ritkábban előforduló természeti katasztrófák elleni védekezés, még ha azok súlyos károkat okoznak is csak rövid ideig kapnak kellő figyelmet. Ezért a valódi ok-okozati összefüggések feltárására sem fordul elég érdeklődés. Ezekben az esetekben jellemzően az esemény-követő beavatkozások dominálnak, ami sokszor nélkülözni kénytelen a döntések alapos és kellő körülményekkel való meghozatalát. Dolgozatomban minden folyami jéggel kapcsolatos problémára nem adhat megoldást, de igyekszik annak minél több aspektusát bemutatni. Legjobb

célkitűzése a munkának a jégmegfigyelés korszerűsítése, mely megfelelő alapot teremthet a jelenség alaposabb megismerésére és így a tudomány általi elemzésére.

JÉGÉSZLELŐ WEBKAMERÁK KÉPEINEK FELHASZNÁLHATÓSÁGA

Önmagában a telepített jégészlelő webkamerák képeinek nézegetése is segítséget ad a folyamatosan zajló jeges események megértéséhez, de ettől tovább szerettem volna lépni és a képekből nyerhető információ objektív mérőszámmá alakítását tűztem ki célul. Ennek érdekében a szakirodalom feltárásával kezdve elég friss nemzetközi irodalomra akadtam, bár a kutatás során olyan megoldásra, mely egyértelműen segítené a Dunára kihelyezett kamerarendszerünk képfeldolgozó algoritmusának költséghatékony és gyakorlati előnyöket közvetlenül nyújtó alkalmazását, nem leltem.

Olyan megoldásra törekedtem, mely a webkamera rendszer képeiből nyerhető információkat képes egyedi szoftverek beszerzése nélkül is kinyerni. Kutatásaim során többféle megközelítéssel is találkoztam, de azok egyike sem nélkülözte a piacon kapható -nem egyszer igen drága- programok használatát. Mindemellett az előre elkészített alkalmazások korlátai azt sem segítették, hogy azokat tovább finomíthassam saját elképzeléseimmel.



1. ábra: A jégmegfigyelő rendszer képei 2012. február 11-én. (Dunaföldvár, Paks, Baja, Mohács)

A webkamera rendszer kihelyezése óta eltelt évek során, ha nem is volt túl sok jeges esemény a lementett képek mennyisége hatalmasra duzzadt. Csak a bajai régi kameránk felvételeiből több mint 600.000 kép gyűlt össze az évek alatt, ami abból adódott, hogy 10-30 másodpercenként is készültek mentések. Ez a mennyiségű adat mindenképpen teljesen automatizált megoldást kívánt, amit eddig egyetlen módszer sem szolgáltatott.

A fellelhető képfeldolgozó eljárások egytől-egyig a webkamerák felvételeinek georeferálásával indulnak, majd azt követi a módosított képen egy kijelölt területen belül a jég és a víz elkülönítése vagy valamilyen korrelációs eljárással a képpontok egymás utáni időpontokban fellelhető pozíciójának vizsgálata. Mint a 1. ábrán (ahol a piros nyilak a vízfolyás irányát mutatják) is látható a kamerák nagyon heterogén módon figyelik a szelvényeket, így legfőképpen az ortorektifikációs eljárások helyes megoldása jelenti majd a legnagyobb problémát.

TÁVÉRZÉKELT KÉPEK FELDOLGOZÁSI MÓDSZEREI

A jégmegfigyeléssel foglalkozó tudományos publikációk legújabb irányzatai valamilyen mozgókép alapú feldolgozást mutat be. Webkameráink képeinek kellő sűrűségű képfelvételei természetesen könnyen mozgóképpé alakíthatók, de ez szükségtelen is, mert a megoldások során mozgóképeket bontják vissza állóképekké.

Legelsőként említem Tóth Rebeka Réka TDK dolgozatát (2017), melyben elég alaposan foglalkozott a témával és MATLAB alapú megoldásával szép eredményeket ért el. Feldolgozást két dunai (Prédikáló szék és Budapest-MŰPA) webkamera képére végezte el és az ebből nyerhető, 2017-re vonatkozó tér-idő összefüggéseket az adott szakaszra le is jegyezte. A megoldás lépései a következők voltak:

- a) Eredeti kép szürke árnyalatossá konvertálása
- b) Ortorektifikáció (felülnézetbe való konverzió)
- c) Kontraszt manuális igazítása (Gamma szűrő segítségével)
- d) Bináris képpé alakítás (fekete-fehér)
- e) Kiválasztott részterületen a fekete-fehér arányból jégfedettség megállapítása

Az eljárás elég sok manuális munkát igényelt és több olyan szoftver ismeretét is megkívánta, melyeket a hazai vízgazdálkodási gyakorlatban nem vagy csak nagyon ritkán alkalmaznak.

MODIS műhold felvételeinek feldolgozása Kraatz-hoz és munkatársaihoz köthető (2016). Kutatásuk alapját a folyókon téli időszakban kialakuló jégtorlaszok okozta árvizek kockázatának csökkentése jelentette. Ezért kiemelten fontos a jégzajlás részletes tér- és időbeli folyamatainak megismerése. Munkájukban a legtöbb problémát a felhők által kitakart hasznos terület csökkenése, illetve az ezt érzékelő algoritmus rossz optimalizálása okozta. A tanulmány egy olyan alternatív algoritmust mutat be MODIS műholdhoz, amely egyaránt alkalmazható tiszta égbolt és félig átlátszó felhővel borított égbolton is. A műholdkép és a webkamera képének eltérő látószögéből adódóan a kutatás felhasználhatósága korlátozott volt. Tobak és kutatótársai (2018) a Duna 2017. évi jégviszonyait dolgozta föl, az eljárás kecsesítő eredményeket adott. Utóbbi munkában a felbontás pontosságát szerették volna tovább finomítani, mert nagyjából a 100 m² feletti jégtáblák azonosításáig jutottak el.

Bourgault (2008) cikkében egy olyan parti fényképezésen alapuló módszerről számol be, amely ismerteti az ortorektifikáció lépéseit és a jégsebesség-mező levezetését a Szent Lőrinc-folyóra. Az eljárás a kamera pontos pozíciójának és dőlésszögének bemérésére épül, amire nem volt mód.

Daigle társaival (2013) a korábban is hivatkozott LSPIV módszert alkalmazta a zajló jégtáblák sebességeloszlásának kimutatására. Ezt az alapvetően 2D-s módszert egyaránt alkalmazzák laboratóriumi és terepi körülmények között, mert képes a vízfelszínen úszó testek mozgásállapotának kellően pontos meghatározására. A módszer egyik legnagyobb hibája, hogy a felvételeket készítő kamera kisebb mozgása (pl. szél miatt), elmosódásokat okoz, ami nehezíti a feldolgozást. Bár a mozgásokból adódó hibák kiküszöbölésére egyszerű megoldást kínáltak egy MATLAB-ban alkalmazott transzformációs eljárással, a számomra fontos jégfedettség kérdésével nem foglalkoztak.

Turcotte és társai (2017) a jég okozta áradásokat tanulmányozták kisvízfolyásokon. Ilyen jellegű elsősorban hegy- és dombvidéki vízfolyások némiképpen más megközelítéseket igényelnek, mint a Duna esetében megkívántak. A cikk a kisvízfolyásokon szerzett tapasztalatokat veti össze, a folyók méretéhez mélységéhez és hidraulikájához igazított megoldásokkal.

A kamrák képeiből nem csak a jégfedettség határozható meg, de a jégmozgás modellezése is segíthető. Egy norvég folyó példáján MIKE-Ice modellt alkalmazott Timalina (2013), aki kutató társaival jégfedettség szimulációt végzett. Norvégia villamos energiájának 99 %-át vízerőművek szolgáltatják, ezért az erőművek folyamatos működésének biztosítása elsőrendű feladat még a téli jeges időszakok alatt is. A folyami jégmodellek leírják ugyan a széles és kis esésű folyókon a jégzajlás folyamatát, de ritka az olyan módszer, ami a sekély és gyors folyók jégmozgását megfelelően reprezentálnák. A kutatók egy ilyen szeszélyes tulajdonságú, szabályozott folyóra alkalmaztak 1D-s MIKE-Ice modellt. A megfelelően paraméterezett szoftver hidrodinamikai és termodinamikai megoldásokkal szimulálja a jégviszonyokat. A tanulmány szerint megoldásuk jól alkalmazható nagy esésű, áramló és rohanó vízmozgások esetében is. A kapott eredmények jó egyezést mutattak a megfigyelt és mért adatokkal. Véggövetkeztetésük az volt, hogy a MIKE-Ice modell jól alkalmazható olyan folyókon, ahol a jég dinamikusán változik.

Ansari kollegáival (2017) a jégzajlást vizsgálta partról készített felvételek alapján. A tanulmány a jég viselkedését és a jégfedettséget vizsgálja 5 főbb lépésből álló algoritmus eredményeképp. A folyók hidrodinamikai jellemzőit jelentősen befolyásolja a jégfedettség, illetve annak minősége, ennek vizsgálatára készítették módszerüket. A vizsgált szelvény szemben lévő partjain elhelyezett kamerák képeit egy előkészítő folyamatban pontosították. Ehhez a MATLAB képfeldolgozó eszközkészletét alkalmazták a napfény és a köd okozta képminőség romlás javítására. Ezt követően a képeket mentesítik a szél okozta kameramozgásból eredő hibáktól. Azután georeferálták a képeket a folyón úsztatott bemért koordinátájú pontok segítségével. A következő lépés a jég és a víz megkülönböztetése volt. Ezért szegmentálták a jég és a víz pixeleit, majd ezeket a pixeleket programjuk a többi képen is elkülönítette, e képpen automatizálva a folyamatot. Így határozták meg a jégfedettséget százalékban, a jéghatár növekedését és hátrálását is. Az ismert léghőmérséklet és időtényező segítségével a teljes jégzajlás nyomon követhető volt. Saját kutatásomban az itt alkalmazott szegmentálástól egyszerűbb és jobban automatizálható módszert alkalmaztam.

Turcotte és Morse (2013) különböző folyómedrek morfológiáját felhasználva egy globális folyóosztályozási modellt alkottak. Elgondolásuk lényege egy olyan konceptuális modell megalkotása, amit elsődleges eszközként lehet használni a folyókon megjelenő jég minőségének és mozgásának meghatározásához. Kutatásuk leginkább a hideg égöv folyókra korlátozódott. A morfológiai, meteorológiai adatok összevonásával egy 3D-s modellt készítettek, amely jó közelítéssel leírta a jég megjelenési formáit.

Chu és Lindenschmidt (2016) a jégzajlás megfigyelését műhold és radar kombinálásával végezték. A tanulmány a két különböző technika pozitív tulajdonságait egyesítette. Sikerült olyan megfigyelő eszközt alkotniuk, amely erős egyezést mutatott a földi mérésekkel. Az egyes vadvízi folyószakaszok nehézkes megközelíthetőségéből adódó problémákra, a távérzékelés jó megoldást nyújtott. A korábban már említett MODIS műhold képeit és a RADARSAT műszer adatait ötvözve, képessé váltak detektálni a jégfedettség vastagságát is. Megfigyeléseikből megállapították a jégfelbomlás (eltűnés) különböző szakaszait.

Kutatásaim során nem találtam olyan ingyenes vagy nyílt forráskódú jégmodell szoftvert, melyekkel kitűzött céloom egyértelműen elérhető lett volna. Olyanra sem akadtam, amit tovább fejlesztve tudtam volna használni. Ezért egyre inkább egy új, egyedi megoldás irányába haladtam tovább. Bár Lindenschmidt (2017) tudományos cikke egy olyan ingyenesen hozzáférhető, nyílt forráskódú modellező szoftvert mutat be, amellyel nyomon követhető egy vizsgált folyószakasz jégviszonyainak alakulása. De a RIVICE névre keresztelt 1D-s alkalmazása olyan paramétereket is megkíván (jégporozitás, jégérdesség, stb.), melyek nem állnak rendelkezésünkre.

Zhang és társai (2017) szintén távérzékelésből nyert adatokat használtak fel a jégtorlasz képződés modellezéséhez az észak-kanadai Slave folyón. Ők is a MODIS műhold és a RADARSAT műszerrel mért adatokkal dolgoztak. Azután a RIVICE és HEC-RAS modellek összehasonlító elemzéséből kiderítették, hogy a visszaduzzasztás a jégtorlasz mögött és a jég térfogata a két modell szerint másképp alakul. Terepi mérések alapján megállapítást nyert, hogy a RIVICE pontos eredményt ad nyílt víz esetén, de a jéggel fedett esetekben továbbra sem tudunk pontosabb eredményt produkálni. A paraméterezéstől rendkívül függő analízis azt mutatta, hogy a morfológia és a hidraulikus viszonyok erősen befolyásolják a jégtorlasz hosszúságát és a vízmélységet. Hozzáteszem, hogy utóbbi megállapításokat már Beltaos (1982) is lejegyezte a múlt század végén.

Mindezek alapján egyértelművé vált, hogy olyan egyedi megoldás kialakítása szükséges webkameráim képének feldolgozásához, mely az áttekintett szakirodalomban csak részben vagy egyáltalán nem lelhető fel.

Perspektív kép ortorektifikációs lehetőségei

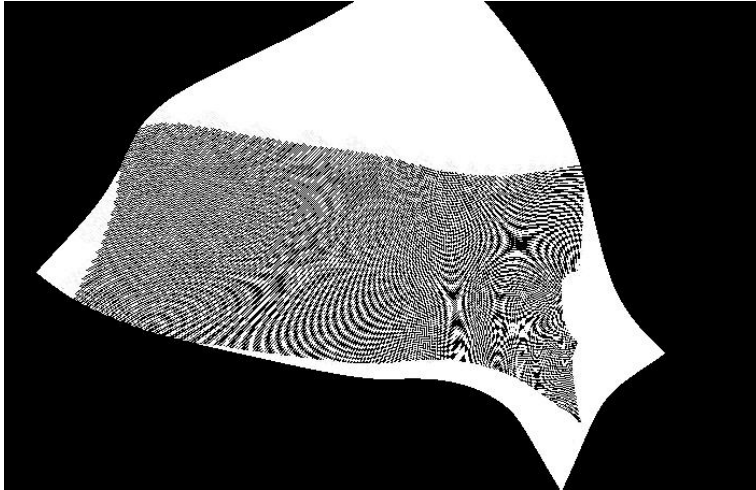
A kamerák elhelyezésénél a legtrikább eset, ha kellő magasságban (legalább a folyó szélességének tizede) és ideális szögben (folyásirányra merőlegesen) sikerül a kiépítés. Így az esetek döntő többségében valamilyen perspektív, a kamera egyedi torzításaival is módosított képet kapunk. A képből nyerhető, jéggel kapcsolatos helyes és számszerű információ kinyerése érdekében derékszögű koordináta rendszerbe való felülnézetté alakítás (ortorektifikáció) szükséges.

Az ortogrektifikáció alapvető térinformatikai feladata, melyre több előregyártott szoftver is kínál különböző megoldást (Bódis, 1999). Legkézenfekvőbbnek az tűnik, ha egy ilyen alkalmazás segítségével valamennyi képünket egy kötegelt konvertálási eljárás keretében módosítjuk és a feldolgozást az így kapott képek elemzésével folytatjuk. Ez volna a követendő szakirodalomból és távérzékelte képek feldolgozási eljárásának rutinjából eredő megoldás. Azonban személyes tapasztalataim ennek az elsőre kézenfekvőnek tűnő megoldás ellen hatottak, részben azért mert az eljárást leginkább légi felvételek ortofotóvá alakításánál használják. Esetemben viszont a perspektív képeim sokkal hegyesebb szögből készültek, mint az a légi felvételeknél megszokott.

Disszertációmiban a kamerák képeiből nyerhető adatok feldolgozását és az így kapott eredmények elemzését tűztem ki célul. Ezért felkerestem több a témában magas ismeretekkel rendelkező kutatóbázist és szakembert is. Így jutottam el a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, a Debreceni Egyetem, a Szegedi Tudományegyetem térinformatikával, távérzékeléssel foglalkozó szakembereihez, akik önzetlen segítségét ezúton is külön köszönöm. Egybehangzó véleményük szerint a rendelkezésre álló szoftveres lehetőségek nem kimondottan támogatják az én általam kért képfeldolgozó eljárást. Legalább is nem olyan módon, ami azután egyszerű automatizálást tenne lehetővé.

Az első probléma az ortorektifikáció, hiszen nem az egész képet kellene felülnézetté konvertálnom csak annak egy részét. A rendelkezésre álló megoldások egy szabálytalan alakú képrészlet transzformálását nem támogatják, az egésznél pedig nagy hibát vétenek. Továbbá nem egyszerű feladat olyan fogópontokat találni a vizsgálandó területen, mely egyértelműen azonosítható a kép pixelben értelmezett és a valóságos földrajzi koordinátarendszerben. A kamerák ugyanis a Duna egy adott szelvényét nézik, ahol nem sokasodnak a leírtak szerint könnyen beazonosítható pontok. Ahhoz, hogy az transzformációs eljárás sikeres legyen minél egyenletesebb kiosztásban és több helyen is szükség volna ilyen pontokra. A transzformáció elvileg a kamera pontos koordinátái és irányultsága alapján is elvégezhető, de ez túlzottan bonyolultnak mutatkozott. Leginkább a kamera helyzetének és dőlésszögének pontos bemérése adta fel a leckét.

Ha sikerül is megfelelő pontokat találni a beépített ortorektifikációs eljárások végeredménye egy olyan torzított kép, mely a fogópontokat többé-kevésbé a valós helyére illeszti, majd a kép többi részét a fogópontok között valamilyen interpolációs eljárással képezi. Próbaképpen egy sakktablára emlékeztető pixelenként váltakozó fekete-fehér képet alkottam a webkamera vizsgálandó képrészletére és az ArcGIS program által kínált georeferálási eljárásban a legjobbnak ígérkező eljárásokkal teszteltem. A végeredmény elkésztető volt, mert a kapott kép köszönő viszonyban sem volt (2. ábra) a logikusan elvárható eredménnyel. Egy ilyen nyilvánvalóan fals struktúra felismerése a jégviszonyokat ábrázoló kép módosítását követően sokkal nehezebb volna, ezért esett a választás erre a könnyen átlátható pepita mintázatra. Amellett, hogy a kapott eredmény egyáltalán nem volt kecsegtető, annak javíthatósága sem körvonalazódott, hacsak az illesztőpontjaim pontosítására nem sikerül áthidaló megoldást találni. Ami sajnos a vízfelszínen történt, kamera előtt végrehajtott, folyamatosan kimért pozíciójú hajókázásból sem volt biztosítható.



2. ábra: ArcMap programban georeferált, eredetileg pepita képből származó eredmény

A képforgatások, ortorektifikáció és számos térinformatikai kérdés szakirodalma (pl. Kraus és Waldhäusl, 1998) széleskörű, mégis Gálai Antal Hidrológiai Közlemben megjelent cikke (2008a) hozott ígéretes megoldást, melyet éppen a nehezen ortorektifikálható webkamera képekre ismertetett. Megoldásának lényege, hogy egy síklapra négyzeteket rajzol, melyek sarkainak koordinátáit leméri a lap saját koordináta rendszerében értelmezve. Ezt követően a lapot több pozícióban is a kamera elé helyezi és az így készült képeken pixel koordinátában is leméri ugyanezen sarkokat. A valós és képkoordináták ismeretében visszaszámolható az a transzformációs mátrix, mely segítségével lineáris algebrai módszerekkel tetszőlegesen átváltható egy kép és a valóság közötti pozíció. A módszer annál is inkább kedvező, mert a síklapot a kép azon részére is helyezhetjük, ahol majd a jégfedettségre leszünk kíváncsiak. Ez pedig esetünkben jellemzően a Duna szabad vízfelülete, ahol aligha találhatnánk megfelelő illesztőpontokat. Fontos egyszerűsítést jelent, hogy a vízfelszín még a Duna folyam esetében is vízszintesnek tekinthető a keresztmetszeti méretek, a valós felszínesítés és a kamerán látható felület együttesét tekintve. Ezért, ha a síklapot sikerül olyan vízszintes pozícióban is lencsevégre kapni, hogy az minél jobban kitakarja a vizsgálandó szelvényt, egészen pontos transzformációs eljárásához juthatunk.

A leírtakhoz hasonlatos kamerakalibrációs eljárás ismert más területeken is, például a MATLAB nevű szoftver egyik kiterjesztésében is megtalálható. Mint kiderült a szoftver kiterjesztései nem orvosolták volna összes gondomat.

A jégfedettség megállapításához nem cél egy tökéletesen georeferált felülnézeti kép elkészítése, megfelelő geodéziai pontosság mellett. Hiszen a víz és a jég arányát az abszolút koordináták ismerete nélkül is megmondhatjuk egy kényelmesen felvett relatív koordináta rendszerben, amit egy vízszintes síklapon is definiálhatunk.

Jég és a víz automatikus megkülönböztetése

A jég és a víz megkülönböztetésére első gondolatnak valamilyen alakfelismerő eljárás tűnt kézenfekvőnek. Ilyen alakfelismerési eljárások többnyire tanuló algoritmusokkal párosulnak. Átnézve a vizsgált szelvények kamerával rögzített jégjelenségeit, nem nagyon körvonalazódott olyan jól definiálható és ezáltal tanítható strukturáltság, mely az emberi szem és elme szerepét nélkülözhetné volna. Ráadásul több olyan esemény is volt, amikor nem hatalmas jégtáblák, hanem rengeteg apró jégfoszlány haladt át a vizsgált szelvényen. Gyakori eljárás ilyen esetekben a kép részeinek azonos tulajdonságaival jól jellemezhető szegmensek automatikus felismerése (Túri, 2015). Sajnos a szegmentálás sem hozott jól használható eredményeket. Minden kipróbált eljárás elég durva hibákkal hozta az eredményeket és ami ennél is nagyobb bajt jelentett, képenként egyedi paraméterezési eljárásokat követeltek meg. Végül azt a megoldást választottam, hogy a képet pixelenként valamilyen küszöbszint alkalmazásával elválasztottam a jégnek és víznek tekinthető elemekre. Az elsőt (jég) fehér, míg a másodikat (víz és minden egyéb) fekete színnel jelöltem. Ez a megoldás már az első próbálkozásoknál is egészen jó eredményeket hozott, de az is látszott, hogy tovább kell finomítani.

ALKALMAZOTT EGYEDI ELJÁRÁSREND LÉPÉSRŐL-LÉPÉSRE

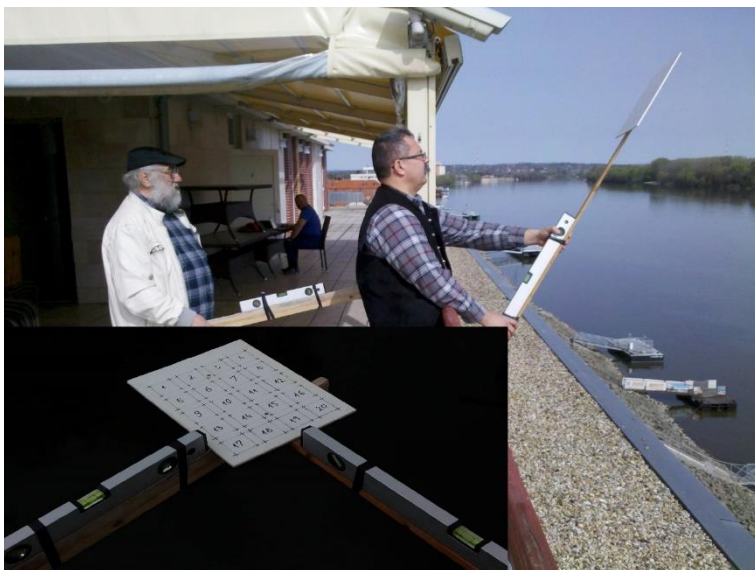
Összesen 5 szelvényben 6 webkamera rögzítette az elmúlt évek alatt bekövetkezett dunai jégzajlási eseményeket. Volt olyan kamera, amit idő közben elloptak, kettőt kicseréltek. Az általam kiválasztott és alkalmazandó eljárásrend megköveteli azon kamera kalibrációját mellyel a képek készültek, sőt a kamera elhelyezkedése sem változhat meg. Az összes megengedhető eltérés mindössze a kisebb elmozdulásokból adódhat. A kamerákat időnként tisztítani kell, ami még helyes visszaállítás után is pár pixelnyi elmozdulást idézhet elő a korábbi képekhez viszonyítva, ez azonban megengedhető és kezelhető a későbbi számítások során. Az elloptott illetve helyettesített kamerák képeinek feldolgozását már nem lehetett módszeremmel elvégezni, mert azok

kalibrálása utólag már lehetetlen, de a rögzített felvételekből így is sok tapasztalatot nyertem. Három kamerát (Paks, Baja, Mohács) viszont sikerült kalibrálni, mely eljárás részleteit a következő alfejezetekben ismertetem.

Webkamerák síklapos kalibrálása

A kamerák perspektív képének ortorektifikálásához, amint azt a 4.1.1 fejezetben részleteztem, számos megoldást kipróbáltam, illetve több segítséget kaptam a témában tapasztalt és tölem sokkal nagyobb tudással rendelkező szakemberektől. A legnagyobb problémát az úgynevezett illesztőpontok képen belüli elhelyezkedésének megfelelő eloszlása illetve a különböző georeferálási technológiák nem éppen erre a feladatra történt fejlesztése okozta. A legtöbb térinformatikai szoftver közel felülnézeti képek valós felülnézeti képpé konvertálását egészen jó közelítéssel megoldják. Azonban egy hordó torzítással és egyéb a webkamerák képtorzító hatásával rontott perspektív kép akár csak egy szeletének megfelelő módosításával nehezebben birkóztak meg. Tudva azt, hogy ma már különböző programok és interneten fellelhető alkalmazások is támogatják a képtorzítások javítását (pl. lencsemodellek), mégsem indultam el ezek felhasználásának útján. Ennek legfőbb oka az, hogy a forráskódok ismerete nélkül a kapott eredményt kénytelen elfogadni a kutató és sohasem lehet meggyőződve annak megbízhatóságáról. Ezen oknál fogva felkerestem Dr. Gálai Antal korábbi tanáromat, akivel olyan megoldást választottam, melynek alapelveit a Hidrológiai Közöny hasábjain 2008-ban közölte. A módszer lényege abban áll, hogy egy síklapon előre kiszerezett rácsozatot különböző pozícióba helyezünk a kamera elé, és az így kapott képek matematikai elemzéséből kiszámoljuk a szükséges transzformációs paramétereket.

A síklapon lévő rácsozat sarokpontjainak koordinátáit előre lemérhetjük, illetve olyan pozíciókra szerkeszthetjük, melyeket mi szeretnénk. Esetünkben egy 0,5 cm vastag A4-es méretű fehér műanyag lapot használtunk melynek aljára egy lécezt rögzítettünk. A sütőlapátra emlékeztető szerszámot így már könnyedén mozgathattuk az olykor nem is túl egyszerűen megközelíthető webkamerák előtt. Összesen 20 db 4*4 cm-es négyzetet rajzoltam a lapra 4 oszlopba és 5 sorba, köztük egyenlően 1,5 cm térközt hagyva. Minden négyzet sorszámát annak közepében fel is írtam, a későbbi beazonosíthatóság érdekében. A jól felismerhető négyzetek sarkainak képkordinátában (pixelben) értelmezett helyét a fényképeken is beazonosíthatjuk. A valódi és a bemért koordinátákból a lineáris algebra módszerével már pontosíthatók a számunkra szükséges paraméterek.



3. ábra: Dr. Gálai Antallal és Rajnai Gáborral a Mohácsi webkamera kalibrálásánál (Fotó: Farkas Zoltán)

A transzformációs paraméterek meghatározásához szükséges fényképezés (mérés) megkezdése előtt arra is gondot fordítottunk, hogy a síklapot vízszintes helyzetbe is hozhassuk a kamera előtt. Erre azért volt szükség, mert a megfigyelt vízterület a kamera képén elkülönített (számunkra fontos) része a Duna esetében ilyen kicsi szakaszon a vízszintessel jól közelíthető. Márpedig, ha sikerül olyan képeket készítenünk, mely az általunk megrajzolt, de vízszintesen fekvő négyzetekkel egészen jól lefedi a vizsgálandó vízfelületet, akkor ez lesz a legjobban felhasználható kép kalibrációnkhoz. A lefedi szót használtam, pedig a kitarakja szó helyénvalóbb lenne, mert a kamera közvetlen közelében mozgatott síklap képe takarja a mögötte jóval nagyobb távolságban lévő nagyságrenddel nagyobb területet. Azonban, ha mindkét terület vízszintes, akkor a rajtuk végzett mérések csak arányaikban térnek el egymástól. Ez viszont remekül felhasználható a későbbiekben.

Ezen eljáráshoz a síklapot tartó lécre egy vízmértéket erősítettem. Továbbá egy másik segédlécezt (szintén vízmértékkal ellátva) olyan formára igazítottam, hogy a síklapomat tartólécére merőleges irányban is alátámaszthassa. Az így, egymásra merőlegesen elhelyezett, vízszintesre állítható lécezzel a síklap már valóban

vízszintes síkba volt hozható. A 3. ábrán jól látható a síklap mozgatása és a vízszintes helyzet elérését szolgáló vízmértékkel felszerelt lécek.

Transzformációs mátrixok kiszámítása

A webkamerával különböző helyzetekben felvett négyzetácsot ábrázoló síklap előnye, hogy a síklapon értelmezett koordináta rendszerben csak x , y -nal kell számolnunk, hiszen z állandósága miatt az 0 -nak vehető. Ezért a megoldandó feladat némiképp egyszerűsödik:

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = f \left(\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \right) = f \left(\begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} \right)$$

A keresett függvény megoldására a legkézenfekvőbb követnünk a fény útját a kamerán keresztül egészen a keletkezett képig. Először is a $z=0$ síkban lévő x , y pontok forgatással és eltolással a kamera középpontjában értelmezett \bar{x} , \bar{y} , \bar{z} koordináta rendszerbe transzformálódik. Ezt követően egy általunk is látható sík képben vetül ki a jelenség, ahol a koordináta rendszert már általában a kép bal felső sarkában lévő origóra értelmezzük melynek pontjait $[u, v]$ -vel jelöljük. A bal felső sarokban definiált origónak csupán annyi a jelentősége, hogy ne kelljen negatív koordinátákkal bajlódjunk. Az \bar{x} , \bar{y} egymásra merőleges tengelyek által meghatározott sík párhuzamos az u, v által hasonlóan meghatározott síkkal. Sőt az u és \bar{x} tengelyek párhuzamosak egymással és ebből következően v és \bar{y} tengelyek is. \bar{z} tengely így a másik két tengely által alkotott síkra merőleges.

Először a kamera középpontjába való transzformáció kérdésével kell foglalkozni, melyhez egy R , forgatási, úgynevezett rotációs mátrix és egy t , eltolási (translation) vektor meghatározására lesz szükség. Az első (R) a térbeli pontok koordinátáit forgatja be a kamera középpontjába értelmezett \bar{x} , \bar{y} síkkal párhuzamos síkba, míg a második (t) el is tolja az így kapott képet a kamera középpontjába.

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + t$$

Ahol R rotációs mátrix az R_x, R_y, R_z különböző tengelyek szerinti forgatási mátrixok eredője:

$$R = R_x R_y R_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \sin \omega \\ 0 & -\sin \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \vartheta & 0 & \sin \vartheta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \vartheta & 0 & \cos \vartheta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

De számomra a tengelyenkénti forgatások szögei ($\omega, \vartheta, \varphi$) nem érdekesek csak az eredő R rotációs mátrix elemei.

A perspektivikus képen a hasonló háromszögek elve alapján a kétszer távolabbi szakasz kétszer kisebb képet ad majd. Bármely képbeli pont és kameraközépponti vetülete közötti „távolság” a \bar{z} koordináta ezért a képek koordinátáit a következőképpen kaphatjuk

$$u = \frac{\bar{x}}{\bar{z}} \quad \text{és} \quad v = \frac{\bar{y}}{\bar{z}}$$

Ez így már elég jó eredmény, de nincs benne a kamera gyártási hibájából eredő lencseferdeség és külpontosság. Ezek kameránként különböző, de kimérhető állandók, melyeket mátrixos formába is rendezhetünk.

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ahol

α – az u irányultságú úgynevezett mértékegység váltó

β – a v irányultságú úgynevezett mértékegység váltó

γ – a kamera gyártási pontatlanságából eredően a v irányultság u irányultságra ható úgynevezett ferdeségét jellemző tényező

u_0 és v_0 – a kamera origójának (mely annak tengelyében van) képünkön való helyzete, mely a gyártási hibák miatt nem feltétlenül azonos a kép geometriai közepével.

A mátrix utolsó sora az u - v re merőleges irány torzításait adná, mely teljesen közömbös a feladat szempontjából.

Ahhoz, hogy az imént ismertetett kamerahibákkal is számolhassunk elengedhetetlen a rotációs mátrixunk (R) és eltolási vektorunk (t) beszorzása az A mátrix-szal:

$$H = A \cdot R ; \quad p = A \cdot t$$

ezeket behelyettesítve az alapegyenletünkbe látható, hogy H mátrix utolsó oszlopának elemeit mindig 0 -val szorozzuk, a $z=0$ síkkal való feladatmegoldásunk miatt, ezért a H mátrix helyére vezessük be H_p mátrixot. H_p mátrix csupán utolsó oszlopában tér el az eredeti H mátrixunktól, mert oda p vektor elemeit tesszük.

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + p = H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & p_1 \\ h_{21} & h_{22} & p_2 \\ h_{31} & h_{32} & p_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = H_p \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Ezt azonban csak akkor tehetjük meg, ha a valós koordinátákat tartalmazó vektorunk z elemének helyén álló 0 helyére 1-et írunk. Így az eredetileg 12 keresett ismeretlen már csupán 9-re csökken és H_p mátrixban összpontosul. Ezt az együttható mátrixot kellene meghatároznunk, mely egy klasszikus egyenletrendszer megoldási feladat. Igen ám, de a pontosság és az esetleges hibák kiküszöbölése érdekében a mérnöki szakma mindig sok mérést helyez előnybe az éppen elegendőnél. Így meglehetősen sok képet készítve síklapunkról a kamera előtt már-már a bőség zavarába kerülhetünk. Mit is jelent ez? Jelölje mi a fényképekről leolvasott sarokponti i-edik u, v koordinátákat és M_i az ugyanezen i-edik pont valós x, y, 1 koordinátákat tartalmazó mátrixokat, ekkor

$$m_i = H_p M_i$$

összefüggést kapjuk. De ez mégsem teljesen igaz, mert az egyenletrendszer bal oldalán lévő m_i -ben a kamera középpontjában értelmezett koordinátáknak $(\bar{x}, \bar{y}, \bar{z})$ kellene szerepelniük. Viszont tudjuk, hogy \bar{z} -vel visszaosztva \bar{x} -et és \bar{y} -t megkapjuk u-t és v-t, így:

$$\begin{bmatrix} u_i \\ v_i \end{bmatrix} = \frac{1}{hp_3^T} \begin{bmatrix} hp_1^T M_i \\ hp_2^T M_i \end{bmatrix}$$

ahol hp_3^T jelöli a H_p mátrixunk harmadik sorát.

Ezért aztán minden egyes (i) pontra kétféle egyenletet írhatunk föl:

$$u_i hp_3^T M_i = hp_1^T M_i \quad \text{és} \quad v_i hp_3^T M_i = hp_2^T M_i$$

Ismét mátrix alakba rendezve egyenletrendszerünket

$$\begin{bmatrix} M_i^T & 0 & -u_i M_i^T \\ 0 & M_i^T & -v_i M_i^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} hp_1^T \\ hp_2^T \\ hp_3^T \end{bmatrix} = 0$$

látható, hogy kétszer annyi egyenletünk lesz mint ahány síklapos sarokpontot beazonosítottunk. A kalibrációs síklapunkon összesen 20 négyzet 4-4 sarka azonosítható be, így egyetlen síklapos felvétel alapján 160 egyenlet írható föl. Ez a szám sokszorozódik, ha több felvételt is feldolgozunk.

A jobb követhetőség kedvéért a bemért pontonként felírható egyenletpár így néz ki:

$$\begin{aligned} h_{11}x_i + h_{12}y_i + p_1 \cdot 1 + 0 + 0 + 0 - u_i(h_{31}x_i + h_{32}y_i + p_3 \cdot 1) &= 0 \\ 0 + 0 + 0 + h_{21}x_i + h_{22}y_i + p_2 \cdot 1 - v_i(h_{31}x_i + h_{32}y_i + p_3 \cdot 1) &= 0 \end{aligned}$$

Minél több pontot mérünk be (növeljük a feldolgozott síklapos képek számát) annál pontosabbak lehetünk. Ez máris jobb megoldásnak mutatkozik a korábban tesztelt georeferálási megoldásoknál, mert azokban az ismert illesztőpontok számának növelésével az algoritmusok összeomlását értük csupán el. Itt viszont éppen ellenkezőleg, mert az egyes egyenletekben rejlő információ egy része elvész a kerekített u, v pixelkoordináták alkalmazásával, amit visszanyerünk az egyenletek számának növelésével.

Persze Gauss óta tudjuk, hogy egy egyenletrendszer megoldásánál az ismeretlenekkel azonos számú független egyenletre van szükségünk. Márpedig H_p ismeretleneket tartalmazó mátrix csupán 9 ismeretlent rejt, amihez 9 egyenlet éppen elegendő volna.

Ez a probléma praktikus mérnöki módon úgy kerülhető el, ha az egyenletrendszerünk együttható mátrixának transzponáltjával balról beszorozzuk az egyenletrendszer mindkét oldalát. Bal oldalon egy új, immár kvadratikusan együttható mátrix jelenik meg, mely tartalmazza az összes felvétel minden pontja által rejtett információt. Ez az eljárás tulajdonképpen a pontfelhőkre illesztett görbékénél ismeretes matematikai precizitással levezetett legkisebb négyzetek módszerét adja. Jobb oldalon nulla állt, ami a leírt szorzás után sem változik meg.

Viszont az együttható mátrixunk 9x9-es méretűre hízott és a megoldás keresése közben több eredményre is juthatunk. A mi szempontunkból az új együttható mátrix legkisebb sajátértékéhez tartozó sajátvektor szolgáltatja majd H_p keresett elemeit.

Az eljárást magam is megoldottam Excel táblázatkezelő szoftverben, de eléggé munkaigényes volt és nehézkes kezelésű, ezért Dr. Gálai Antal korábban megírt programját használtam fel a síklapos kalibrálásból származtatható eredmények elérése érdekében.

Utóbbi eljárás azért is volt sokkal kedvezőbb az általam is megoldottnál, mert a webkamerák hordó vagy párna torzításának k_1 és k_2 tényezőjét is szolgáltatja. Ahogyan a sinus és cosinus függvényekből megfelelő Fourier együtthatókkal lépcsős vagy fűrészfogas függvények is előállíthatók, eképp a radiális torzításnál a kört jelentő négyzetes valamint a negyedfokú páros sugárérték hatványok segítségével halszem optikából a teleobjektívig előforduló hordó- és párnatorzítások is numerikusan figyelembe vehetők.

Az eljárás során a kameránként kiszámított transzformációs mátrixok, vektorok és együtthatók a következők:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha & \gamma & u_0 \\ 0 & \beta & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}; \mathbf{t} = \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix}; \mathbf{k}_1 \text{ és } \mathbf{k}_2$$

A - a kamera egyedi hibáit is számításba vevő mátrix

R –rotációs mátrix, mely a térbeli forgatásokat végzi, el, hogy a kép síkba kerüljön

t – translációs vektor, mely a sík képet a megfelelő koordináta helyzetbe igazítja

k_1 és k_2 - a webkamera képének hordósságát/párnasságát leíró paraméterek

Transzformációs mátrixok igazolása

Ahhoz, hogy a későbbiekben megbízhatóan alapozhassunk a tervezett képfeldolgozási eljárás eredményeire mindenképpen szükséges a transzformációs eljárás ellenőrzése.

Első lépésben egy tetszőleges síklapos fényképen feltüntettük a képről lemért [u,v] pixelkoordinátában adott sarokpontokat. Ezt követően a sarokpontok valós koordinátaiból az immár ismert transzformációs paraméterekkel kiszámítottunk ugyanezen pontok elhelyezkedését. A vizsgálatot hordótorzítás nélküli számítással és annak figyelembevételével is elvégeztük, utóbbi mindig sokkal jobbnak bizonyult (4. ábra). Az ábrán fekete kis körökkel jelöltem a kalibrációs négyzetek sarkainak lemért koordinátáit illetve nagyobb piros körökkel a számított helyzetüket. Az egyezés szabad szemmel is láthatóan szinte tökéletes. A képnek csaknem a közepén egy nagyobb kör jelzi a kamera képen értelmezett origóját (u_0, v_0). A képen az is megfigyelhető, amint a síklapot vízszintes helyzetbe hozó, egymásra merőleges lécek aláátamasztják azt.

A második ellenőrző lépés előtt bemutatom a valós koordináták és a képkoordináták átszámításának menetét. Első lépésben mátrix szorzással kiszámolom \mathbf{H} mátrixot és \mathbf{p} vektort a már korábban megkapott transzformációs paraméterekből:

$$\mathbf{H} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{R}; \mathbf{p} = \mathbf{A} \cdot \mathbf{t}$$

melyek felhasználásával a valós x, y és z koordináták alapján meghatározhatom a kamerában leképezett koordinátákat \bar{x} , \bar{y} , és \bar{z} , melyek sajnos még nem a keresett [u,v] képkoordináták. A vízszintesnek feltételezett helyzet miatt z értéke állandó így akár 0-nak is vehető, ami jelentősen megkönnyíti a későbbi számításokat és egyszerűsítést hoz a megoldás menetébe:

$$\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \mathbf{p} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & p_1 \\ h_{21} & h_{22} & p_2 \\ h_{31} & h_{32} & p_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H}_p \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Az így megkapott \bar{x} , \bar{y} , és \bar{z} koordinátákból már számíthatók a keresett [u,v] képkoordináták:

$$u = \frac{\bar{x}}{\bar{z}} \text{ és } v = \frac{\bar{y}}{\bar{z}}$$

Ezen a ponton némi magyarázatot igényel, hogy mi is az a \bar{z} és mit jelent a kamerában keletkezett illetve a fénykép koordinátái közötti különbség. Ezt úgy kell elképzelni, mint egy diafilm kivetített képét. Amit látunk az a vásznon megjelenő kép, de azt egy parányi diafilmről vetíti ki a projektor.



4. ábra: Bajai régi webkamera síklapos kalibrálásának ellenőrzése

A két kép közötti távolság fogható fel \bar{z} -nek, ami a fókusz-távolsággal arányos kicsinyítő, vagy nagyító szorzója $[u, v]$ képpkoordinátának, hogy a kamera vagy vetítő eredeti képének $[\bar{x}, \bar{y}]$ koordinátáit megkapjuk. Így visszafelé számítva azt is felírhatjuk, hogy

$$\bar{x} = u\bar{z} \quad \text{és} \quad \bar{y} = v\bar{z}$$

mely összefüggésekre feltétlenül szükségünk lesz, ha egy képen szereplő pont valós koordinátáját szeretnénk visszakapni. Mivel pontosan ezt szeretnénk majd, azaz egy beazonosított jégtábla kerületének $[u, v]$ koordinátáiból szeretnénk valós $[x, y]$ koordinátákat kapni, amiből a jégtábla felszínének valós területe számítható. Ezt a korábbi 15. számú egyenletrendszer átrendezésével érhetjük el. Az egyenletrendszer mátrix formában felírt formulájának mindkét oldalát H_p^{-1} inverz mátrix-szal szorozzuk a következőt kapjuk:

$$H_p^{-1} \begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

ennek az egyenletrendszernek csak az utolsó sorát felírva

$$h_{31}^{-1}\bar{x} + h_{32}^{-1}\bar{y} + h_{33}^{-1}\bar{z} = 1$$

ezt követően behelyettesítve 17. egyenleteket

$$h_{31}^{-1}u\bar{z} + h_{32}^{-1}v\bar{z} + h_{33}^{-1}\bar{z} = 1$$

majd kiemelve és \bar{z} -re rendezve az egyenletet

$$\bar{z} = \frac{1}{h_{31}^{-1}u + h_{32}^{-1}v + h_{33}^{-1}}$$

Mindéhez a korábban kalibrálási eredményekből kiszámított H_p mátrix inverzének utolsó sorában lévő elemeit kell csupán használnunk. A képletből az is kitűnik, hogy minden egyes képpixelhez saját \bar{z} érték tartozik. Így ha képpkoordinátákból kívánok valós koordinátákat kiszámítani az eredeti alapegyenletem átrendezése szükséges, ahol ismét az inverz mátrix-szal való szorzás segít. Ezúttal H mátrix inverzével kell szoroznom mindkét oldalt

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 0 \end{bmatrix} = H^{-1} \left(\begin{bmatrix} \bar{x} \\ \bar{y} \\ \bar{z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \right) = H^{-1} \left(\begin{bmatrix} u\bar{z} \\ v\bar{z} \\ \bar{z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \right)$$

A felírt összefüggések még nem tartalmazzák az elsősorban a kamerák hordótorzításából eredő úgynevezett disztorziós korrekciót. Ez a gyakorlatban azt jelenti, hogy az eddigiek alapján számított vagy pedig a képről levett $[u, v]$ koordinátákat D_u és D_v korrekcióval kell módosítanunk a pontosabb eredmény érdekében. A korrekciós tényezők előjele annak függvényében változik majd, hogy a valós koordinátákból képpontokat számítunk-e vagy éppen fordítva.

D_u és D_v számításához a kalibrációs eljárásban meghatározott A mátrix elemeire (α, β, u_0, v_0) és k_1, k_2 disztorziós együtthatókra lesz szükségünk. Először számítanunk kell u, v pont képpkoordinátában értelmezett $[u_0, v_0]$ középponttól való távolságát, melyet sugárnak is nevezhetünk. Továbbiakban elegendő lesz ezen sugár négyzetének megadása is:

$$R^2 = (u - u_0)^2 + (v - v_0)^2$$

vezessük be az u és v irányú sugárkomponenseket

$$R_u^2 = \frac{R^2}{\alpha^2} \quad \text{és} \quad R_v^2 = \frac{R^2}{\beta^2}$$

melyek segítségével megkapható a disztorzió D_u és D_v keresett értéke

$$\begin{aligned} D_u &= (u - u_0) R_u^2 (k_1 + k_2 R_u^2) \\ D_v &= (v - v_0) R_v^2 (k_1 + k_2 R_v^2) \end{aligned}$$

végül a disztorzióval finomítom a képpkoordináta helyzetét

$$u = u + D_u \quad \text{és} \quad v = v + D_v$$

A levezetett képletek segítségével immár lehetővé vált a valóság és a képek koordinátái közötti átjárhatóság megteremtése.

A második ellenőrző eljárás során egy kiválasztott vízszintesen álló kalibráció során fel nem használt síklap képet vettem elő és leolvastam a látható négyzetek sarokponti koordinátáit pixelben. Ezekből az adatokból az imént leírt eljárás alapján visszszámítottam $[x, y]$ valós sarokponti koordinátákat. A sarokpontok felhasználásával kiszámítottam minden egyes síklapon megrajzolt négyzet területét, mely egyöntetűen 16 cm^2 -t kell adjon, hiszen azok mind $4 \times 4 \text{ cm}$ -esek voltak. Az eljárás hibájából eredően csupán 3%-os tűrési határon belüli eltéréseket tapasztaltam, amit megfelelő pontosságnak ítélve teljes mértékben elfogadottnak tekintettem az eljárást. Ez a területszámítási hiba távolságra vetítve $\sim 1,4\%$ -ot jelent, ami részben abból a tényből is fakad, hogy a valós koordináták a kép egész értékű pixeleire transzformáltak. Ettől jobb eredményt a piacon készen kapható szoftverek sem nyújtottak, ráadásul a leírt eljárás minden egyes lépése ellenőrizhető és pontosan követhető volt.

Vizsgálódó képrészlet kiválasztása

Minden kamera teljesen egyedi látószögéből és magasságából tekinti a megfigyelendő Duna-szakaszt. Éppen ezért az összes helyszínen egyedi megoldást alkalmaztam, de teljesen azonos eljárásrenddel. Ehhez a GoogleEarth, Madop2005 ortofotók valamint a FÖMI 10.000-es georeferált térképszelvényeit, valamint saját csónakos méréseket is felhasználtam. Utóbbi jelentette az igazi megoldást, mert éppen a vizsgálódó területen való mozgás és fogópontok megtalálását tette lehetővé.

A kiválasztandó szelvényterület minden helyszínen (Paks, Baja, Mohács) egy-egy téglalap formájú síkidom. A téglalapok rövid oldala parttal párhuzamos, míg hosszabb arra merőlegesen helyezkedik el. Ilyen téglalapot sarokpontjaival könnyen kijelölhetünk egy felülnézeti képen, de annál nehezebb megtalálnunk a webkamerák képén.

Az előzőekben kidolgozott számítások nem a Duna vízének szintjére vonatkoztak, hanem azzal teljesen párhuzamos és kicsinyített területre. Ez a Duna tetszőleges vízszintjére igaz, ezért egy azzal párhuzamos síkban látható és meghatározott jég és víz fedettségi arány éppen annyi lesz, mint amennyi a víz felszínén mért érték volna. Ezért a számítási eljárás a későbbi jégfedettség megállapítására jó lesz, de közvetlenül nem használható a vizsgálódó terület lehatárolására.

Ismét szükségessé vált, hogy a perspektivikus képet egy függőleges felülnézeti, úgynevezett ortorektifikált képpé tudjam átalakítani. Ahhoz, hogy ezt a transzformációt elvégezzem, szükségem volt a webkamera képén értelmezett [u, v] pixelben kifejezett koordináták és a képen így kijelölt pontok fizikai, földrajzi koordinátái [x, y] közötti összefüggésre.



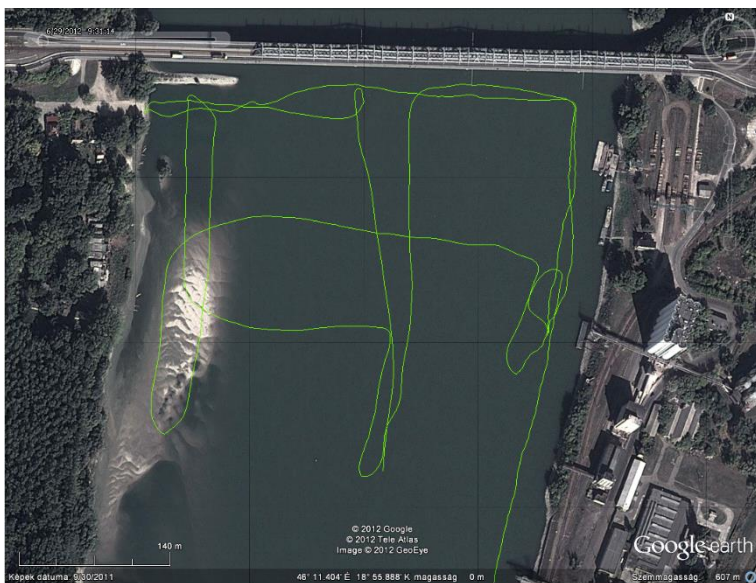
5. ábra: Csónakos mérés kifeszített ponyvája, első oszlopon a GPS vevőfejével, Váits Zoltánnal és Forrás nevű pumival (Fotó: Farkas Zoltán). Jobbra a webkamera képe látható a mozgó csónakkal a ponyvával.

Minél több pontot sikerül beazonosítani a transzformáció annál pontosabbá válik. Az akadályt az jelenti, hogy a képen látható vízfelület nem tartalmaz olyan egyértelmű fogópontokat, amire ez a transzformáció elvégezhető. Ilyen pontok csak a parton volnának, ami nem kielégítő a feladat megoldásának szempontjából.

A pontosítás érdekében egyedi mérést végeztem, amely mérés során motorcsónakban kifeszítettünk egy messziről is jól látható nagy fehér vásznat, majd a vászon első tartórúdjának a tetejére egy GPS vevőt rögzítettünk, amely a hajó mozgása során mérte a vászon jobb felső sarkának helyzetét. (5. ábra)

A hajó mozgását GoogleEarth-ben szemléltetve egy felülnézeti képen látjuk azt az útvonalat ahol a motorcsónak haladt (6. ábra). Az útvonalat ábrázoló kép egy alacsonyabb vízállásnál készült, motorcsónakos mérésnél a rajta látható zátony víz alatt volt. Az útvonal során törekedtem arra, hogy mind jobb parton, mind középen illetve a bal parton is kijelölhető legyen olyan pont, ahol a hajó pozíciója megmérésre és megfigyelésre került.

Ezeket a pontokat egytől egyig kijelöltem. Leolvastam a webkamerával rögzített képre vonatkoztatott [u, v] pixel koordinátát és párba hoztam a GPS vevővel felvett földrajzi koordinátákkal. Anélkül, hogy georeferáltam volna egyszerűen kiválasztottam négy olyan sarokpontot, mely a csónak mozgásából mind felülnézeti, mind pedig webkamera képen ismert volt. Az így kialakított felülnézeti kvázi-téglalap a kamera képén egy szabálytalan négyszöggé alakult. Csupán azt kellett ellenőriznem, hogy ebbe a négyszögbe semmi zavaró képelem se essen.



6. ábra: Mérőhajó mozgását/útvonalát bemutató felülnézeti kép

Ilyen zavaró képelem például a veszteglő hajók, a bajai Duna-híd tükröződése, parti fények tükörképe, Mohács esetében a Komp míg Pakson a parti fák takaró hatása volt. Addig iteráltam a sarokpontok kijelölését, míg végül egy minden szempontból megfelelő részterületet nem kaptam. Ezután a kijelölt sarokpontok valós koordinátája alapján meghatároztam vizsgálatba vont terület fizikai méretét m^2 -ben. Egyetlen dolog volt már csak hátra az [u, v] sarokpontok átszámítása abba a koordináta-rendszerbe, mely a mindenkori vízfelszínrel párhuzamos és állandósított a jégborítottság számítására.

Végezetül leellenőriztem, hogy az így kapott koordinátákkal lerajzolt négyszög valóban téglalapot ad-e, amint az elvárható volna. Nagy öröm ért, amikor ezt számítás és szerkesztés útján egyaránt sikerült visszaigazolnom.

A webkamera egy tetszőleges képén a kiválasztott sarokpontok alapján kijelölhető szakaszokkal lehatároltam és piros színnel jelöltem ki azt a területet, melyen a továbbiakban a jégfedettséget határozom meg. Ezen piros terület burkolójának valamennyi [u, v] koordinátáját egy text file-ban raktároztam el, így a későbbiekben, mint kitararó (blank) kerület használhatom majd fel.

A feladat azzal zárult, hogy a kiválasztott kamerák elmozdulását is leellenőriztem, mert az elmúlt 10 évben pár alkalommal kissé elmozdultak, mely egy újabb korrekciót tett szükségessé. Ezzel az elmozdulást jellemző és időponthoz jól köthető korrekcióval is számoltam a későbbi feldolgozás során.

Jég és víz elkülönítése fekete-fehér bináris képen

A megfigyelt folyószakaszon, de az összes általam eddig látott jégzajlásos felvételen eléggé heterogén szín jellemzi a jeget, ennél fogva a feladat koránt sem triviális. A jégtáblák alakja sem olyan jellemző, ami segítené a feladat végrehajtását. Sőt a jégtáblák mérete, alakja és formája még a szintől is nagyobb változékonyságot mutatott. Innen jött az a feltevés, hogy célszerűbb alakfelismerés vagy szegmentációs eljárások helyett inkább a webkamera képének pixelenkénti elemzésével megoldani a feladatot. A lehető legjobb helyzet akkor áll elő, ha a zajló jégtáblákra hó hullik, melyek gyönyörű fehér felületet adnak és ezáltal könnyebben megkülönböztethetővé válnak az őket körülvevő víztől.

A legtöbb esetben egyáltalán nem fedi hó a zajló jeget. A tükörijég vagy a hártajég jelensége okozza a legtöbb problémát. Az ilyen jeget, mely áttetszősége miatt csaknem teljesen visszaadja a víz színét még szabad szemmel sem egyszerű megkülönböztetni a víztől. Ezekben az esetekben tulajdonképpen a környezet utal rá, hogy valószínűleg jégről van szó. Újabb gondot az jelenti, hogy a kép más-más területén ugyanazon szín vizet, máshol pedig jeget jelöl. Bármilyen kicsire is szűkítjük a vizsgálandó területet a megfigyelt folyószakaszon 400 m víztükör szélességgel számolhatunk, ami állandó. Ekkora távolságon a rögzített kép pixeleinek tónusai óhatatlanul eltérnek.

A változó fényviszonyokból eredő színváltozás volt a következő leküzdendő probléma. Ez azonban nem köthető napszakhoz, mert egyazon napszakban lehet borult idő vagy éppen szikrázó napsütés is.

Mindezek alapján először a szín kérdését igyekeztem kizárni, ami szintévesztő lévén nekem amúgy sem okozott túl nagy hiátust. Ezért a vizsgálandó terület minden egyes pixelét annak vörös, zöld és kék komponenseiből számítható intenzitás átlagának megfelelő szürke árnyalatnak definiáltam át. A szürke árnyalatokra (összesen 256 db) ezután egyetlen küszöbértéket felvéve (pl. 128) már elég jól elkülöníthetővé vált a víz és a jég. Az elkülönítés eredménye egy bináris kép lett, ahol a jeget fehér míg minden mást fekete jelölt. Persze a megoldás még koránt sem volt kielégítő, mert a leirt problémákból adódóan sokat tévedett az algoritmus.

Nyári autós kirándulások alkalmával jól megfigyelhető jelenség az aszfalt tükröződése, ami alátámasztja, hogy kivétel nélkül minden tükröz legfeljebb a fény beesésének szögét kell jól megválasztani. A mi esetünkben a tükröződő felület maga a víz, mely korábbi egyszerűsítésünk szerint vízszintesnek vehető és közel állandónak. A tükröződő tereptárgyak és az ég is állandó helyet foglal el a képen, melyek a vizsgálandó vízfelületről a kameraba reflektálódnak. Éppen ezért a kamera által készített képen a tükröződés irányának megfelelő vonal mentén haladva tűnt célszerűnek megválasztani azt a változó értékű küszöbszámot, mely továbbiakban elkülöníti majd a jeget és a vizet.

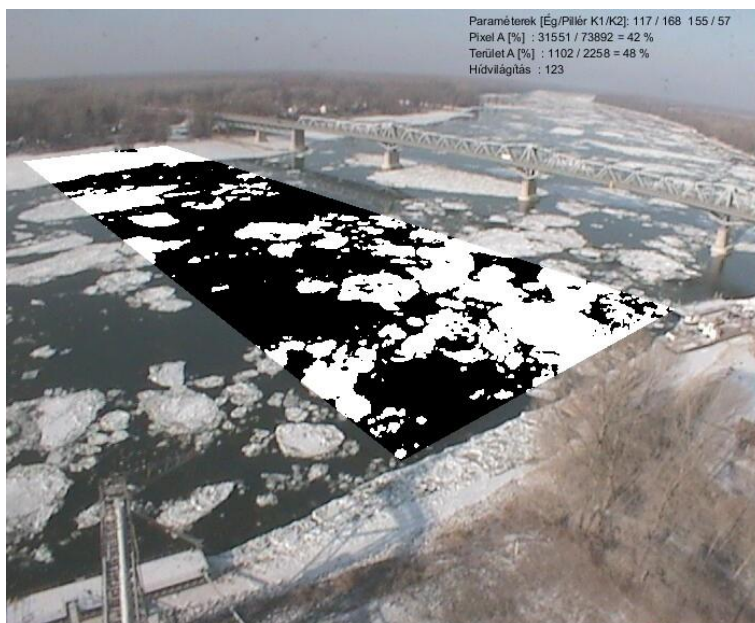
A mérnöki gyakorlatban megszámlálhatatlan esetben térünk vissza a legegyszerűbb megoldáshoz és választjuk a linearitást mint kézenfekvő módszert problémáink orvoslására. Esetünkben sem volt ez másképp. A tükröződés irányába vett szakasz mentén beállítottam egy felső és egy alsó küszöbértéket, melyet azután a vonal mentén lineárisan interpoláltam és ennek a szakasznak bármely pontjában vett merőleges egyenesen végig azonosnak vettem.

A kérdést így sikerült leegyszerűsíteni a két küszöbérték meghatározására, mely képenként változó értéket mutatott. Azt már a képfeldolgozás leelején eldöntöttem, hogy minden olyan megoldást kizárok, melyben manuálisan kell majd képenként beállítanom bármely paramétert is. Ennek oka kézenfekvő, mely a feldolgozásra váró több mint 600.000 bajai kép számából ered.

Mi lehet tehát olyan ismeret, melyet a képekből külön-külön kinyerhetünk és alapvetően befolyásolja a küszöbszámok alsó és felső korlátját. Az első ilyen adat az ég világossága, hiszen azt minden egyes képen azonos helyen található meg. A másik ilyen adat olyan parti jel, műtárgy (pl. híd) beazonosítható pontja, melynek fényessége utal a napsütés erősségére.

Több mint 100 képet dolgoztam föl és paramétereztem be a lehető legjobb eredményt adó alsó és felső küszöbértékekkel, majd pedig megjegyeztem az ég és a parti jel adatait. Példaként a 8. ábra a bajai szelvény egy ilyen beállítását mutatja be. Az ábra jobb felső sarkában Ég/Pillér fényessége jelzi a látóhatár fölötti égtónus és négy kiválasztott hídpillér fényességének átlagát. Emellett az állandónak vett tükröződési vonal mentén beállított alsó és felső jég-víz küszöbszint beállítása is kiíratásra került.

A feldolgozott képekből nyert adatok alapján összefüggést állítottam fel az alsó-felső küszöbértékek automatikus megállapításának érdekében. Sajnos az összefüggés nem volt teljesen egyértelmű, bár nagyjából követhető struktúrájú pontfelhő írta le azt. Ezért a legkisebb négyzetek módszerével kiegyenlítő függvényekkel közelítettem az ég és a part jelek tükröződésének függvényében felírható egyenleteket.



8. ábra: Bajai régi kamera jég-víz küszöbértékeinek kalibrálása

Ha nem is sikerült tökéletes megoldást találni a feladat kiszolgálására, elégedettséggel töltött el, amikor a témában segítséget nyújtó szakemberek például Dr. Túri Zoltán a Debreceni Egyetem Természetföldrajzi és Geoinformatika Tanszékének adjunktusa is elismeréssel méltatta az eredményt.

Ortorektifikálás helyett pixelenkénti területarány meghatározás

Kezdeti elképzeléseim szerint és szakirodalomban talált megoldások alapján kézenfekvőnek tűnt a webkamerák által készített képek ortorektifikálása és az új, méret illetve alakhelyes képen megállapítani a jég és a víz arányát. Ezt az eljárást a korábban ismertetettek szerint teljesen elvettem. Egyfelől azért, mert a megismert

georeferálási eljárások képmódosítási hibái tovább rontanák a végeredményt, de legfőképpen azért, mert a képtranzformációs eljárás időigénye teljesen fölösleges vesztegetése a munkára fordítandó energiáknak. A képenkénti tranzformáció ugyanis mindig azonos eljárás ismétlése, amit egyetlen egyszer is elegendő elvégezni, ha módosítjuk a feldolgozási folyamatot. Az új eljárásrendben a képek ismert tranzformációja alapján az általunk feldolgozásra kiválasztott terület minden egyes pixelére meghatározható, hogy milyen arányban járul hozzá a teljes terület lefedéséhez. Az így kapott pixelenkénti értékeket azok pontos képkoordinátaival (u, v) indexelt mátrixban is elhelyezhetjük. Ezzel a megoldással egy olyan mátrixot kapunk, melyben a webkamera által rögzített kép megfigyelt területének (u, v) pixel koordinátái alapján, melyek egyben a mátrixunk sorait és oszlopait is jelölik, adottá válik a kérdéses pixel valós területével arányos szám. Azért írtam arányos jelzőt, mert a valós területet nem feltétlenül ismerjük, hiszen a síklapos megoldásunk csupán a vízfelülettel párhuzamos síkban történő átváltásokat teszi lehetővé. Ez azonban bőségesen elegendő számunkra, hiszen a jég és a vízfelület aránya nem változik meg a kép kicsinyítésével vagy nagyításával. Bár azt is megjegyzem, hogy a valós területre való áttérést is megtehetjük, ha a megfigyelendő terület sarokpontjainak valós koordinátáit ismerjük, amiből annak pontos területe kiszámítható. A teljes terület és a pixelek ahhoz viszonyított arányának ismeretében pedig kézen fekvő, hogy minden egyes pixelhez valós méreteket párosítsunk. Ami miatt ezt mégsem tettem, az egy újabb korrekció kiküszöbölése volt. Ugyanis a Duna vizsgált szakaszán a vízjáték megközelíti a 10 m-t, ebből következőleg a csónakos mérésünk csak a vízjátékon belüli egyetlen vízálláshoz rendelt felülethez szolgáltat hiteles eredményt. Ha minden vízálláshoz ki kívánjuk számolni a vizsgált terület valódi nagyságát, úgy a vízállást is figyelembe kell vennünk. A kitűzött cél szempontjából (jégfedettség százalékos értéke) ez nem kívánalom. Amennyiben a jövőben pontos jégfelületet vagy sebességet kívánunk meghatározni (pl. precíz jéghozam számításához), úgy ezzel a korrekcióval is fejlesztenünk kell az eljárásrendet.

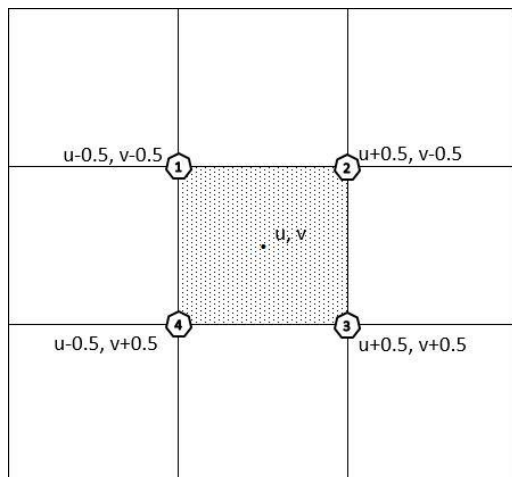
Gálai (2008b) cikkében kifejti azt a frappáns megoldását, hogy az u, v sík és az x, y sík közötti átszámítás és területmeghatározás vagyis integrálás így is felírható:

$$\iint f(x, y) dx dy = \iint f(u, v) J[u, v] du dv$$

Ahol $J[u, v]$ Jakobi determinánst jelöl az u, v pixelkoordinátán. Gálai javaslata szerint a determináns elemeinek analitikusan levezetett felírásával és az ismert változók abba való behelyettesítésével a megoldás minden egyes pixelre előre kiszámítható.

$$J[u, v] = \begin{vmatrix} \frac{du}{dx} & \frac{du}{dy} \\ \frac{dv}{dx} & \frac{dv}{dy} \end{vmatrix}$$

Ez teljes mértékben így is van és ez az eljárás valóban elegáns módja a feladat matematikai leírásának. A mérnöki gyakorlat sajnos csak a legritkább esetben hoz ennyire szép és elegáns megoldásokat. Bevallom esetünkben sem volt ez másként, ugyanis a képtranzformációs eljárásunk során alkalmazott átszámító függvényeink deriválása csak akkor elementáris, ha a hordótorzítást nem vennénk figyelembe. Márpedig a korábban ismertetett disztorziós javítás (D_x, D_y) az átszámító függvényeink oly mértékű megváltoztatását okozták, ami ezen függvények analitikus geometriai, lineáris algebrai lépésekkel, elemi úton levezethető deriválását lehetetlenné tették. Gálai által javasolt eljáráshoz az ismert szimbólumfeldolgozó szoftverek (pl. MATLAB) alkalmazások sem vezettek eredményre. Így maradt a numerikus megoldás, ami beláthatóan igen megbonyolítaná a pixelenkénti számítások feldolgozási igényét, akkor is, ha ezt a feldolgozást webkameránként elegendő egyszer elvégezni (természetesen pixelenként).



9. ábra: Pixelenkénti területmeghatározáshoz használt sarokponti koordináták

Egy-egy pixel transzformált méretének meghatározására olyan megoldást kellett keresnem, mely elegendően pontos a további számításokhoz és kellően egyszerű is ahhoz, hogy bonyolult algoritmusok nélkül is használható legyen. A következő ötlettel álltam elő: Az u, v koordinátával adott pixel valós x, y koordinátába való átszámítására már használható megoldást találtam. De egy eddig pontként kezelt pixel felfogható négyzetként, mely megfelelő nagyítás mellett láthatóan az is. A négyzetnek viszont van síkbeli kiterjedése, azaz felülete, mely kiszámítható sarokpontjainak ismeretében. Az ötlet bármennyire triviális is, eddigi kutatásaim során mégsem talákoztam vele, hogy jégfedettség számításánál használták volna.

Itt azzal közelítéssel éltem, hogy a négyszögek oldalai egyenesek maradnak az (u, v) -ből (x, y) -ba való transzformáció során. Ez a kis képpontok (pixelek) esetében teljesül is.

Minden egyes megfigyelésre kiválasztott pixel sarokpontjait kiszámíthatjuk a 9. ábrán látható 4 sarokponti koordináta felhasználásával. A sarokpontokat a bal felső saroktól kiindulva az óramutató járásával egyező irányban haladva 1-4-ig sorszámoztam. A sorszámok felhasználásával, melyeket a továbbiakban a kiszámított valós x, y koordináták indexeként (i) használok a következő összefüggéssel kiszámítottam minden egyes megfigyelni kívánt pixel valóságos területét.

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^5 (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i), \text{ ahol } (x_1; y_1) = (x_5; y_5)$$

Az így kiszámolt területeket a pixelek u, v koordinátaival indexelt mátrixban helyeztem el, mely az éppen vizsgálatba vont területen mozogva azonnal szolgáltatja majd a kérdéses pixel valós területét.

Jégfelület és vízfelület arányának meghatározása, rögzítése

Az eddigi lépéseket összevonva nincs más hátra, mint egy olyan program megírása, mely mindezt el is végzi számunkra. Eddigi pályafutásom során szinte minden feladatot képes voltam basic programozási nyelven megírt egyszerűbb alkalmazásokkal megoldani. Hiszen ezt a nyelvet használja a legtöbb makró vagy script az általam eddig kezelt felhasználói programokban (Excel, Surfer, AutoCad, ArcMap, stb.). Bár tanáraim többször figyelmeztettek az algoritmusok, minél egyszerűbb és a lehető legkevesebb lépést igénylő megírására, a számítástechnika gyors fejlődése sosem igazolta jóslatukat. Jóslatukban arra figyelmeztettek, hogy lesz majd olyan eset, melyben szükségem lesz erre a tudásra. Most először talákoztam a lassúság kérdéskörével bár nem pontosan a jóslatnak megfelelően. Ugyanis a Visual Basicben megírt programom futási idejével számolva 20 napot igényelt volna csak a bajai webkamera 607.223 képének feldolgozása. Dr. Gálai Antal javaslatára megismerkedtem a Processing (PROCESSING, 2018) programozási nyelvel, mely valóban gyorsnak bizonyult és tized annyi idő alatt elvégezte a feladatot.

Az új programozási nyelven megírt alkalmazás a kép kijelölt részterületén belül minden egyes pixelt megvizsgált. A pixelek u, v képpontjainak megfelelő és az adott kép paramétereinek felhasználásával számított küszöbértékhez hasonlított szürke árnyalat alapján eldönthetővé vált a jég és a víz elválasztása. Egyetlen ciklusban elvégezve ezt az ellenőrzést a jeges és nem jeges pixelek (korábban kiszámított) valós területeinek összegzésével megállapítható volt a valós jégfedettség százalékban kifejezve. Annak érdekében, hogy ez az érték összehasonlíthatóvá váljon a perspektív kép alapján számított fedettségi értékkel utóbbit is számítottam a pixelek számából. Egy ilyen feldolgozott képet mutat be a 10. ábra, melynek jobb felső sarkában a paraméterek és a számítási eredmények is jól láthatók.

A programozás során több, a Processing nyelv által kínált szintér komponens is kipróbáltam (saturation, brightness, hue, stb.), de nem hoztak jobb eredményt az RGB szintérből szürkeárnyalatba való áttérésnél. A webkamerák képe a látható fény tartományában (320-700 nm) készült, ezért spektrális tartalma gyöngye. Így más, például műholdképek elemzésénél használható képfeldolgozási eljárások nem jöhettek szóba.

Már a korábbi elemzések során, mikor a webkamerák felvételeiből készített filmeket tekintettem át feltűnt a szelvényen belüli jégzajlási struktúrák időbeli változékonysága. A zajlás szelvényen belüli átrendeződése többször előfordult, azaz nagyjából azonos fedettség mellett hol a jobb, hol pedig a bal part közelében vonultak el a táblák. Csupán a teljes szelvény fedettségének kiszámításával ennek a jelenségnek a elemzhetősége elmaradna. Annak érdekében, hogy ez a kérdés is vizsgálhatóvá váljon a megfigyelt szelvényt a sodorvonalra merőleges irányban 40 részre osztottam. A szám tetszőleges, de a nagyjából 400 m széles folyamatot így közel 10 m-es sávokra daraboltam. A felosztást követően ellenőriztem, hogy az így kapott részterületek pixeleiből számított területek azonosak-e. A részterületek (sávok) mérete kevesebb mint 1%-os hibahatáron belül teljesen megegyezett, amit elfogadtam. Az így kialakított sávokon belül is meghatároztam a jégfedettség értékeket, mely azt is segít kimutatni, hogy a felvétel időpillanatában a szelvény melyik részén volt jég.

A 10. kép rámutat egy hibajelenségre is, jelesül a vizsgálatba vont területbe belógó faágak jégként való felismerésére. Ez következetesen, mindig a kamerához közeli oldalon, nem túl sűrűn előforduló probléma, melynek orvoslására szintén jó lehetőséget ad az imént ismertetett sávozás. Ugyanakkor azt is megvizsgáltam,

hogy mekkora mértékben járul hozzá egy-egy ilyen eset a jégfedettséghez. A 10. képen látható, jégnek számított faágak a teljes vizsgált terület kevesebb mint 0,2%-át alkotják, ami elenyésző mennyiség.



10. ábra: Vizsgált szelvény 40 egyenlő részre osztásának ábrája

A kapott eredményeket szöveges file-ban és képen is megőriztem a későbbi feldolgozás érdekében. Bármennyire kecsesítő eredményeket sikerült is elérnem a számított értékek további elemzése előtt fontos igazolni azok helyességét. A következőkben a feldolgozási folyamat végén eredményül kapott értékek hibaelemzését tűztem ki célul.

HIBASZÁMÍTÁS ÉS AZ ELJÁRÁS IGAZOLÁSA

Akár mennyire is jónak tűnt az eddigi megoldás valamilyen egyértelmű és jól számszerűsíthető ellenőrzésre, igazolásra szükség volt, ami alátámasztja vagy éppen megcáfolja az eredményeket. A jól paraméterezett programom legnagyobb hibája abból adódik, hogy a vékony tükörjeget nem képes megkülönböztetni a víztől. Ez azt jelenti, hogy a jégen átlátszó vízfelület és a valódi vízfelület között oly csekély különbség mutatkozik, amit az automatizált eljárásom felismerni már nem képes. Ez a probléma vastag jég és jégre hullott hó esetén egyáltalán nem áll fenn. Akad azért más probléma is, hiszen a túlzottan kisimult vízfelület tükröződése is megtévesztheti algoritmusomat, amint ez történt is. Ezen jelenségekből következően az automatizált eljárás a valós érték alá éppúgy tévedhet mint fölé. Szükség volt tehát egy független kiértékelésre, mellyel összehasonlíthatóak eredményeim.

A cél érdekében az általam vezetett, régi professzoromról, Dr. Zsuffa Istvánról elnevezett szakkollégium (ZSISZK) hallgatóihoz fordultam. A hallgatók mindegyike felsőfokú műszaki képzésben tanul és jártas az AutoCAD használatában. Megkértem őket, hogy a 2017. évi Dunai jégzajlás bajai webkamera által rögzített képeiből kiválasztott 31 darab feldolgozását manuálisan végezzék el. Az ortorektifikációs eljárást már igazoltan tekintetem, ezért szükségtelen volt ezzel is nehezíteni az amúgy is meglehetősen sziszifuszi munkájukat. Így a feldolgozás az eredeti, perspektív képen a jég és a víz minél precízebb megkülönböztetésére korlátozódott

Túl ezen 33 diákat megkértem, hogy a kiválasztott 31 képre adjon becslést szemrevételezés alapján. Természetesen az időszakra hivatalosan bejegyzett gátőri becsléssel megadott vízrajzi adatokat is kigyűjtöttem.

Mindezek alapján lehetőségessé vált az általam automatizált eljárásból kapott jégfedettségi adatok ellenőrzése, hibájának számítása. Továbbá összehasonlíthattam a becslési hibákkal is, valamint megállapíthatóvá vált az alkalmazhatóság kérdése is.

Kézzel és géppel feldolgozott jégfedettségi adatok eltérése

A hallgatók által kézi módszerrel feldolgozott képekből származó jégfedettségi eredmények jelentős eltérést mutattak automatizált eljárásomtól. Ez a tény eddigi munkám eredményét vonta kétségbe. Márpedig a pusztán a jégfedettségi értékek összehasonlításából következő eredmények nem igazolták vissza az automatizált eljárás sikerét.

Kutatásom legelejétől gondot fordítottam arra, hogy a részeredményeket is dokumentáljam minden egyes feldolgozási folyamatnál, így volt ez most is. Az AutoCAD-es feldolgozás úgy zajlott, hogy az eredeti perspektív képek feldolgozási területét is magában foglaló képrészletén kellett pirosra satírozni a jéggel fedett részeket. A satírozást úgy végezték, hogy zárt poligonokkal rajzolták körbe az összefüggő jégtáblákat, majd pedig ezen

területeket automatikusan beszínezték. A színezést az AutoCAD-ből BMP kiterjesztésbe való mentés során olykor elfelejtette a gép, mely jelenség okára eddig nem sikerült fényt deríteni. Megismételt mentésnél ez a hiba kiküszöbölhető volt, de körültekintést igényelt a művelet. Ezt követően az általam megírt Processing programcskának már könnyű dolga volt, hiszen csupán a piros pixeleket kellett kigyűjtenie a vizsgált területen. Ez lényegesen egyszerűbb és pontosabban végrehajtható feladat, mint a jég automatikus megtalálása, hiszen a piros szín sehol máshol nem fordult elő az eredeti képen. A jégfedettség meghatározásának többi lépése a korábban leírtak szerint folytatódott, így a pirosított felületekből is fekete-fehér bináris képrészlet született. Az eredeti és kézi feldolgozásból binárisra tett kép gyors váltakoztatásával egyszerű szemrevételezéssel ellenőrizhető volt a pontosság. Nem elvethető ez a módszer, hiszen a jég felismerését éppúgy szemmel végezték a hallgatók.

A képek ellenőrzésével arra a megállapításra jutottam, hogy a feldolgozó csapat tagjai különböző lelkiismeretességgel végezték a feladatot. Nagyon kevesen oldották meg a feladatot olyan precízen, amit a hibaelemzés megkívánt volna. A legtöbben alaposan elnagyolták a munkát. Ez azt jelenti, hogy a nagyobb foltokat egybefüggően vettek számításba és a jégtáblák közötti vízfelületekkel nem foglalkoztak. Ez a jégfedettség jelentős túlbecsléséhez vezetett. Megint máskor a szelvény területén teljesen egyenlőtlenül szóródó sok apró jégtáblát hagyták figyelmen kívül, nyilván aránytalanul több időbe telt volna ezek mindegyikének bepirosítása.

Ezen felismerés birtokában új megoldást kellett találnom a hibaelemzésre, mely az emberi hibákat a lehető legjobban kikerüli. Ugyanakkor rendkívül tanulságos is volt ez az eljárás, hiszen a jövő mérnökeire bízom a feladatot, jelesen azokra a leendő kollegákra, akik a különböző vízügyi igazgatóságokon éppen ilyen jellegű feladatokat kaphatnak majd. Mármost a feltárt hibák arra a következtetésre vezettek, hogy a ma mérnökeinek ilyen időigényes és precíziós feladatot adni elég botor dolog, mert az eredmény éppoly bizonytalan lesz, mint a becslésből kapott adatok. Szeretném kihangsúlyozni, hogy ez nem feltétlenül a fiatal hallgatók hibája. Bármennyire közhely is, de rohanó világunkban a túlzott időigénnyel és csekély eredménnyel járó feladatok végrehajtásánál pontosan ez várható.

Felismerve, hogy programom a tükörjég esetében alábecsül, ugyanekkor a táblák közötti vízfelületet elhanyagoló manuális feldolgozás jelentősen túlbecsül nem is folytattam tovább a hibaelemzés ezen módját.

Egyedileg kalibrált képek felhasználása a hibaelemzéshez

Az előzőekben tett megállapítás miatt a vizsgálatra kiválasztott 31 kép mindegyikét egyedi elemzés alá vettem és a lehető legprecízebb paraméterezéssel addig igazítottam, mígnem a legtokéletesebb egyezésre nem jutottam a jégtáblák felismerését illetően. A módszer azért is elfogadható, mert az automatizált programom ilyen jellegű paraméterezését sosem végzem képenként. A jég-víz küszöbérték meghatározása is automata módon történik, persze ehhez egy a hibaelemzésnél használttól független, jelentősebb mennyiségű képsorozat tapasztalatait használtam föl.

Ily módon előállt egy egyedileg képenként kalibrált jégfedettségi adatsor, mely immár összehasonlíthatóvá vált a kézi feldolgozás, becslő eljárások és végül a teljesen automata eljárással. Azt is meg kell jegyeznem, hogy a képenként kalibrált adatsor is hibával terhelt, de az nagyságrendekkel kisebb, mint bármely más eddigi megoldásé. Ezt ugyancsak a képek gyors váltakoztatásával ellenőriztem.

Különböző eljárások hibáinak összehasonlítása

A hibaszámítást azonos módon minden egyes (31 elemből álló) adatsorra elvégeztem. Elsőként egy, a teljes adatsorra jellemző, hibajellemzőt számítottam ki és csak azt követően tértem át a részletesebb vizsgálatra. Ez a jellemző pedig a négyzetes középhiba, RMSE (Root-Mean-Square Error) volt.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}{N}}$$

ahol

N – a hibaszámításnál alkalmazott elemszám esetünkben 31

x_i – az általam egyedileg kalibrált i-ik kép helyesnek ítélt jégfedettsége [%]

y_i – a különböző eljárásokból nyert i-ik kép jégfedettsége [%]

Az alábbi táblázat az így kiszámított hibákat tartalmazza:

1. táblázat: Jégfedettség meghatározási eljárások hibája

Eljárás:	ADUVIZIG	Becslők 1.	Becslők 2.	ZSISZK	Automata
RMSE:	13,15 %	9,03 %	9,59 %	10,18 %	5,94 %

Az egyes oszlopokhoz a következő magyarázat tartozik:

ADUVIZIG: A vízrajzi szolgálatnál nyilvántartásban szereplő hivatalos jégfedettségi adatok idősora.

Becslők 1.: Azon 22 diák becsléseinek átlagából készített idősor, akik csupán egyetlen egyszer láthatták a perspektív képeket és így szolgáltatott adatot.

Becslők 2.: Azon 11 ZSISZK-es diák becsléseinek átlaga, akik az AutoCAD-es feldolgozásukat követően minden képre véleményt mondtak.

ZSISZK: Az AutoCAD-es manuális feldolgozás eredménye.

Automata: Független képeken verifikált automata eljárásból kapott adatsor.

Roppant érdekes rangsor született az RMS eredmények alapján. Torony magasan vitte el az első helyet automata eljárásom, a következő három helyen a diákok megoldásai jöttek és a hivatalos adatok a rangsor végére kerültek. Az is meglepő, hogy a manuális feldolgozásnál jobban becsültek a diákok, sőt a manuális feldolgozást egyáltalán nem végzők becsültek jobban. Ezek szerint úgy tűnhet, hogy nem vezet jobb eredményre a manuális feldolgozás során szerzett tapasztalat.

Ha azonban részletesebben vizsgáljuk a hibákat rájövünk, hogy egyik megoldás sem tökéletes és a hibák ± 500 %-os sávban bárhol előfordulhatnak. Arra mégis kíváncsi voltam, hogy melyik módszer hányszor volt a jó megoldás ± 5 %-os közelségében. Megnyugtató eredmény jött ki, hiszen automatizált megoldásom a 31 esetből 22 alkalommal ilyen pontosságú megoldást adott. Amikor viszont tévesztett azt oly mértékben tette, ami feltehetően a feldolgozott képen is detektálhatóvá válik majd.

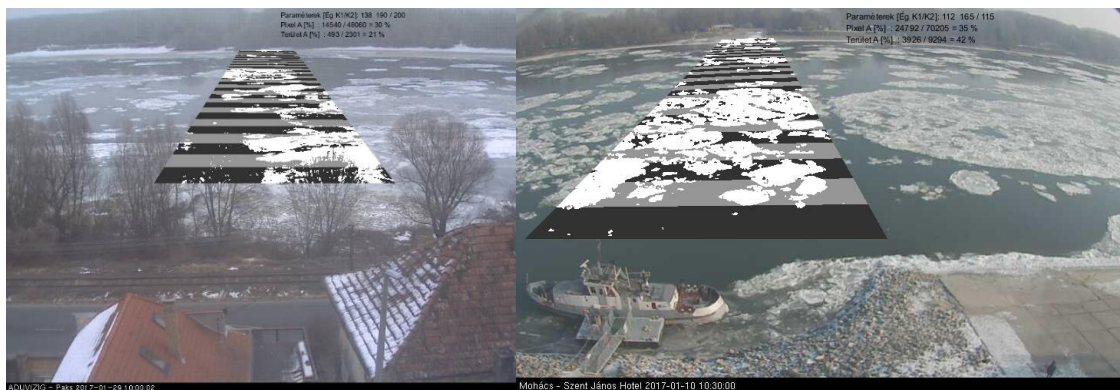
A ZSISZK egyetlen egyszer találta el tökéletesen a jó értéket és az esetek 84 %-ban fölé becsülte a jégfedettséget.

A tapasztalattal rendelkező „Becslők 2.” kétszer is tökéletes eredményt adott és többször volt közelebb a jó megoldásokhoz, mint a többiek, de pár erősen túlzó becslésük elrontotta az összképet.

A hibaanalízis eredményeként elfogadható pontosságúnak ítélem meg automatizált eljárásomat, azzal a fenntartással, hogy az emberi ellenőrzés még nem kiküszöbölhető. Ez az ellenőrzés azonban könnyen elvégezhető, legalább a kérdéses esetekben a képfeldolgozás során legyártott jégfedettségi ábrák és az eredeti képek összehasonlításával.

WEBKAMERÁK KÉPÉBŐL SZÁRMAZÓ JÉGFEDETTSÉGI IDŐSOROK ELŐÁLLÍTÁSA

Mind ezek után a webkamerák képeit az egyes teleknek megfelelő könyvtárakba rendeztem és beszédes filenévvel láttam el. A név első két karaktere a kamera helyére utal, amit egy-egy aláhúzás választ el a kép készítésének dátumától (8 karakter) és idejétől (6 karakter). Például a „BR_20170205_080000.jpg” nevű kép Baján a Régi kamerával készült 2017. február 5-én reggel 8:00:00-kor.



11. ábra: Paksi és Mohácsi jégfedettségi kiértékelés ábrája 2017 januárjában

Feldolgozó programom az egy könyvtárba rendezett képekből elkészítette a kiértékelte képet, melyeket „_J” filenév toldalékkal látott el. Így egy egyszerű képnézegető szoftverrel is a név szerint sorbarendezett képek ellenőrizhetővé és gyorsan áttekinthetővé váltak. Mindemellett egy szöveges file-ban is rögzítettem az eredményeket, melyben soronként írtam ki a következőket: Kép neve, az adott kép feldolgozásához használt 4 paraméter (pl. ÉG, Pillér, K1/K2), melyeket a számított adatok követtek:

Px[%] a lehatárolt területen lévő jeges pixelek aránya

A[%] a lehatárolt területen lévő jég/víz valós aránya

A₁%-A₄₀% a lehatárolt sávokban lévő jég/víz valós aránya

A szemléletesség kedvéért a bajai régi kamera képén berajzolt 40 db sávot a korábban közölt 18. ábra mutatja be. A zajlás térbeli folyamatainak megismerése és az eljárás általános felhasználhatóságának bizonyítékául a

korábban ismertetett korlátozások miatt a Bajain kívül csupán a paksi és mohácsi webkamerás felvételek (11. ábra) kiértékelésre kerülhetett sor.

Végeredményben a kamerák különböző sűrűséggel felvett fényképeinek mennyisége és a feldolgozott, jeges időszakokat tartalmazó évek összefoglalása a 2. táblázatban látható:

2. táblázat: Webkamerák által felvett jeges képek száma

Dunai szelvény	Paks	Baja	Mohács
Időszak	2008-2018	2004-2018	2008-2018
Feldolgozott képmennyiség	65.858 db	607.223 db	48.568 db

WEBKAMERÁK KÉPEIBŐL NYERT JÉGFEDETTSÉGI ADATOK ELEMZÉSE

Az előzőek alapján előállított jégfedettségi idősorok részletes feldolgozása és annak elmélyült elemzése elegendő feladatot ad az elkövetkezendő időszakra is. Azonban dolgozatom terjedelmi korlátaira tekintettel jelen fejezetben igyekeztem a legfontosabb kérdések tisztázására korlátozódni. A jégzajlás törvényszerűségeit Armin Schoklitsch 1930-ban megjelent azóta is sokszor idézett, a Der Wasserbau művében matematikai alakban is kifejtette. Schoklitsch nyomán Lászlóffy Woldemár - aki doktori értekezését (1934) is a Magyar Duna-szakasz jégviszonyaiból írta - 1947-ben a Hidrológiai Közöny hasábjain közölt „A jeges árvizekről” című cikkében kifejezetten a hazai folyami jégviszonyokról szóló, azóta is alapnak tekintett törvényszerűségeket közölte.

Mielőtt a zajló Duna jégfedettségi adatainak vizsgálatába kezdenénk, nagyon fontos tisztázni, hogy a folyami jégzajlás nagyon különböző típusú lehet. Legkiemelkedőbb különbség a jégdugók, torlaszok felszakadásából meginduló zajlás (a Tisza 2017-ben) és az úgynevezett „szelíd” jégmegállást megelőző zajlás (a Duna hazai szakasza 2017-ben). Utóbbival, azaz a jégképződésből kialakuló zajlással foglalkoztam csak, hiszen erre vonatkozó adatok állnak rendelkezésemre.

Schoklitsch (1930) szerint folyamatos jégzajlás esetén egy folyószakaszon a szelvények szélességének (B) az ott észlelhető felszíni sebességeloszlás átlagának (v) és a jégfedettségnek (n) szorzata állandó, amit két tetszőleges (1 és 2) szelvényre felírva a következő képlet fejez ki:

$$n_1 v_1 B_1 = n_2 v_2 B_2$$

Ez a folytonossági egyenlet elméletileg teljesen helyes és nyilvánvaló, de személyes gyakorlati tapasztalataim nem minden esetben igazolták. A jégfedettség változékonysága, mint látni fogjuk még a megvizsgált -Duna teljes hosszához képest elenyésző- folyószakaszon is olyan mérvű, ami a fenti képlet általános használhatóságát nem támasztja alá. A területhozam (jégfedettség) helyett a térfogathozam (jég hozam) állandósága kétség kívül precízebben jellemezné a folytonosság tényét. Bár a jég esetében a hízás és olvadás jelensége még ezt a tézist is további finomítás irányába kényszeríti.

Adatok előfeldolgozása

A kamerák beállításából adódóan átlagosan félpercenként sikerült képeket nyerni és így a jégfedettség értékét is ilyen sűrűséggel megállapítani. Az automatizált eljárásom minden előnye mellett is olykor hibásan detektál, amit mindenféleképpen ellenőrizni kell. Ez az ellenőrzés gyorsan elvégezhető a képek átlapozásával. Bármely jól kezelhető képnézegető szoftver alkalmas az eredeti és feldolgozott képek egymás utáni gyors léptetésére, mely alatt szemmel azonnal megállapítható a hibás kép. Amint azt korábban leírtam a hiba alapvetően kétféle lehet. Egyfelől visszatükrözésből ott is jeget jelez, ahol nincs. Másfelől tükörjeget víznek érzékel a program. Mindkettő azonnal feltűnik, még a témában tapasztalatlan felhasználónak is. Kissé időigényes hosszabb időszakok adatát így átnézni, de egy folyamatos monitoring esetén a naponta rutinszerűen elvégezhető feladat nem túlzottan megterhelő. A hibásnak ítélt intervallumokat egyszerűen töröltem az elkészített idősorból. Ezzel adathiányt idéztem elő, de a hibás adatokkal a továbbiakban nem számoltam.

Az előfeldolgozás második lépése is lényeges, melyről eddig csak érintőlegesen esett szó. Itt jön elő a szelvény 40 egyenlő szakaszra osztásának egyik előnye. A vizsgálatba vont szelvényeken úgy választottam ki az értékelendő teljes területet, hogy az a lehető legszéleskörűbb alkalmazást lehetővé tegye. Ez azt jelenti, hogy az alacsony és magas vízállások alkalmával is használható legyen. Ez az általános elképzelés azt eredményezte, hogy alacsony vízállásokkor a kiválasztott elemzésbe vont terület egy része (pl. zátonyoknál) szárazra kerül. Éppen ezért a 40 egyenlő részterületre osztott felületen minden napra meg kell határozni, hogy milyen sorszámúak vehetők figyelembe a fedettség megállapításánál. Ha nagyon precíznek szeretnénk lenni a zajló és már beállt területeket is elkülöníthetjük ezzel a módszerrel. Ezért a szelvények teljesen más célból kidolgozott és bevezetett „függélyezése” komoly előnnyel járt.

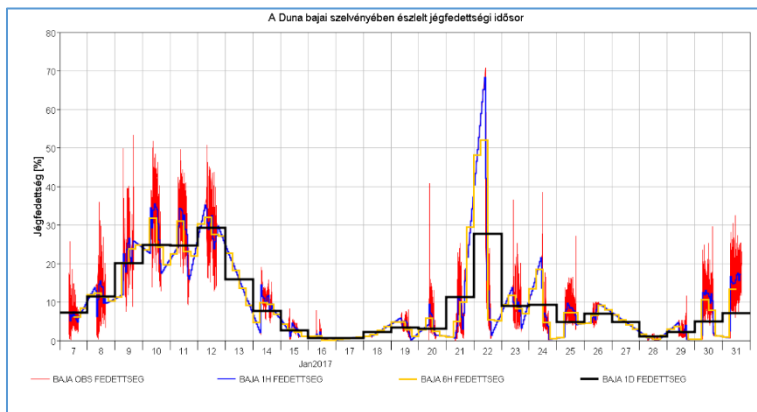
Az előfeldolgozással javított idősorom immár alkalmassá vált a legfontosabb vizsgálatok elvégzésére, melyek az adott szelvényen belüli és a szelvények közötti változások detektálása képez. A jövőben több más vizsgálat is elvégezhető, de számomra ezek voltak a legfontosabbak.

Jégjelenségek időbeli változékonysága a vizsgált szelvényekben

Az immár mindenféle szűrőn átesett dunai jégfedettség adatokat (Paks, Baja, Mohács) a HEC-DSSvue (2018) szabad felhasználású adatsor kezelő szoftver segítségével feldolgoztam. A feldolgozások kiértékelő ábrái közül kettőt mutatok be (12. és 13. ábra), melyek az időbeli változékonyságot egyértelműen jól jellemzik.

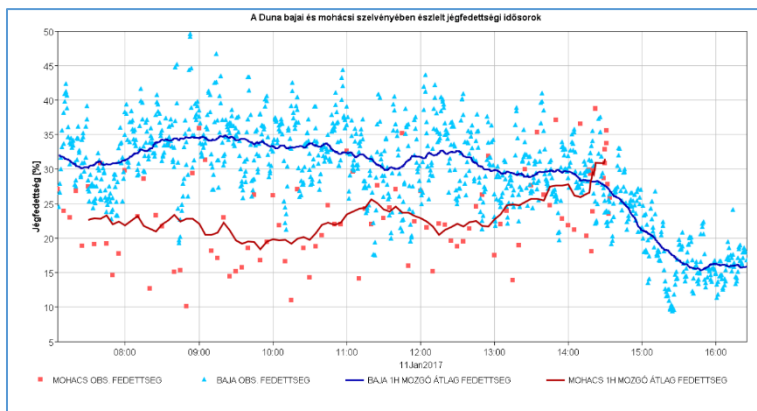
A 12. ábrán jól látható, hogy a pillanatnyi (piros) észlelésekből alkotott idősor rendkívül nagy zaj terheli, ami időátlagolt, hosszabbtávú megfigyelést indokol. A különböző hosszúságú (1h, 2h, 1d) időátlagolt értékek már elég jól csillapítják ezt a zajt és a zajlás időbeli struktúrájának megértéséhez szemléletesebb képet alkotnak. A webkamerás mérések (piros) csak a nappali órákra adnak eredményt, az éjszakák során a menetgörbét lineáris interpolációval közelíttem.

Kiválasztva egy jól értékelhető napot (2017.01.11.) a teljes periódusból a 13. ábrát rajzoltam meg, melyen Baja (kék) és Mohács (piros) városokban kihelyezett webkameráim észleléséből származó fedettségeket jelölőkkel szemléltettem. A rövidebb időlépték miatt megfelelően nagyítható ábrán még szemléletesebb a pillanatnyi jégfedettség szórása. Baja esetében 30 másodpercenként, míg Mohácson 5 percenként álltak rendelkezésemre az adatok. Ebben az esetben 1 órás mozgó átlagokat számítottam, melyeket azonos szín sötétebb árnyalatával és folytonos vonallal rajzoltam meg. Jól látszik, hogy alkalmas mozgó átlaggal eliminálható a szórás.



1. ábra: Jégfedettség menetgörbéje a Duna bajai szelvényének 2017. januári, háromhetes jégzajlása idején. Jelmagyarázat: a jégmegfigyelő kamera perces képeiből kiszámított (piros), 1 órás átlagolt (kék), 6 órás átlagolt (narancs) és végül napi átlagolt (fekete) idősorok.

Ekkor már az idősor trigonometrikus komponenseire utaló formák is megjelennek, ami a periodicitás jele. Ezt a jelenséget a több időszakban is tapasztaltam, de pontos elemzését nem végeztem el. Az mindenesetre igazolható a kiválasztott ábrákkal is, hogy a jégzajlást több komponensű periódus is jellemezheti.



2. ábra: Duna bajai és mohácsi szelvényének 2017. január 11-én észlelt (kék/piros jelölő) és 1 órás (kék/piros vonal) mozgó átlagolt jégfedettség idősorai

Az időbeli strukturáltság és az ebből nyerhető információk további feldolgozása egy másik kutatás tárgya lesz. Most itt be kell érünk a ténnyel, hogy a jelenség napi egy, esetleg kettő szemrevételezés alapján becsléssel való jellemzése teljesen elfogadhatatlan. A webkamerás jégészlelés eljárásrendjébe be kell építeni egy a vízsebesség mérésénél már ismert megfigyelési időintervallumot, mely időátlagolt eredményével már jól közelíti a szelvényre jellemző fedettségi értékeket.

Jégjelenségek térbeli változékonysága a vizsgált szelvényekben

Lászlóffy 1947-es cikkében a jégtáblák tehetetlensége kapcsán kifejti, hogy azok nem feltétlenül a sodorvonalat követik és így könnyedén megakadnak a domború partok zátonyos területein, ami azután torlódáshoz, szelvénytűkülethez és torlasz képződéséhez vezet. A kamerák képeiből nyert információk itt is

cizelláltabb leírást sejtetnek, mint helyes megoldás. Az, hogy a zajló jégablak a szelvényen belül hol helyezkednek el sok tényező eredőjeként értelmezhetők. Ezek közül a zajlás mértékét és a szelet emelném ki elsősorban, de a csavaráramlások szerepe sem elhanyagolható. A szél még komolyabb zajlás esetén is képes valamelyik parthoz szorítani a jéget függetlenül a kanyarlati viszonyoktól. Ezt a jelenséget többször megfigyelhettem a vizsgálatba vont teljes szakaszon. Szélmentes időben, ha a zajlás mértéke nem haladja meg a nagyjából 20 %-ot a jégablak elég jól követik a sodorvonal menetét. Ennél nagyobb zajlás esetén és az összeállt jégablak méretének növekedésével Lászlóffy-féle leírás teljesen helytálló.

Az is megfigyelhető, hogy a jégablak nem túlzottan részesítik előnyben a szelvény közepén való mozgást leginkább a partokhoz vonzódnak. Ez csupán a vizsgált szelvények sávozásából átlagolt fedettség adatokból származó következtetés, de nyilván alaposabb vizsgálatot érdemelne.

Schoklitsch (1930) által felírt jégfedettségi folytonossági egyenlet alapján Baja és Mohács között, ahol a sebesség és a szelvény szélessége közel azonosnak mondható a jégfedettségnek is egyeznie kéne. Megfigyeléseim szerint ez nem minden esetben igazolható (21. ábra), amit a fejezet elején is leírt jégablak ütközéséből származó alaktnai és egymás fedésébe kerüléséből eredő változásokkal magyarázok. Ennek bizonyításához nem elegendő a jégfedettségi adatok elemzése, mert azok helyhez kötöttek és így könnyen ráfogható, hogy az alapfeltevés igaz ugyan, de rövidebb távon kellene vizsgálni a kérdést. Mindamelllett a folyamaton végbemenő változásokat a kamera távolságából nem is lehet pontosan követni. Nem maradt más hátra a folyón kellett megvizsgálni a kérdéseket.

EREDMÉNYEK HASZNOSULÁSA

Az új eredmények hozzájárulnak a folyókon kialakuló jégzajlás tér- és időbeli struktúráinak pontosabb megismeréséhez, mérhetőségének és reprodukálhatóságának módszertani fejlesztéséhez.

Zsuffa István 1978-as úttörő jellegű, fekete-fehér ipari kamerás folyamatos jégmegfigyelő rendszerének újraélesztésével és korszerűsítésével jégfedettséget valós időben kiértékelő jégjelző szolgálat alapjait sikerült megteremteni, mely nemigen található a világban. Ez a rendszer nagyban hozzájárul a folyami jégvédekezés és a jeges árvizek megelőzésének operatív, vízügyi vízkárelhárítási tevékenységének sikerességéhez. Túl ezen megteremti a lehetőségét a jégzajlás tudományos igényű kutatásának, a numerikus modellezés in situ adatellátásnak.

A kutatás egy olyan automatizált üzemű eljárást teremt meg és igazol, amellyel a jégfedettség aránya, az egységnyi szélességre jutó jégfelület-hozam keresztirányú megoszlása egymást követő folyószelvényekben folyamatosan mérhető. A terepi adatsorok beszerzése komoly erőfeszítést igényel, különösen, ha jeges folyón kell méréseket végezni. A videofelvétel biztonságos, de a jégtér-fogat-áram számításához elengedhetetlen vastagságméréseket már a zajló folyón kell végezni. Ehhez olyan mérőeszközt alakítottam ki és igazoltam, mely a jégtörő hajókon egyszerű és gyors méréseket tesz lehetővé. Ez az eredmény rendkívül értékes, mert a jégterület-arány keresztirányú eloszlásának sűrű időközű idősoraiból további elemzések végezhetőek.

Munkám alapot teremt a hazai jégmegfigyelő hálózat korszerű kiépítéséhez. Egy ilyen hálózat üzemelése pedig megadja annak a feltételét, hogy a jövőben a nagyobb folyóinkon jégelőrejelző és riasztó rendszer létesülhessen. Az elmúlt évtizedek során gyűjtött idősorok pedig adattal látják el a folyami jégjelenségek hazai kutatását.

IRODALOMJEGYZÉK

Beltaos, S. (1982). „River ice jams: Theory, case studies and applications”. Journal of Hydraulics Division. National Water Research Institute, Canada.

Bourgault, D. (2008). „Shore-based photogrammetry of river ice”. Canadian Journal of Civil Engineering, 35(1), 80-86.

Bódis K. (1999). „Geometriai transzformációk, transzformációs egyenletek és alkalmazásuk a geoinformatikában”. Szakdolgozat, Juhász Gyula Tanárképző Főiskola, Matematika Tanszéke

Chu, T., Lindenschmidt, K. E. (2016). „Integration of space-borne and air-borne data in monitoring river ice processes in the Slave river”, Canada. Remote Sensing of Environment 181 65-81

Daigle, A., Bérubé, F., Bergeron N., Matte, P. (2013). „A methodology based on Particle image velocimetry for river ice velocity measurement”. Cold Regions Science and Technology 89 36-47

Gálai A. (2008a). „A web-kamerás folyami jégmegfigyelés alapjai” Hidrológiai Közlemények, 88. évf 5. szám (11-23. oldal)

Gálai A. (2008b). „River Ice Inspection by Webcameras,” ULR: <http://www.water.hu/ice/webcam/index.php?en> (2019.05.20.)

Horváth S. (1979). „A Duna jégviszonyai”. VITUKI Közlemények. 21. Budapest.

Kraus, K., Waldhäusl, P. (1998) „Fotogrammetria”. Alapok és általános módszerek. Tertia, Budapest.

- Kraatz, S., Khanbilvardi, R., Romanov, P.* (2016). „River ice monitoring with MODIS: Application over Lower Susquehanna River”. *Cold Regions Science and Technology* 131 116-128
- Lászlóffy W.* (1934). „A folyók jégviszonyai, különös tekintettel a Magyar Dunára”. *Vízügyi Közlemények*. 1934/3., pp. 369-435.
- Lászlóffy W.* (1947). „A jeges árvizekről”, *Hidrológiai Közlöny*. XXVII. évf. 1947. 1-4. szám. 9-17 old.
- Lindenschmidt, K. E.* (2017). „RIVICE- A Non-Proprietary, Open-Source, One-Dimensional River-Ice Model. *Water* 2017,09,314
- PROCESSING* (2018). “Processing”. <https://processing.org/> (2019.05.20.)
- Schoklitsch, A.* (1930). „Der Wasserbau”, Springer, Wien. 1930. I. kötet (ISBN-13: 978-3662427170)
- Tobak Z., van Leeuwen, B., Baksa M.* (2018) „A dunai jég monitoringja radar távérzékelési adatok alapján”. *Közlekedéstudományi Konf., Győr, 2018.március 22-23.* pp. 419-423.
- Tóth R. R.* (2017). „Jégzajlás tér-idő viselkedésének elemzése videofelvételek alapján”. *BME TDK dolgozat*
- Turcotte, B., Alfredsen, K., Beltaos, S., Burrell, B. C.* (2017). „Ice-Related Floods and Flood Delineation along Streams and Small Rivers”. *19th Workshop on the Hydraulics of Ice Covered Rivers, Conference Paper*
- Turcotte, B., Morse, B.* (2013). „A global river ice classification model”. *Journal of Hydrology* 507 134-148
- Túri Z.* (2015). „A tájszerkezet-kutatás geoinformatikai módszereinek elemzése alföldi mintaterületeken”. *Studia Geographica. Debreceni Egyetemi Kiadó, , ISBN 978-963-318-513-1*
- Zhang, F., Mosaffa, M., Chu, T., Lindenschmidt, K. E.* (2017). „Using Remote Sensing Data to Parameterize Ice Jam Modeling for a Northern Inland Delta”. *Water* 2017,9,306
- Zsuffa I.* (1978). „Hidrológiai mérések: Jégészlelés”. *Vízügyi Műszaki Segédlet, VMS 231/6-T/78.01/ G70.* 1978.