

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM
Természettudományi Kar
Földtudományok Doktori Iskola

**Villámárvizek peremfeltételeinek numerikus modellezése a
Mecsek kisvízgyűjtőinek példáján**

PhD értekezés tézisei

Hegedüs Péter

Témavezetők:

Dr. Czigány Szabolcs
egyetemi docens

Dr. Pirkhoffer Ervin
egyetemi docens

Pécs, 2014.

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

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

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

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

1. Bevezetés

Napjaink természeti katasztrófái összefüggésben állnak az éghajlati elemek módosulásával, azok szélsőségesebbé válásával. Éppen ezért azok intenzitása és az okozott károk nagysága is növekvő tendenciát mutat (BARTHOLY J. – PONGRÁCZ R. 2013) A villámárvíz egyike ezen természeti veszélyforrásoknak. A villámárvizek kialakulása komplex környezeti tényezők függvénye (GEORGAKAKOS, K.P. 1986, 2006), továbbá hidrológiai és meteorológiai feltételek együttese befolyásolja, illetve alakítja létrejöttüket. Az ilyen típusú árvizek mind gyakoribb bekövetkezése összefügg a globális klímaváltozás hatásaival, illetve a megváltozott felszínhasználati tulajdonságokkal (LE LAY, M. – SAULINER, G.M. 2007; MONTENEGRO, S. – RAGAB, R. 2012). Például az intenzív csapadékesemények bekövetkezése, amelyek sok esetben erős feláramlással kialakuló konvektív szupercellákhoz kapcsolódnak (NOVÁKY B. 2003). Míg a hagyományos árvizek esetében a levonulási idő jellemzően több nap vagy hét is lehet, addig a villámárvizek esetében ez 6 óránál kevesebb (GEORGAKAKOS, K.P. – HUDLOW, M.D. 1984; COLLIER, C.G. 2007). Mindemellett egyéb peremfeltételek is fontos szerepet játszanak az árhullám levonulásában, mint például a talajnedvesség, a talaj fizikai összetétele, a felszínborítás, illetve domborzati paraméterek. Az urbánus területek terjeszkedése, a beépített területek magas és egyre növekvő arányát eredményezi, amely szintén növeli a lefolyás arányát a beszivárgáshoz és a tározáshoz képest, valamint jelentősen csökkentheti az összegyülekezési időt is (GREGORY, K.J. 2006; SURIYA, S. – MUDGAL, B.V. 2012). A térbeli és időbeli koncentráció, a hatótényezők tér- és időbeli heterogenitása, valamint a peremfeltételek összetettsége miatt a villámárvizek vizsgálata és előrejelzése meglehetősen bonyolult. Az előrejelzést nehezíti, hogy az egyes modellek adatigénye, működési elve, továbbá parametrizációja sok esetben eltérő. Az előrejelzésre továbbá limitált lehetőséget ad, hogy az esemény lefolyása rövid idejű, sok esetben az okozott káresemény is az előrejelzés helyén valósul meg, így a monitoring, és a veszély jelzése közti idő is limitált. A villámárvizek előrejelzésének lehetősége a numerikus modellezés, melynek során valós idejű adatokkal dolgozunk, és ezeket használjuk fel bemeneti paraméterként az egyes lefolyási modellekhez. Ehhez persze fontos a veszélyeztetett terület pontos kijelölése, az optimális mérőpontok meghatározása, és az egyes faktorok súlyozása, illetve értékelése a villámárvíz kialakulásának szempontjából.

2. Célkitűzések

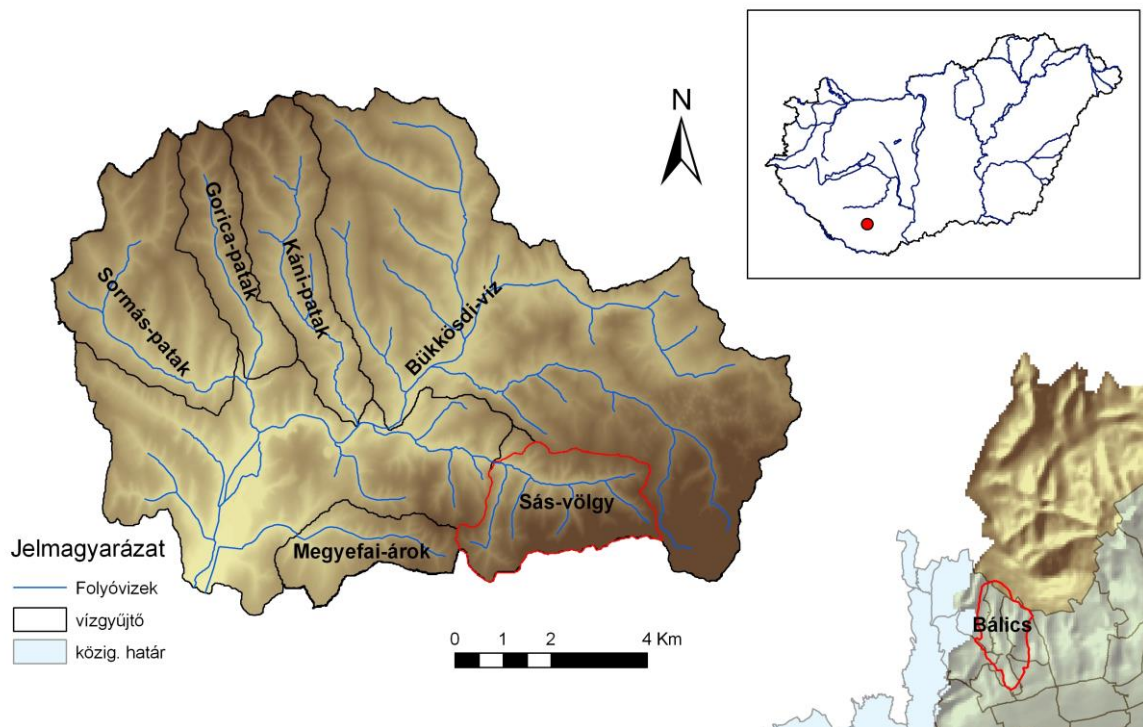
A dolgozat célja a villámárvizek peremfeltételeinek elemzése, a lefolyási tényezők vizsgálata illetve modellezése, melynek mintaterületül a Nyugat-Mecsek kisebb vízgyűjtőit választottam, reprezentativitásuk okán. Mivel a befolyásoló tényezők széleskörűek, ezért a dolgozat kiemelten kezel az árvíz kialakulása, és lefolyása szempontjából több lényeges faktort, mint például a csapadékot (annak intenzitását), a talajnedvesség-, illetve az árhullámok területi és időbeli megjelenését. Munkám során az alábbi fő célokat tűztem ki, illetve kérdéseket fogalmaztam meg:

1. A talajnedvesség és a csapadékadatok input adatként való használatának lehetőségei hidrológiai modellek esetén
2. A csapadék és talajnedvesség, mint peremfeltétel területi (Pósa-völgy) és időbeli jellegzetességeinek megállapítása.
3. A csapadék-lefolyás modellezésének lehetőségei urbánus (Bálicsi-vízgyűjtő) és természetes (Sás-völgy) vízgyűjtőn, különös tekintettel az optimális modell kiválasztására
4. Milyen statisztikai összefüggések vannak fedezhetők fel az egyes talajtani és hidrológiai tényezők között?
5. Van-e olyan kiemelhető kapcsolat, vagy peremfeltétel, amelynek súlya számottevően nagyobb a lefolyásban, mint a többi tényezőé a mintaterületeken?
6. Hogyan befolyásolja az összegyülekezési idők számítása a lefolyást a hidrológiai modellekben, valamint melyik összegyülekezési idő számítására alkalmazott módszer eredményezi a legpontosabb egyezést a mért vízhozam idősorokkal?
7. Alkalmasak-e az empirikus modellek a kisvízgyűjtők vízhozamának becslésére?

3. Eszközök és módszerek

3.1. Csapadék és talajnedvesség monitoring

Mivel a csapadék és a talajnedvesség térbeli eloszlása rendkívül fontos peremfeltételek a lefolyásvizsgálathoz, továbbá a hidrológiai modellekben is alapadatként kezelendő, ezért kiépítésre került a Sás-völgy nyugati részvízgyűjtőjében (Pósa-völgy) egy monitoring hálózat ezen paraméterek mérésére. A méréshez hordozható TDR (*Time Domain Reflectrometer*) típusú talajnedvesség szenzort használtam (Spectrum TDR-300, Planfield, Illinois, Egyesült Államok).



1. ábra. A két kutatási terület (Sás-völgy és Bális) elhelyezkedése, és domborzati modellje (10 m-es felbontás)

A mérések 1-3 hetes intervallumban történtek 1 éven keresztül 2008. szeptember 5. és 2009. szeptember 5. között, amelyből adathiányos időszak a téli hónapokban fordult elő, mivel a feltalaj fagyott állapota és a hótakaró miatt ebben az időszakban nem került sor mérésekre. 2010 őszén szintén egy hetes intervallumban folyamatos talajnedvesség mérések történtek a Pósa-völgy alsó szakaszán egy kiválasztott, és előzetesen GPS-el felmért keresztmetszvényben. További csapadék és talajnedvesség adatok rögzítésére kihelyezésre

került a völgy 11 pontján adatgyűjtővel ellátott ECRN-100 (felbontás: 0,2 mm) típusú csapadékgyűjtő, illetve a talaj 20 cm-es mélységébe 5-TM típusú talajnedvesség, és hőmérsékletmérő szenzor. Mindkét mérőeszköz, továbbá az EM-50 típusú adatgyűjtő a Decagon (*Decagon Devices Inc.*, Pullman, WA, Egyesült Államok) cég gyártmánya. A csapadék és a talajparaméterek rögzítésére 10 perces időintervallumokban került sor. Egyéb csapadékadatok begyűjtésére a Hetvehelytől délre elhelyezkedő meteorológiai állomásról (Mecseki Ércbányászati Vállalat és a Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság működtetésében) volt lehetőség, a 2005-ös évtől kezdődően.

A Bálicsi vízgyűjtőn történő modellezéséhez a Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Karán működő meteorológiai állomás adatait használtam fel, ahol szintén kihelyezésre került a fent említett csapadék-, és talajnedvesség mérő eszköz, továbbá a csapadékmérések pontosítására egy Hellman-típusú kézi csapadékmérő, amelynél az aktuális csapadékesemény után rögzítettem a mért mennyiséget (utóbbi esetben csak napi adatok).

3.2. Az empirikus árhullám számítások és az összegyülekezési idők vizsgálata

Az árhullám adatok feldolgozása során meghatároztam az egyes részvízgyűjtőkön (Sás-, Káni-, Gorica-, Megyefai-, Sormás-, és Bükköd-felső vízgyűjtők) a heves zivatarok során kialakult árhullámhoz tartozó összegyülekezési időt. Ez azért szükséges, mert a legtöbb hidrológiai modell közvetlenül, de közvetetten mindenképp figyelembe veszi a lefolyás számításánál ezt a paramétert, így annak mért vagy számított értékei szükségszerűek a pontos modellezéshez. Az összegyülekezési idő számításához a csapadékesemény kezdete és az árhullám görbe csúcsának időpontja között eltelt időszakot vettem figyelembe. Meghatározásra került emellett az adott időszakokhoz kapcsolódó maximális csapadékinzintitás is. A számításnál a $0,4 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ -ot meghaladó vízhozamokat vettem figyelembe, továbbá a csapadékesemény végét a legalább 30 percig tartó csapadékesemény szünet jelentette a számításnál. Mivel a kapcsolódó szakirodalomban többször előkerült az összegyülekezési idők kérdése, amely ráadásul többféle megközelítést tartalmaz, ezért szükségesnek éreztem a különböző számítások verifikálását kisvízgyűjtők esetén is. Árvízhozam számítások kapcsán alkalmaztam többek között a Kirby-féle egyenletet, a Kirpich-formulát, a Bransby-Williams egyenletet, de leginkább a CHOW, V.T. et al. (1988) által leírt, és Wisnovszky szerint módosított számítást (KONTUR I. et al. 2003), amely a legtöbb tetőző vízhozam számításban szerepel:

$$\tau = \frac{L^2}{\sqrt{AI}}$$

ahol τ az összegyülekezési idő (h), L a völgy hossza km-ben kifejezve, A a vízgyűjtő területe (km^2) és I pedig a völgy esését kifejező dimenzió nélküli szám.

A tetőző vízhozamokat modellek segítségével határoztam meg. Ezeknek több csoportját vizsgáltam (a) empirikus, (b) számítógépes, numerikus modellek. A tetőző vízhozamok számítására a szakirodalom többféle módszert ismer, amelyek hasonló szempontok alapján, de a különböző paramétersúlyozással kerültek kidolgozásra, régiók szerint eltérően (ZSUFFA I. et al. 1996). A lefolyási tényezők meghatározásához a Vízügyi Műszaki Segédletek (VMS 1977) szolgáltatnak megfelelő információt. A tetőző hozamok alkalmazásával egyrészt megvizsgáltam, hogy hogyan alkalmazhatók az egyes számítások a kisvízgyűjtők esetében, másrészt pedig hogy az adott módszerek mennyire közelítik meg a mérések során kapott vízhozam eredményeket. A korreláció érdekében különböző gyakoriságokat, illetve visszatérési időket vettem figyelembe, illetve a kapott adatokat nem csak egymáshoz, hanem a fajlagos lefolyáshoz (vízgyűjtő területre vetített lefolyás) és az adott lefolyási együtthatóhoz is viszonyítottam. A számítási metódusok a magyarországi területekre empirikusan kidolgozott, többnyire terület specifikus eljárások. Az analízis során öt jelentősebb módszert vettem figyelembe, nevesítve ezek a Csermák-, Kollár-, Koris-, Virág-módszer, illetve az ún. Racionális vagy Babos-módszerek. A módszerek alkalmazása a Bükködi-víz öt kiválasztott vízgyűjtőjére történt meg, hasonló domborzati-, és hidrológiai feltételek kapcsán.

3.3. Numerikus modellezés

A kisvízgyűjtők lefolyási modellezéséhez elsősorban a HEC programcsalád egyik modulját, az Egyesült Államokban kifejlesztett (Davis, CA, Egyesült Államok) HMS-t (*Hydrologic Modeling System*) használtam. A 3.5-ös verziószámú program a csapadék és lefolyás viszonya közötti analízist valósítja meg, a vízgyűjtőre vetítve. Előnye, hogy sokféle input paramétert vesz figyelembe, így a mintaterület komplexen vizsgálható talajtani és hidrológiai szempontból is, továbbá az egyes almodulok beállítása különböző metódusok alapján lehetséges. Hátránya azonban, hogy igen sok bemeneti paraméterrel kell rendelkezni a

megfelelő beállításokhoz. A modulon belül két fő függvényt használtam fel, attól függően, hogy melyik segítségével kaptam realisabb eredményeket, továbbá a két megközelítés más-más tényezők beállításaira bizonyult érzékenynek. Ezek alapján a két választott függvény a *Soil Moisture Accounting*, ahol a felszíni lefolyás és a beszivárgás arányát a talajoldali peremfeltételek jobban befolyásolják, illetve az úgynevezett *Initial and Constant* módszer. Ez utóbbi egyszeri kezdeti veszteséget tételez fel, majd ha ez a mennyiség az összegzett csapadék alapján pótlódik, akkor folyamatos, időben állandó veszteséggel számol a modell, kisebb intenzitással. A részvízgyűjtőkről történő lefolyás modellezéséhez használható még az árhullám késleltetési függvény (*lag time*) is.

A hidrológiai modellezéshez felhasználásra került továbbá a DHI (*Danish Hydraulic Institute*) által kifejlesztett MIKE 11 szoftver, amely kifejezetten a folyami hidrológia modellezéséhez használt, napjainkban egyre szélesebb körben terjedő hidrológiai program. A MIKE program egy osztott paraméteres modell, amely az adott vízgyűjtőn a felszíni lefolyást különböző paraméterekkel, részleges cellákra osztottan vizsgálja. Elsősorban a felszíni áramlási viszonyoknak a leképezésére alkalmas, 1D-s modell. Előnye, hogy kevésbé összetett, mint a többdimenziós modellek, így alkalmazása is egyszerűsített. A dolgozat témájához kapcsolódóan azonban többféle elemzésre is alkalmas, amely az árvízi paraméterek vizsgálatánál szükséges. A modell része egy csapadék-lefolyás kapcsolatokat vizsgáló modul, amellyel vizsgálhatunk részletes csapadék-lefolyás kapcsolatokat. A *NAM* csapadék lefolyás elemző modul egy halmozott paraméterű, konceptuális megközelítés, amely a vízgyűjtőt egységként kezeli, az adott paraméterek átlagával írja le a fizikai folyamatokat.

4. Eredmények

A fejezetben a dolgozat legfontosabb eredményeit a célkitűzésekben megfogalmazott tételek mentén, a főbb pontokat kiemelve be.

- *A monitoring során gyűjtött adatok értelmezése, és felhasználása hidrológiai modellekben*

A kutatás során egy természetes (Bükkösi-vízgyűjtő; Sás-völgy) és egy mesterséges (Bálicsi-vízgyűjtő) környezettel, illetve felszínborítással jellemezhető vízgyűjtőn került sor monitoring hálózat kiépítésére, melynek keretében részletes adatgyűjtés történt a levonuló árvizeket befolyásoló, illetve meghatározó paraméterekről – talajnedvesség, beszivárgás, csapadék, talajhőmérséklet és vízhozam mérések. Az idősoros és a területi vizsgálatok alapján a választott kisvízgyűjtőkön az egyes tényezők változása mind területileg, mind időben hullámzó, azonban néhány szignifikáns tendencia megvilágítása lehetséges. A csapadék területi eloszlásában meghatározó a magassággal történő változás. Ennek kapcsán az utóbbi évek adatsoraiból kiindulva pontosítottam a Pécs területén való eloszlás tendenciáit, amely a vízgyűjtő terület kiválasztását is egyben megalapozta. Vizsgáltam továbbá a mérésekhez kapcsolódó rövid idejű (6-24 órás) csapadékok jellemzőit is. Az adatsorok pontosítása érdekében összehasonlítottam az egyes mérőeszközöket, illetve a mérési adattartományok optimalizálására is sor került: ez alapján elmondható, hogy a 10 perces mérési idő intervallumok a legmegfelelőbbek az adatok rögzítéséhez, továbbá a felhasznált mérőeszközök közül a Decagon-típusú adta a legpontosabb adatnyerési lehetőséget, mivel ennek adatsora mutatta a legkisebb szórást, továbbá a mérés során számított abszolút hibák ebben az esetben bizonyultak legkisebbnek. A talajnedvesség input paraméterként való alkalmazása az eredmények széleskörű vizsgálatát teszi lehetővé, mivel a hidrológiai modellekben fontos tényezőnek bizonyult a korábbi tanulmányok szerint, amely megállapítást a jelen kutatás eredményei is megerősítenek (SEYFRIED, M. 1998; ZEHE, E. et al. 2005; PENNA, D. et al. 2013).

- *A domborzat és az egyes környezeti tényezők hatásának vizsgálata a talajnedvesség eloszlására*

Mivel a mérések során történt megfigyelések alapján a talajnedvesség fontos szerepet játszik a beszivárgási kapacitásban, areális-, és köztes lefolyásban, ezért a talajnedvességet és az egyes, lefolyást meghatározó faktorokkal való kapcsolatát a dolgozatban kiemelten vizsgáltam. Pontos vizsgálata a térbeli és időbeli változatossága miatt is indokolt, amelyet BROCCA, L. et al. (2012) eredményei is megerősítenek, akik a kisvízgyűjtő területen a talajnedvesség jelentős szórását figyelték meg. A talajnedvesség térbeli és időbeli eloszlását vizsgáltam statisztikai módszerekkel, továbbá összehasonlítottam olyan tényezőkkel, mint a lejtőszög, lejtőterület, a talaj fizikai összetétele, talajvastagság, lejtőkitettség, illetve átlagos talajszemcse méret. Megállapítottam egy klasszikus kisvízgyűjtő keresztshelvényében a talajnedvesség magassággal való változásának legfőbb okait és következményeit. A domborzati változatosságok, illetve a lejtők inflexiós pontjai kiemelésre kerültek, mivel ezeken a helyeken a vízgyűjtő esetében a talajnedvesség értékek jelentős változása figyelhető meg.

A statisztikai megközelítések mellett kísérletet tettem arra, hogy a pontszerű méréseket a teljes vízgyűjtőre kiterjesszem, illetve a különböző eredményeket több megközelítésben alkalmazzam, ezáltal pontosítva a modell bemeneti paramétereit. Így interpolációs eljárásokat (elsősorban ordinary Kriging; emellett IDW; Inverse Distance Weighted) alkalmaztam, amely már részletesebb képet adott a vízgyűjtőn belüli eloszlásról. A térbeli jellegzetességek megállapítása érdekében a vízgyűjtőn olyan pontokat kerestem, amely hasonló tulajdonságokkal rendelkezik (lejtőszög, lejtőkitettség, talajvastagság, és tengerszint feletti magasság) mint az eredeti monitoring állomás környezete. Ezáltal elérhető a kisvízgyűjtőn a talajnedvesség térbeli eloszlásának pontosítása. Az eredmények pontatlanságának kiküszöbölése érdekében validációs mérésekre is sor került. HEATHMAN, G.C. et al. (2012) vizsgálataival összhangban növekvő talajnedvesség értékek mellett a térbeli szóródás csökkenő tendenciával jellemezhető. A vizsgált környezeti faktorok között szoros korreláció csak a legmagasabb talajnedvességi értékek átlaga, és a lejtőszög korrelációjában mutatható ki, azonban több mérési eredmény alapján is ez mondható a leginkább befolyásoló tényezőnek. A maximális talajnedvesség értékek és a lejtőszög értékek lineáris korrelációjának értéke $r^2 = 0,63$.

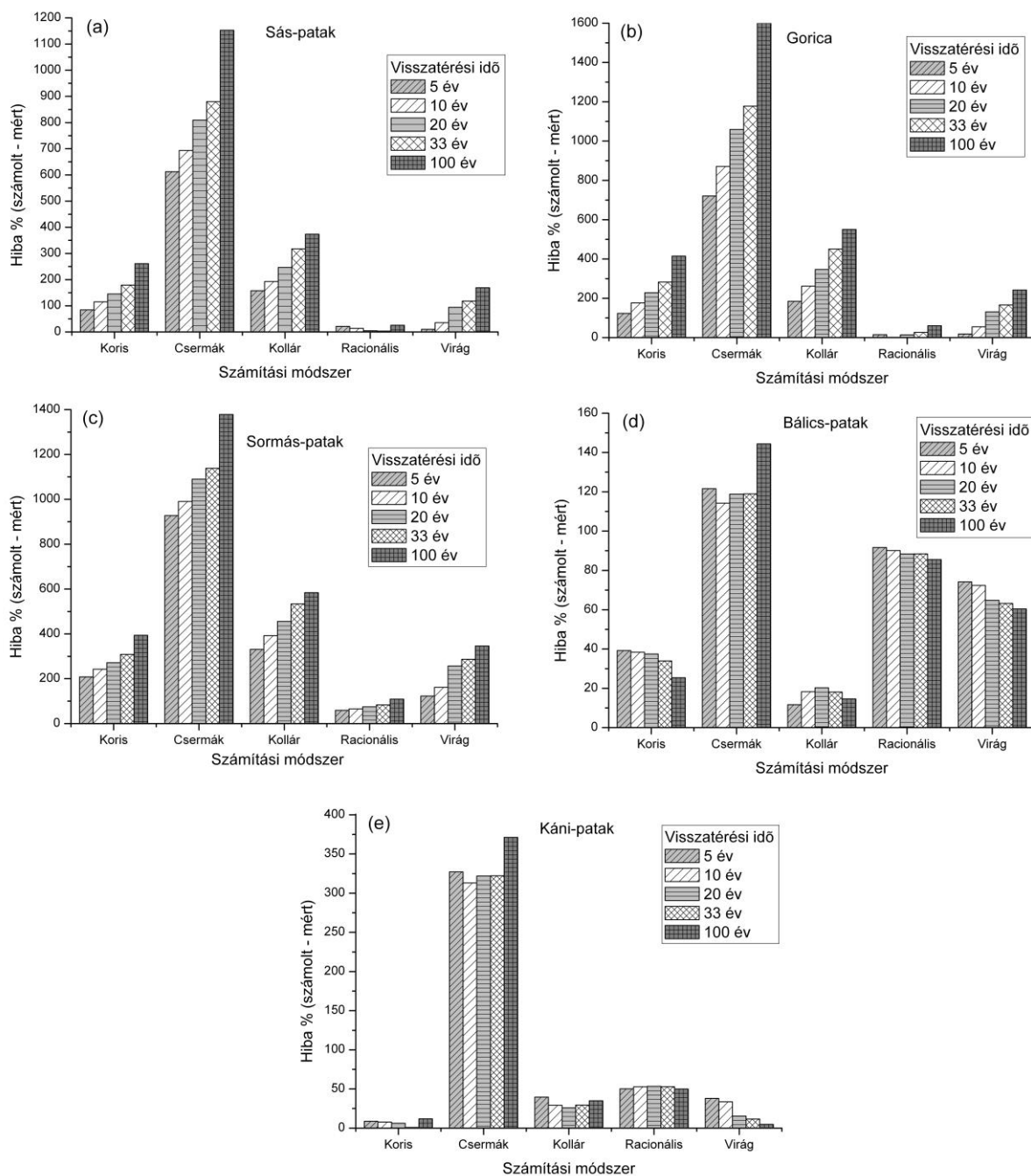
➤ *Statisztikai vizsgálatok a talajnedvesség, mint meghatározó peremtényező kapcsán*

A talajnedvesség értékeit az időszakos és területi változások függvényében három csoportban (minimum, átlag, és maximum értékek) vizsgáltam, és hasonlítottam össze különböző hidrológiai és talajtani tényezőkkel. Kísérletet tettem az adott vízgyűjtőn optimálisan telepítendő szenzorszám meghatározására is, amely a vizsgálatok alapján 2 és 30 közötti értéknek adódott négyzetkilométerre vetítve. A szélső értékek a 0,5 és 2% közötti abszolút hibával történő számítás eredményei alapján kerültek kiszámításra. Ezek alapján így az eredményekhez használt 14 monitoring állomás a területen optimálisnak mondható. A TDR elvű talajnedvesség mérések (2008. szeptembertől 2009. szeptemberig) alapján vizsgáltam a nagyobb csapadékok és évszakos változások függvényében a talajnedvesség változását, és értékeinek szórását a területen.

➤ *A hidrológiai modellezés lehetőségei és eredményei*

1. Empirikus modellek alkalmazása

Az empirikus modellek használata széles körben elterjedt Magyarországon (VMS; KONTUR I. et al. 2003). Mindazonáltal ezek használata a klasszikus nagy vízhozamú, de lassabb folyók megfigyelései alapján lettek kialakítva és alapvetően csak a tetőző vízhozam értékek meghatározására, becslésére alkalmasak. A Nyugat-Mecsek választott kisvízgyűjtőire, további adatok felhasználásával kísérletet tettem a legjelentősebb empirikus számítási módszerek (*Racionális-, Koris-, Kollár-, Virág-, Csermák-, Wisnovszky-féle*) árhullám számítások összehasonlítására, és alkalmazhatóságára. Általánosságban a legnagyobb eltéréseket és százalékos hiba értékeket a Csermák-féle módszer adta mind az öt választott vízgyűjtő tekintetében (Sormás-, Gorica-, Káni-, Megyefa-, és Sás-patakok vízgyűjtői). Legjobb összefüggés a 25 esetre számított árhozam vizsgálat során a Virág-féle, továbbá a Racionális módszer alkalmazásával érhető el. ($\sigma = 80,3$; legkisebb hiba különbség 1,42%). Az árhullámokat emellett különböző visszatérési időkkel – azaz bekövetkezési valószínűséggel – vettem figyelembe.



2. ábra. Százalékos értékek különböző visszatérési idők mellett (a) Sás-patak, (b) Gorica, (c) Sormás-patak, (d) Bálics, és a Káni-patak vízgyűjtőjén

Vizsgálataim alapján a kisvízgyűjtőkön történő empirikus árhullám számítás esetében a Koris által megfogalmazott, normál vízjárásra leírt számítási módszer alkalmazható leginkább. Ezt a Koris-féle módszer értékeinek magas korrelációs kapcsolata is alátámasztja a fajlagos lefolyás értékeivel. A módszer további előnye, hogy egyszerű paraméterekkel is számolható. Mind a Kollár-, mind a Koris-féle tetőző árhullám számítása esetén különböző áramlási típusok alkalmazására van lehetőség, ezek közül legtöbbször a kisvízi, vagy az egyensúlyi áramlás mintáján kapott értékek adták a legjobb illeszkedést a mért

vízhozamokhoz. Ezekben az esetekben tehát lehetőség van egyfajta „finomításra” a számítások esetén. Eredményeim alapján a Racionális és a Virág-féle módszerek alkalmazása a nevezett vízgyűjtőkön szintén lehet pontos, ám a szükséges paraméterek megadása miatt jelentősen szubjektív lehet.

2. A HEC-HMS modellfuttatások főbb eredményei

A modellezési eredmények alapján a HEC-HMS program különösen érzékeny a megelőző talajnedvesség értékek beállítására és a beszivárgási sebesség változására. Ezt az összefüggést megfigyelte ZEHE, E. et al. (2005) és MARKUS, M. et al. (2007) is. Mint a legtöbb hidrológiai modellező program, így a HEC-HMS is input adat igényes. A modell elsősorban a tetőző vízhozamok mennyiségét modellezi pontosan (tehát ebből a szempontból az empirikus modellekhez hasonló), azonban az árhullám képének pontos kirajzolásához sokszor a paraméterek aprólékos beállítása szükséges, továbbá a megfigyelt értékektől eltérő, széles skálán mozgó adatok jellemzik. Továbbá a HEC-HMS alkalmatlan több, egymást követő árhullám-csúcs reprodukálására, legalábbis a Clark Unit Hydrograph hidraulikai modult használva. A szimulációs futtatások során kiemelten vizsgáltam a talajnedvesség, és a kezdeti deficit (beszivárgás, illetve felszíni víztározás értékei) beállításait, mivel ezek bizonyultak az eredmények szempontjából meghatározónak, valamint ezek viszonylag jó pontossággal mérhetőek műszeresen. Amennyiben nagyon sok változó bemeneti paraméterünk van, akkor a program optimalizációs eljárása azonban sok esetben jól használható. A beépített területek modellezése során azt a megállapítást tehetjük, hogy a program kiemelten kezeli azok arányát. A Bálícsi-vízgyűjtő területén a leképezett vízhozamot 27%-os beépítettség mellett figyeltem meg. Ezt az értéket 35%-ra emelve a vízhozam 20%-al nagyobb a korábbi maximumnál. A teljes kifolyó vízmennyiség a modellezett értékek szerint 3,5-szerese a megfigyeltnek.

1a. táblázat. A HEC-HMS legjobb egyezés szerinti paraméter beállításai a veszteségi (*Soil Moisture Accounting*) modulban, a 2010-es árvízi események modellezésére

| Input paraméter | Legjobb egyezés értéke | Legjobb egyezés értéke (teljes |
|--|------------------------|--------------------------------|
| | (Pósa-völgy) | Sás-vízgyűjtő) |
| <i>Lombkoronaszint tározása (mm)</i> | 4 | 4 |
| <i>Lombkoronaszint telítettség (%)</i> | 0 | 0 |
| <i>Felszíni tározás (mm)</i> | 5 | 5 |
| <i>Felszíni telítettség (%)</i> | 0 | 0 |
| <i>Talajnedvesség tartalom ($m^3 m^{-3}$)</i> | 0,279 | 0,277 |
| <i>Viztelítettség (%)</i> | 0,370 | 0,368 |
| <i>Maximális beszivárgás ($mm h^{-1}$)</i> | 57 | 56,6 |
| <i>Talaj, ill. üledékvastagság (m)</i> | 120+ | 100 |
| <i>Összegyülekezési idő (h)</i> | 1,3 | 2 |
| <i>Tározási együttható</i> | 0,9 | 1,3 |

1b. táblázat. A HEC-HMS legjobb egyezés szerinti paraméter beállításai a veszteségi (*Deficit and Constant*) modulban a 2010. májusi árvízi esemény modellezésére

| Input paraméter | Bükkösdí- víz | Sormás | Kán | Gorica | Megyefa | Sás-völgy |
|--|------------------|--------|-------|--------|---------|-----------|
| <i>Max. lombkorona tározás (mm)</i> | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| <i>Kezdeti lombkorona tározás (%)</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| <i>Felszíni tározás (mm)</i> | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| <i>Kezdeti felszíni tározás (%)</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| <i>Kezdeti deficit (mm)</i> | 40 | 50 | 29 | 70 | 45 | 20 |
| <i>Max. deficit (mm)</i> | 100 | 100 | 70 | 100 | 70 | 70 |
| <i>Beszivárgás ($mm h^{-1}$)</i> | 2 | 3 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| <i>Összegyülekezési idő (h)</i> | 7 | 3 | 3 | 2 | 2,2 | 4 |
| <i>Tározási együttható (h)</i> | 20 | 20 | 20 | 4 | 10 | 6 |
| <i>Alap vízhozam ($m^3 s^{-1}$)</i> | 0,16 | 0,032 | 0,035 | 0,025 | 0,068 | 0,032 |
| <i>Árhullám késleltetés (min)</i> | 50 | 36 | 47 | 36 | 10 | 50 |

3. A MIKE 11 csapadék-lefolyás modelljei

A MIKE 11 modelljében különböző csapadék-lefolyás modulok alkalmazását próbáltam ki. A NAM modell, amely elsősorban felszíni és felszín alatti hozzáfolyás és tározás paramétereinek felhasználásával adja meg az árhullám képét, elsősorban a gyökérszóna víztározására érzékeny. Az egységárhullám módszerével (UHM) viszonylag pontos közelítést kaptam, azonban a paraméterek drasztikus változtatása sem módosított jelentősen az árhullám képén. Az MIKE 11 előnye a beépített *Urban* modul, amelynek egyértelműen pontosabb módszere az idő/terület arányát figyelembe vevő, és főleg veszteségi paraméterekből építkező modulja. Mind az árhullámok tetőző vízhozam értékei, mind pedig a lefolyás lefutása minimális pontatlanságokkal képezhető le. A modellezéshez felhasználtam a többféle megközelítésben számolt, illetve mért összegyűlekezési időket is, továbbá teszteltem a modell érzékenységét az egyes tényezők egyenkénti változtatására is.

A HEC-HMS-el összehasonlítva a DHI MIKE 11modell annak beállított értékeihez képest jóval több beállítást tesz lehetővé, mindazonáltal sok paraméter autokalibrációja is lehetséges. Az optimális árhullám görbe létrehozásához viszont kevesebb bemeneti paraméter optimalizálására van szükség. Ez megerősíti azt a megállapítást, hogy a MIKE 11 csapadék-lefolyás modellje jóval finomabban kalibrált, hiszen kisebb változtatások is közvetett hatással vannak a modell futtatás eredményére. A HEC-HMS-ben kapott árhullámok leképezéséhez, illetve a MIKE 11 csapadék-lefolyás kapcsolatot elemző moduljaiban is meghatározó a veszteségi paraméterek közül a beszivárgás, illetve a (relatív) talajnedvesség tartalom beállítása, és annak változásai. Az intercepció értékek alacsonyabbnak mutatkoznak a MIKE 11 esetében. A MIKE 11 továbbá jóval összetettebb kalibrációt tesz lehetővé, ami az egyes tényezők súlyának csökkenését is eredményezheti (BUTTS, M.B. et al. 2004).

Publikációs lista

1.1 Az értekezés témájához kapcsolódó közlemények, publikációk

P. HEGEDÜS, S. CZIGANY, L. BALATONYI, E. PIRKHOFFER & R. HICKEY (megjelenés alatt): Analysis of spatial variability of near-surface soil moisture to increase rainfall-runoff modelling accuracy in SW Hungary. *Central European Journal of Geosciences*.

HEGEDÜS P., S. CZIGÁNY SZ., BALATONYI L. & PIRKHOFFER E. (2013): Sensitivity of the HEC-HMS runoff model for near-surface soil moisture contents on the example of a rapid-response catchment in SW Hungary. *Riscuri si Catastrofe*, 12:(1) pp. 125-136.

P. HEGEDÜS, S. CZIGANY, L. BALATONYI & E. PIRKHOFFER (2013): Analysis of Soil Boundary Conditions of Flash Floods in a Small Basin in SW Hungary. *Central European Journal of Geosciences*, 5:(1) pp. 97-111.

P. HEGEDÜS, S. CZIGANY, E. PIRKHOFFER, L. BALATONYI & L. RONCZYK (2013): Estimation of flow rate calculation errors on the example of five rapid response catchments in the Mecsek Hills. *Földrajzi Értesítő (Hungarian Geographical Bulletin)*, 62:(4) pp. 331-350.

PIRKHOFFER E., CZIGÁNY SZ., HEGEDÜS P., BALATONYI L. & LÓCZY D. (2013): Lefolyási viszonyok talajszempontú analízise ultra-kisméretű vízgyűjtőkön. *Tájökológiai Lapok*, 11:(1) pp. 105-123.

CZIGÁNY S., PIRKHOFFER E., NAGYVÁRADI L., HEGEDÜS P. & GERESDI I. (2011): Rapid screening of flash flood-affected watersheds in Hungary. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 55:(1) pp. 1-13.

KERESZTÉNY B., ILISICS N., BALATONYI L., HEGEDÜS P., PIRKHOFFER E. & CZIGÁNY SZ. (2011): Collecting and employment of soil parameter for numerical flash flood modeling in ultra-small watershed. *Riscuri si Catastrofe*, 9:(1) pp. 45-57.

1.2 Az értekezés témájához kapcsolódó konferenciaközlemények és absztraktok

BALATONYI L., CZIGÁNY SZ., PIRKHOFFER E. & HEGEDÜS P. (2013): Árvízhozam számítási módszerek összehasonlítása egy Dunántúli kisvízgyűjtőn. In.: SZLÁVIK L., KLING Z., SZIGETI E.: XXXI. Országos Vándorgyűlés, Magyar Hidrológiai Társaság. (2013.07.03 – 2013.07.05, Gödöllő).

BALATONYI L., CZIGÁNY SZ., PIRKHOFFER E. & HEGEDÜS P. (2013): Dél-Dunántúlon található Bükkösdi-víz felső vízgyűjtőjének villámárvízi veszélyeztetettsége. In.: SZLÁVIK L., KLING Z., SZIGETI E.: XXXI. Országos Vándorgyűlés, Magyar Hidrológiai Társaság. (2013.07.03 – 2013.07.05, Gödöllő).

ILISICS N., KERESZTÉNY B., BALATONYI L., HEGEDÜS P., CZIGÁNY SZ. & PIRKHOFFER E. (2011): Villámárvíz paraméterek kutatása és elemzése térinformatikai eszközökkel a Pósa-völgy példáján. In.: Lóki J. (szerk.): Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában: II. Térinformatikai Konferencia és Szakkiállítás Debrecen. (2011.05.19 – 2011.05.20. Debreceni Egyetem, Debrecen).

P. HEGEDÜS, S. CZIGANY, E. PIRKHOFFER, L. & BALATONYI L. (2012): Ensemble modeling of boundary conditions of flash floods. In.: R. Kamula, B. Klove & H. Arola (Eds.): Nordic Water 2012. Abstracts. Catchment Restoration and Water Protection. (2012.08.13 – 2012.08.16. Oulu, Finnország).