

**PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM**  
**Természettudományi Kar**  
**Földtudományok Doktori Iskola**

**Árvízhozam előrejelzés optimalizálása középhegységi és  
dombvidéki kisvízgyűjtőkre**

PhD értekezés

**Balatonyi László**

Témavezető:

**Dr. Czigány Szabolcs**  
habil. egyetemi docens

Pécs, 2015

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

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

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

## TARTALOMJEGYZÉK

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE.....	ix
<b>1. Kutatástörténet</b> .....	1
1.1. Extrém időjárási események hidrológiai következményei nagy területű vízgyűjtőkön	2
1.2. Extrém időjárási események hidrológiai következményei kisvízfolyásokon .....	5
1.3. Villámárvizek Magyarországon .....	11
1.4. Elöntések és dokumentált történelmi helyi vízkárok a Bükkösi-víz vízgyűjtőjén...	13
1.5. A klasszikus nagyvízi árvizek és kisvízfolyások árvizei közötti különbség.....	16
1.6. A lefolyást befolyásoló környezeti tényezők a hidrológia ciklusban.....	16
1.7. Az intercepció szerepe a hidrológiai ciklusban.....	18
1.8. Lombkorona vízvisszatartó képessége .....	25
1.9. Numerikus modellezés lehetőségei a villámárvizek előrejelzésében.....	27
1.10. Jelenleg működő Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság Vízügyi Információs Rendszer (DDVIR) bemutatása .....	29
1.11. Online előrejelző rendszer kiépítésének lehetőségei a Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság működési területén található vízfolyásokra.....	30
<b>2. Célkitűzések</b> .....	32
<b>3. Eszközök és módszerek</b> .....	33
3.1. A Bükkösi-víz, illetve a felső vízgyűjtőjén elhelyezkedő Pósa-völgy bemutatása.....	33
3.1.1. Mintaterület bemutatása, a Bükkösi-víz vízgyűjtőjének általános jellemzése .....	33
3.1.2. A Bükkösi-víz vízgyűjtőjének felszínhasználati jellemzői .....	38
3.1.3. A Bükkösi-víz mederviszonyai .....	40
3.1.4. Vízgyűjtő lehatárolása ArcGIS-ben .....	41
3.1.5. Pósa-völgy bemutatása.....	45
3.2. Monitoring hálózat általános jellemzése .....	47
3.2.1. Csapadékadatok rögzítése .....	48
3.2.2. Talajnedvességi adatok gyűjtése .....	54
3.3. Fedettség meghatározása a megfigyelési időszakban .....	57
3.3.1. A lombkorona modellterének a digitális rögzítése.....	58
3.3.2. Fényképes adatok kiértékelése Arc GIS szoftverkörnyezetben .....	58
3.4. Árvízhozamok előrejelezhetősége a korai számítási módszerektől a számítógépes alapú numerikus lefolyásmodellekig.....	61
3.4.1. Egyszerű árvízhozam számítási módszerek .....	61
3.4.2. Komplex robosztus lefolyási modell alkalmazása árvízhozam előrejelzésekben.....	63
3.4.3. A parametrizált AGWA program.....	73
<b>4. Eredmények</b> .....	78
4.1. Egy ultrakisméretű vízgyűjtőn terepi monitoring rendszer kiépítése .....	78
4.1.1. A monitoring rendszer csapadékadatainak jellemzése és értékelése .....	78
4.1.2. A Pósa-völgyben rögzített talajnedvességi adatok értékelés .....	86
4.1.3. Csapadék hatása a talajnedvességre .....	90
4.2. A felszínborítás időbeli lefutásának vizsgálata a Pósa-völgy vízgyűjtőjében.....	92
4.3. A lombkorona intercepció nagyságának számítása.....	94
4.4. Árvízhozamok előjelezhetősége, egyszerű és komplex numerikus modellek eredményei .....	102
4.4.1. Egyszerű árvízhozam számítási modellek.....	102
4.4.2. Az AGWA talajt jellemző értékeinek a parametrizálás .....	106
4.4.2.1. A talaj és regolit vastagságának a meghatározása VESZ mérésekkel .....	106

4.4.2.2. Szemcseeloszlás meghatározási eredmények, granulometriai vizsgálatok.....	109
4.4.3. AGWA modellfuttatások eredményei .....	111
Vízgyűjtő-specifikus területi csapadék korrekciós faktor megállapítása .....	118
<b>5. Összefoglalás .....</b>	<b>122</b>
<b>6. A munka hasznosíthatósága, illetve a további irányai.....</b>	<b>127</b>
<b>7. Köszönetnyilvánítás .....</b>	<b>131</b>
<b>8. Irodalomjegyzék .....</b>	<b>133</b>
<b>9. Mellékletek.....</b>	<b>143</b>

## ÁBRÁK JEGYZÉKE

1. ábra Globális felmelegedés hatása a hidrológiai ciklusra és a mállási folyamatokra (Saját szerkeztés) .....	1
2. ábra Hőmérséklet-, ill. csapadékváltozás 2071-2100 időszakra az 1961-1990 referencia időszakhoz képest (°C, ill. mm) (forrás: BARTHOLY et al. 2007).....	2
3. ábra A 2013-as Dunai árhullám képes összefoglalója a Mohácsi árvízvédelmi szakaszon (Saját fényképek) 3	
4. ábra Drávai 2014-es árhullám képes összefoglalója a Drávaszabolcsi (05.02) árvízvédelmi szakaszon (Saját fényképek) .....	4
5. ábra Villámárvizek következményei emberi hanyagság következtében Pécsen a Vince utcában és az Ágoston téren (a, c és d képek) valamint Sásdon (Baranya megye, b kép), 2010 májusában (a, c és d képek: Varga Gábor felvételei; b: Czigány Szabolcs felvétele).....	5
6. ábra Tiltó tábla vihar idejére, a Utah állambeli (Egyesült Államok) Antelope Canyonban (Fotó: Nagyvárad László).....	7
7. ábra A kolontári vörösiszap-katasztrófa során bekövetkezett gátszakadás 2010. október 4.-én. (Tóth Ferenc fotója, Országos Vízügyi Főigazgatóság) .....	8
8. ábra A Vajont víztározó katasztrófája 1963. október 9.-én, valamint maga a gát 2005-ben (bal oldali kép) (Forrás: www.archingsm.org ).....	9
9. ábra A 2004. augusztus 16.-i villámárvízi esemény képei Boscastle, Egyesült Királyságban.....	10
10. ábra A Lawn Lake gátszakadás eredményeként létrejött villámárvízének emléktáblája a Rocky Mountains Nemzeti Parkban Colorado állam, Egyesült Államok (Fotó: Czigány Szabolcs) .....	10
11. ábra Villámárvizek következményei Mátrakeresztesen (2005. április 16-án) és Nógrádszakálón (jobb alsó ábra) 2010-ben (Forrás: Nógrád Megyei Katasztrófavédelmi Hivatal) .....	11
12. ábra A Bükkösi-víz Hetvehelynél, 2011. szeptember (Saját fotó) .....	13
13. ábra 1996. májusi árvízi hullámgörbe a Bükkösi-víz alsó vízgyűjtőjén (Hetvehely, DDVIZIG adatai alapján.) .....	14
14. ábra Fotódokumentáció a Bükkösi-víz kitüntetett pontjain, nagyvíz idején. A Bükkösi-víz mentén: (a) műút hídja Bükkösd alatt, (b) Bükkösi-híd, (c) vasúti töltés a vízfolyás közvetlen szomszédságában, (d) épületek Hetvehelyen a vízfolyás közvetlen közelében, a hetvehelyi iskola és a Kővágószőlős felé vezető út között, (e) a Bükkösi-víz és a Hétméhekvölgye-patak összefolyása (Fotók: c: Cser Valéria, a, b, d, e: Czigány Szabolcs).....	15
15. ábra A hidrológiai ciklus elemei, illetve a globális vízforgalom. A tározókban levő vízmennyiség $\text{km}^3$ , míg a nyilak mentén található számok víztranszportot, fluxust jelölnek, $\text{km}^3\text{év}^{-1}$ mértékegységben. (Davidson et al 2002 ábrája alapján) .....	17
16. ábra Városi árvizek kialakulása a felszínhasználat változása következtében a hidrológiai ciklus több eleme is megváltozik (Saját szerkeztés, Davidson et al 2002 ábrája alapján).....	18
17. ábra A csapadék intercepció, visszatartás és késleltetés öt helyszíne a HEC-HMS csapadék-lefolyás numerikus modell veszteségi moduljaiban (Saját szerkeztés) .....	20
18. ábra Az intercepció folyamata STAELENS (2008) nyomán .....	22
19. ábra HORTON és MERRIAM függvényének összefüggése egy fiatal lucfenyvesre alkalmazva (KUCSARA et al. 2012).....	24
20. ábra Az intercepció mértékének (mm) változása a beérkező csapadék függvényében lombhullató elegyes, kutatási célokra szolgáló erdőben; fafajok: vörös tölgy ( <i>Quercus rubra</i> ), cukorjuhar ( <i>Acer saccharum</i> ), amerikai bükk ( <i>Fagus grandifolia</i> ), vörös tölgy ( <i>Acer rubrum</i> ), fehér kőris ( <i>Fraxinus americana</i> ) és amerikai hárs ( <i>Tilia americana</i> ). PRICE, E. G. és CARLYLE-MOSES (2003) alapján.....	26
21. ábra Hó intercepciója ezüstfenyő ( <i>Picea pungens</i> ) alatt (Fotó: Czigány Szabolcs).....	27
22. ábra A DDVIR felhasználói felülete .....	29
23. ábra Fekete-víz vízgyűjtőjének a lehatárolása a DDVIR-ben.....	30
24. ábra A Pósa-völgy elhelyezkedése a Bükkösi-víz felső vízgyűjtőjén, továbbá a területen található monitoring rendszer elemei az elhelyezkedése.....	34
25. ábra A Délkelet-Dunántúl földtani térképe (Forrás: KONRÁD et al. 2010).....	35
26. ábra Nyugat-Mecsek földtani alap szelvénye M 1:100 000 (Forrás: MÁFI). A piros poligonon jelöltem a Pósa-völgyi mintaterületet. Saját szerkesztés .....	36
27. ábra A Bükkösi-víz felső vízgyűjtőjének genetikai talajtípusai és altípusai az AGROTOPO adatbázis alapján .....	37
28. ábra A Bükkösi-víz vízgyűjtőjének meredekségi jellemzői.....	38
29. ábra Csértölgy ( <i>Quercus cerris</i> ) a mintaterületen, 2011. május (Saját fotó) .....	39
30. ábra A Bükkösi-víz vízgyűjtőjének felszínhasználati jellemzői a CLC 2000 alapján.....	40

31. ábra A Fill kitöltő eszköz használata ArcGIS szoftverver környezetben (Spatial Analyst Tools > Hydrology)	41
32. ábra A Flow Direction eszköz használata ArcGIS szoftververkörnyezetben (Spatial Analyst Tools > Hydrology)	42
33. ábra A Flow Accumulation eszköz használata ArcGIS szoftververkörnyezetben (Spatial Analyst Tools > Hydrology)	42
34. ábra A Hetvehelyi-mellékág outflow (piros pont), kifolyási pont koordinátájának a megadása EOVBan ArcGIS szoftverver környezetben	43
35. ábra A Bükkösi-víz felső szakaszának mellékvízgyűjtői	44
36. ábra Pósa-völgy és a monitoring pontok elhelyezkedése	45
37. ábra. A Pósa-völgyben húzódó Sás-patak, 2011. április. 11 (Saját felvétel)	46
38. ábra A Sás-patak vízgyűjtőjének felső szakasza a Nyugat-Mecsekben, 2011. október (saját felvétel)	47
39. ábra A Pósa-völgyben kihelyezett hidrometeorológiai mérőállomások elhelyezkedése	48
40. ábra Decagon gyártmányú, Em50 típusú adatrögzítő (Saját fotó)	49
41. ábra Decagon ECRN-100 típusú, billenőedényes elven működő csapadékmérő (Saját fotó)	50
42. ábra Rögzített és adathiányos csapadékadatok időszakok a monitoring évében (2011)	51
43. ábra 10-perces csapadékösszegek időbeli eloszlása a terepi monitoring teljes időszakában 2011-ben	52
44. ábra Csapadékesemények leválogatásának automatizálása Excel makróban	53
45. ábra 10HS típusú Decagon talajnedvesség (soil moisture) mérő szenzor (Saját fotó)	54
46. ábra Decagon adatrögzítő kiolvasó (ECH <sub>2</sub> O) szoftver kommunikációs felhasználói ablaka	54
47. ábra Rögzített és adathiányos talajnedvességi adatok időszakai a monitoring évében (2011) a Pósa-völgyben	55
48. ábra 10 perces talajnedvesség adatok a Pósa-völgyben a monitoring évében(2011)	56
49. ábra A fedettség mértéke a 7.1 mérőponton 2011.04.15-én (a) és 2011.05.12-én (b)	58
50. ábra A 8 bites monokróm fényképek elemzési mechanizmusa az ArcGIS- ModelBuilder szoftverkörnyezetben	59
51. ábra Elválasztási határérték meghatározása ArcGIS/ArcMAP 10.2-es szoftverkörnyezetben (bal oldali képen aluli, a jobb oldali képen pedig a túlzott leválogatás eredménye látható)	59
52. ábra Matematikai alapon történő fehér és fekete pontok elválasztása	60
53. ábra A fekete és fehér pixelek elkülönítés: az eredeti fotó (a) és a származtatott, csak fekete és fehér pixeleket tartalmazó fénykép (b)	60
54. ábra Lefolyási egységek (planes) felosztása az AGWA programban Discretization függvény alapján, a Baranya csatornán	64
55. ábra Meder parametrizációs beállítások AGWA programban	65
56. ábra Egyszerűsített felszíntípusok, CLC 2000 felosztás alapján a Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság működési területére	66
57. ábra A Pósa-völgy domborzati modellje alapján készült lejtőszög térkép, valamint a VESZ alapú talaj- és üledékvastagság mérések helyszínei	67
58. ábra A RESP-12 geoelektromos műszer (Fotó: Czigány Szabolcs)	68
59. ábra A talaj- és termőrétegvastagság meghatározása közben használt eljárások: (a) Stihl BT 360 kézi talajfúró használat közben. (b) Kubota KCR 121 R típusú önjáró fúrógép (c) RESP-12 VESZ kezelőfelülete, (d) multielektrodás szonda kezelőfelülete (e) dinamikus szondázás, (f) fúrásmag-minta a Pósa-völgy É-i részéből, (g) multielektrodás szonda kábelhálózata (fotó: Czigány Szabolcs)	68
60. ábra A főbb fizikai talajféleségek elhelyezkedése a Bükkösi-víz vízgyűjtőjében az AGROTOPO adatbázisa alapján	69
61. ábra A termőtalaj vastagságának térbeli alakulása a Bükkösi-víz vízgyűjtőjében az AGROTOPO adatbázisa alapján	70
62. ábra Fizikai talajféleségek térbeli eloszlása ZALAVÁRI (2008) alapján a Bükkösi-víz vízgyűjtőjében	71
63. ábra A Dél-Dunántúl genetikai talajtérképe, az AGROTOPO adatbázis alapján. A számok az egyes AGROTOPO talajtípus azonosítókat jelöli	72
64. ábra Vízhozam számítás menüpont az Arc GIS programban	74
65. ábra A csapadékesemény beállítása az egyik modellfuttatás esetében az AGWA programban. A legfelső ablakban látható a csapadékesemény lépéseinek száma, a másodikban a csapadékesemény összege, míg a harmadik ablakban a csapadékesemény teljes időtartamát adtam meg.	76
66. ábra Választható kimeneti paraméterek felsorolása az AGWA modellfuttatás után	76
67. ábra A végrehajtás fülben láthatóak az elemzés alkalmával megadott és számított értékek	77
68. ábra Csapadékadatok havi (átlagos) eloszlása a Pósa-völgyben 2011. március és október között	78
69. ábra A mérőpontok havi csapadékösszegeinek az eloszlása, 2011. évben a Pósa-völgyben	79
70. ábra Havi csapadékösszegek (mm-ben) a Pósa-völgyben 2011. március és október között	80

71. ábra A fátlan és az erdővel borított területek havi csapadékösszege (mm). Ez a térképsorozat csak a területi eltéréseket mutatja be a havi csapadékösszegek esetében a Pósa-völgyben 2011. március és november között .....	81
72. ábra A fátlan (a) és az erdővel borított (b) területen hullott havi csapadékösszegek (mm) összehasonlítása. Ebben az esetben egy-egy fátlan és erdővel borított állomások adatait tartalmazó térképpár rendelkezik azonos színskálával .....	82
73. ábra Havi csapadék minimumok és maximumok fátlan (a) és az erdővel borított (b) csapadékadatok (mm) esetében (itt az összes részterképre egyetlen csapadékskála vonatkozik) Ezen jól látható, hogy a legmagasabb havi csapadékösszeget július hónapban mértem a fátlan mérőpontok adatai alapján .....	83
74. ábra Havi átlagos talajnedvességi adatok a Pósa-völgyben 2011. márciustól-októberig .....	86
75. ábra A fátlan (a) és az erdővel borított (b) mérőpontok adatai alapján interpolált havi átlagos talajnedvesség értékek a Pósa-völgyben 2011-ben.....	87
76. ábra Fátlan (a) és az erdővel borított (b) területen rögzített térfogati alapú talajnedvesség tartalom értékek eloszlása 2011. március és október között.....	88
77. ábra Fátlan (a) és az erdővel borított (b) területen rögzített térfogati alapú talajnedvesség tartalom értékek eloszlása 2011. március és október között.....	89
78. ábra Erdővel borított (7.1) és fátlan (7.2) mérőpontokon rögzített 1 perces csapadékinzintitás és a talajnedvesség adatok kapcsolata, a Pósa-völgyben, 2011. június. 20-i csapadékesemény alkalmával.....	90
79. ábra Mérőpontokon rögzített 1 perces csapadékmennyiség és a talajnedvesség adatok kapcsolata, a Pósa-völgyben, (jobb felső sarokban látható a mérőpont azonosítója).....	91
80. ábra A borítottság éves menete a 8. mérőpontra telepített csapadékmérő felett.....	92
81. ábra A borítottság éves különbségei mérőpontonként. A végső újraosztályozási eredményekből néhány irreálisan alacsony értéket (piros karikával jelölve) nem vettem figyelembe a mérőpontok összefoglalásánál (12. táblázat).....	93
82. ábra Az intercepció százalékban kifejezett értékének éves lefutása, a vizsgált időintervallumban, 2011. március és október hónapok között, a Pósa-völgyben.....	95
83. ábra A havi átlagos fedettség és az átlagos havi intercepció (havi és területi átlag) közötti összefüggés 2011 március és október között a Pósa-völgyben .....	96
84. ábra A havi átlagos fedettség és az átlagos havi intercepció (havi és területi átlag) közötti összefüggés 2011 március és október között mérőpontokét (11 db) és a 2 mm-t meghaladó csapadékeseményeként a Pósa-völgyben .....	97
85. ábra Intercepció maximális szélső felső peremfeltételének a meghatározása.....	98
86. ábra A „Canopy ( % )” veszteségi paraméterek (loss method) szerkesztő ablaka a HEC-HMS hidrológiai modellben.....	98
87. ábra Az intercepció arányának változása a csapadékeseményenkénti kumulatív csapadékösszeg függvényében a Pósa-völgyben 2011. március 15. és 2011. május 15 között.....	99
88. ábra A mért csapadékösszegek és a számolt intercepció értékek közötti összefüggések összehasonlítása korábbi kutatások eredményeivel.....	100
89. ábra Az intercepció aránya az átlagos csapadékinzintitás függvényében a Pósa-völgyben 2011. március 15. és 2011. május 15. között .....	101
90. ábra Az intercepció aránya a csapadékeseményenkénti maximális csapadékinzintitás függvényében a Pósa-völgyben 2011. március 15. és 2011. május 15. között.....	102
91. ábra Mért és számolt vízhozamok közötti összefüggés az 5,10, 20, 33 és 100-éves visszatérési idejű tetőző vízhozamok esetében a Bükkösi-vízfolyásra (Szentlőrinc). A Csermák (a), Koris (b), Kollár (c) és a Racionális (d) empirikus számolási módszerek felhasználásával.....	103
92. ábra Mért és számolt vízhozamok közötti összefüggés az 5,10, 20, 33 és 100-éves visszatérési idejű tetőző vízhozamok esetében a Baranya-csatornára (Csikóstóttós). A Csermák (a), Koris (b), Kollár (c) és a Racionális (d) empirikus számolási módszerek felhasználásával.....	104
93. ábra Mért és számolt vízhozamok közötti összefüggés az 5,10, 20, 33 és 100-éves visszatérési idejű tetőző vízhozamok esetében a Karasica-patak (Kátoly). A Csermák (a), Koris (b), Kollár (c) és a Racionális (d) empirikus számolási módszerek felhasználásával .....	105
94. ábra Interpolált talajvastagság térkép, valamint a VESZ mérések helyszínei a Pósa völgyben .....	107
95. ábra Négy VESZ görbe diagramja a Pósa-völgyben elvégzett VESZ mérések közül. Az oszlopszélességekből kivehető, hogy az ellenállás értékek csak diszkrét mélység-intervallumokra határozhatók meg .....	108
96. ábra A talaj szervesanyagtartalma és a feltalaj látszólagos ellenállása közötti összefüggés a Pósa-völgy déli részén található hossz-szelvényében.....	109
97. ábra Néhány GeoS Bt. által a Pósa-völgyben mélyített fúrás 20 centiméterenként vett talajmintái. A maximális fúrástalp az itt bemutatott esetekben 2,2 méter volt. (Fotó: Keresztény Balázs).....	110

98. ábra (a) Átlagos szemcsenagyság, valamint (b) az agyag, iszap és homok frakció %-os aránya 13, a Pósa-völgyben gyűjtött talajminta esetében.....	110
99. ábra Az AGWA modellfuttatás eredménytérképe a Fekete-víz vízgyűjtőjére. Alkalmazott értékek (10 lépés; 52,5 mm, 6 óra, 0,1 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ).....	111
100. ábra Tetőző vízhozam értékek a csapadékösszegek függvényében (nomogram), a leválogatott nagy- és árvízi eseményekre, a Bükkösd-víz (Hetvehely kifolyási pont).....	112
101. ábra A Baranya-csatorna vízgyűjtőjére, AGWA modellfuttatás grafikus eredménye. Alkalmazott értékek (10 lépés; 48,35 mm, 6 óra, és 0,1 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> kezdeti talajnedvességi érték).....	113
102. ábra Tetőző vízhozam értékek a csapadékösszegek függvényében (nomogram), a leválogatott nagy- és árvízi eseményekre, a Baranya csatornára (Csikóstóttós szelvény).....	114
103. ábra A Karasica-patak vízgyűjtőjére, AGWA modellfuttatás grafikus eredménye. Alkalmazott értékek (10 lépés; 52,2 mm, 6 óra, 0,1 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ).....	115
104. ábra Tetőző vízhozam értékek a csapadékösszegek függvényében (nomogram), a leválogatott nagy- és árvízi eseményekre, a Karasica-patak (Kátoly).....	116
105. ábra A Hetvehelyi mellékág alapvízhozam lefutása 2011 március 1 és május 31. között, illetve a 2011. évre vonatkozó vízhozam adatsor (jobb felső sarokban).....	117
106. ábra Az AGWA lefolyási modell futtatás során megadott input csapadékadatok összehasonlítása a mért csapadékadatokkal (Hetvehely állomás), a Bükkösd-vízre. kék vonal az 1:1-es vonal, a vizuális összehasonlíthatóság miatt.....	118
107. ábra Az AGWA lefolyási modell futtatás során megadott input csapadékadatok összehasonlítása a mért csapadékadatokkal (Csikóstóttós állomás), a Baranya-csatornára. kék vonal az 1:1-es vonal, a vizuális összehasonlíthatóság miatt.....	119
108. ábra Az AGWA lefolyási modell futtatás során megadott input csapadékadatok összehasonlítása a mért csapadékadatokkal (Kátoly állomás), a Karasica-patakra. A kék vonal az 1:1-es vonal, a vizuális összehasonlíthatóság miatt.....	119
109. ábra A Pósa-völgyre vonatkozó erdészeti egységek megjelenítése (Forrás: NÉBiH) Számokkal az erdőtag azonosítók, a betűkkel pedig az erdőrészlet látható.....	121
110. ábra A tetőző vízhozam értékek a csapadékösszegek függvényében a Bükkösd-víz (Hetvehely kifolyási pont) nagy- és árvízi eseményekre.....	125
111. ábra A tetőző vízhozam értékek a csapadékösszegek függvényében a leválogatott Csikóstóttós településen nagy- és árvízi eseményekre.....	126
112. ábra A tetőző vízhozam értékek a csapadékösszegek függvényében a Karasica-patak (Villány kifolyási pont) nagy- és árvízi eseményekre.....	126
113. ábra: Pécsi hidrológiai monitoring rendszer. (Szerkesztette: Ronczyk Levente).....	129

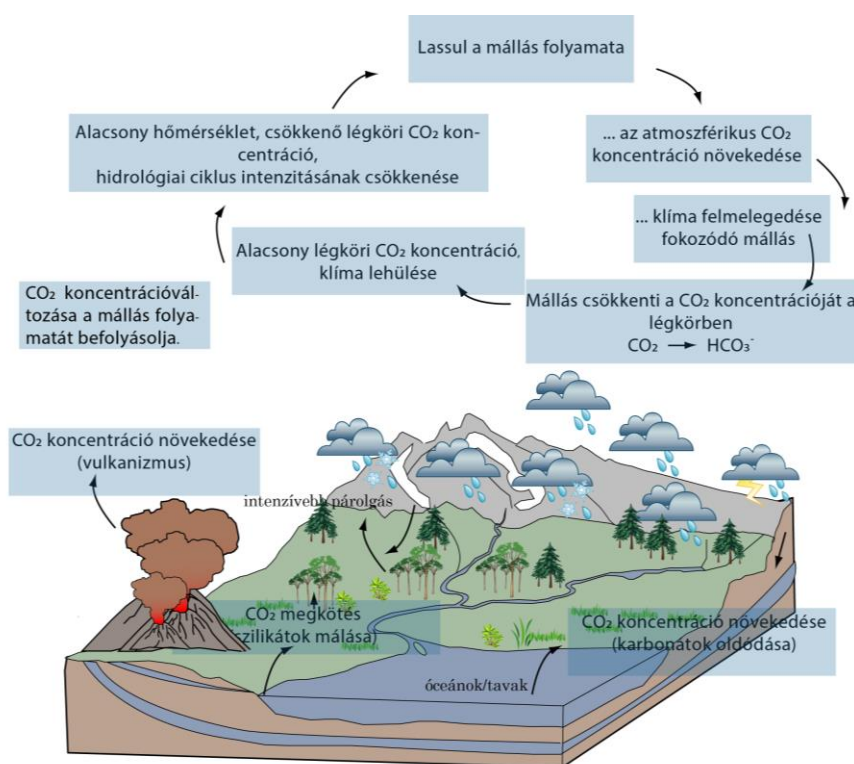


## TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat Villámárvizekre használt angol kifejezések és magyar fordításuk.....	6
2. táblázat Néhány nyitvatermő fajaj által visszatartott csapadékmennyiségek mm-ben kifejezve irodalmi források alapján.....	25
3. táblázat Néhány nyitvatermő és zárvatermő fajaj által visszatartott csapadékmennyiségek százalékban kifejezve irodalmi források alapján.....	26
4. táblázat Néhány lombhullató fajaj es esetében mért víztárolási kapacitás (Keim et al. 2006) alapján .....	26
5. táblázat. A Bükkösd-víz vízgyűjtőjének (Szentlőrinc település felett) főbb domborzati jellemzői (Forrás: mintaterület 10 méteres domborzati modellje alapján).....	37
6. táblázat A Bükkösd-víz és mellékvízfolyásainak magasság, hossz és lejtőszög/meredekség jellemzői (Forrás: a mintaterület 10 méteres domborzati modellje alapján) .....	43
7. táblázat A Bükkösd-víz részvízgyűjtőinek főbb domborzati és hidrometriai jellemzői (Forrás: a mintaterület 10 méteres domborzati modellje alapján).....	45
8. táblázat Vízgyűjtő meghatározásának, leválogatásának a főbb lépései ArcMap szoftverkörnyezetben.....	64
9. táblázat A főbb fizikai talajféleségek területi részaránya a Bükkösd-víz vízgyűjtőjében. ....	69
10. táblázat Magyar genetikai talajtípusokat konverziója a FAO osztályoknak megfelelően (Soil Atlas of Europe 2005 évben kiadott, majd 2015 évben pontosított új WRB osztályozás alapján).....	73
11. táblázat A csapadékesemények mennyiségi eloszlása a lehullott csapadékösszegek alapján a mérőpontok között 2011. évben a Pósa-völgyben .....	84
12. táblázat A leválogatott csapadékesemények (minimálisan 2 mm) összefoglaló táblázata a mérőpontok szerint.....	85
13. táblázat Borítottság adatok összefoglalása a 2011. évre a Pósa-völgyben .....	94
14. táblázat 2 mm-t meghaladó havi csapadékösszegek (mérőpontok átlaga) megoszlása a fátlan és erdővel borított mérőpontok között a Pósa-völgyben, 2011-ig évben gyűjtött adatok alapján .....	95
15. táblázat A statisztikus árvízhozam számítási módszerek számszerű megjelenítése .....	106
16. táblázat Geoelektromos ellenállás alapján meghatározott valamint terepi fúrások által megállapított talaj- és laza üledékvastagságok a Pósa-völgyben.....	108
17. táblázat Az AGWA modellfuttatáshoz szükséges területi (csapadék) szorzó.....	120
19. táblázat A Pécsi hidrológiai monitoring rendszer mérőhelyei.....	128

## 1. Kutatástörténet

A globális klímaváltozás következtében a szélsőséges időjárási események és azok következménye egyre gyakoribbá válnak. Egyes meteorológiai scenáriók szintén pesszimista jövőképeket jeleznek elő. Az Éghajlat-változási Kormányközi Testület (*International Panel on Climate Change*, továbbiakban: IPCC) 2007 évben megjelent IV. jelentése alapján 2020-as évekre egyre nagyobb számban megjelenő és egyre nagyobb károkat okozó árvizek megjelenésétől lehet tartani. Egyes modellfuttatások alapján a 2070-es évekre a hidrológiai ciklus felgyorsulása következtében egyre gyakrabban fognak megjelenni szélsőséges időjárási jelenségek, mint például aszályok, vagy intenzív csapadékesemények. A globális felmelegedés eredményeképpen a hidrológiai ciklus intenzitása feltételezhetően máskor is befolyásolta a földi vízháztartást, s a mállás mértékének növekedésén keresztül negatív visszacsatolási mechanizmust gyakorolt a légköri CO<sub>2</sub> koncentrációra és a Föld globális átlaghőmérsékletére (1. ábra, THOMSON 1997).

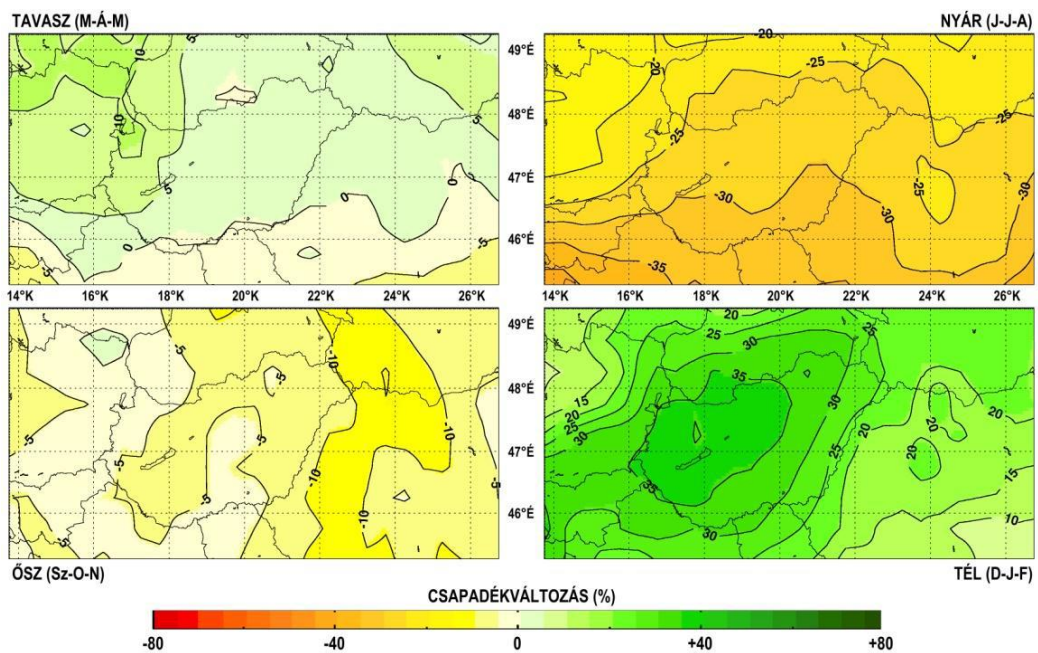


1. ábra Globális felmelegedés hatása a hidrológiai ciklusra és a mállási folyamatokra (Saját szerkeztés)

Az Európai Környezetvédelmi Ügynökség (angolul: *European Environment Agency*, a továbbiakban: EEA) kiadott 2008. évi jelentése alapján, az intenzív csapadékesemények speciális esetekben villámárvizek megjelenését okozhatják, melyek mind az emberi életben,

mind az anyagi javakban jelentős károkat okozhatnak, továbbá a bolygónk felszínformálásban is jelentősen részt vesznek.

A történelmi múltban is voltak szélsőséges időjárási események, ám mégis napjainkban ezeknek az előfordulása egyre gyakoribb, többek között ezekről az eredményekről is olvashatunk az IPCC 2011 szeptemberében megjelent tematikus döntéshozói jelentésében. Igaz, több, ennek a ténynek ellentmondó tanulmány is napvilágot látott (BÖTKÖS 2006, MAGYAR 2013). Az előjelzett hazai éghajlati változások a nyarak jelentős mértékű melegedését és a vegetációs idején belüli csapadékmennyiség csökkenését mutatják (2. ábra, BARTHOLY et al. 2007, GÁLOS et al. 2007).



2. ábra Hőmérséklet-, ill. csapadékváltozás 2071-2100 időszakra az 1961-1990 referencia időszakhoz képest (°C, ill. mm) (forrás: BARTHOLY et al. 2007)

## 1.1. Extrém időjárási események hidrológiai következményei nagy területű vízgyűjtőkön

Az elmúlt évtizedekben hazánkban leginkább a nagyobb folyóink (Duna, Tisza mellett a Rába, a Körösök, a Maros és a Dráva) áradásai okoztak károkat. Jó példa az extrém hidrológiai eseményekre a 2013-ban a Dunán kialakult, minden eddiginél nagyobb árhullám, amikor száz éves vízállás és vízhozam rekordok dőltek meg. Ez az árvíz a Duna magyarországi szakaszán, szinte minden főbb szelvényében megdöntötte az eddigi rekordokat, kivéve a Dunaszekcső alatti szakaszon. Mohácson 20 cm-rel maradt el a legnagyobb vízszint (LNV) értékétől. 2013. június 13-án, 3 és 12 óra között tetőzött a Duna Mohácson (05.01 árvízvédelmi szakaszon, 3. ábra), 964 cm-en. A beosztott műszaki

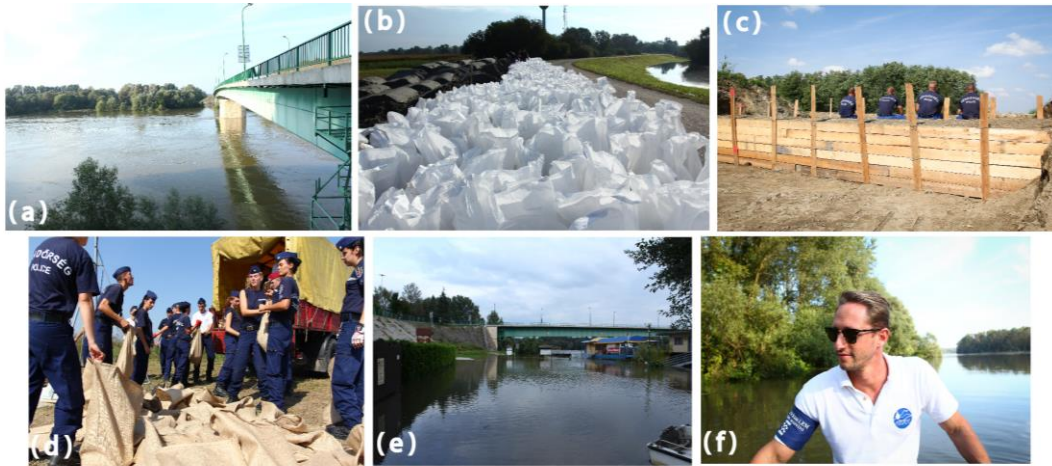
DDVIZIG-es (Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság) kollégákkal együtt jómagam szintén több mint három hetet töltöttem el műszaki irányítóként a 05.01 Mohácsi védelmi szakasz Boki gátörjárásában.



3. ábra A 2013-as Dunai árhullám képes összefoglalója a Mohácsi árvízvédelmi szakaszon (Saját fényképek)

A Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság működési területén található meteorológiai állomásokon, 2014 szeptemberében hozzávetőlegesen 85-201 mm közötti csapadék hullott. A legtöbb csapadék a Balaton déli területei mellett a Dráva-mentén, a Dráva vízgyűjtőjére esett. A védekezés (4. ábra) elrendelésekor LNV-t meghaladó árvízszintet jeleztek elő a modellek. A Dráva Órtilosnál 2014. szeptember 16-án, hajnalban tetőzött 439 cm-rel. Ez 37 cm-rel maradt el a valaha mért legnagyobb vízsztinttől. A folyó Vízvár-Heresznye térségében 17-én délelőtt 806 cm-rel, Barcson 18-án 507 cm-rel érte el a maximumot. Szentborbáson szintén szeptember 18-án 577 cm-rel tetőzött, mely érték 57 cm-rel marad el az LNV-től. A folyó tetőzése Drávaszabolcsnál szeptember 19-én 17:00 órától a vízmérce 586 cm-es szintjén megkezdődött az LNV (597 cm) szintje alatt, és szeptember 20-án 6:00 óráig tartott. A közel három héten keresztül levonuló árhullám alatt, szintén műszaki irányítóként voltam jelen a védelmi szakasz több gátörjárásában.

A Dráva hazai szakaszán a tetőző vízállások csak megközelítettek az eddig mért legmagasabb vízsztinteket. Az utóbbi években több árvízvédelmi fejlesztés is lezajlott a Dráva védvonalán. Az alsó 25 km-es szakaszon – a horvát államhatártól felfelé - az előírt magasságra épült ki az árvízvédelmi töltés. Az elmúlt évek fejlesztései eredményezte az árhullám gátak közötti levonulását, ezáltal a sikeres és eredményes védekezést.



4. ábra Drávai 2014-es árhullám képes összefoglalója a Drávaszabolcsi (05.02) árvízvédelmi szakaszon (Saját fényképek)

A mindennapi gyakorlatban, terepi bejárásokkal, különböző megfigyelések, mérések, számítások alapján, viszonylag egyszerű módszerek alapján meghatározhatóak az árvízi hozamok. Hazánkban több statisztikai elven alapuló árvízszámítási módszer van használatban. Ezeket a módszereket a Budapesti Műszaki Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Intézetében foglalták össze és értékelték. A vizsgálat során a különféle módszerek az általuk szolgáltatott eredmények alapján, illetve az eredmények realitása alapján minősítették. A realitás mértékét 100 darab 30-3000 km<sup>2</sup> közötti vízgyűjtő, továbbá a legalább 10 éves vízhozam adatsorral rendelkező állomásaira állapították meg.

A korábbi kutatások megállapították, hogy a különböző racionális módszerek eredményei nagy szórással rendelkeznek, jelentősen eltérnek. Magyarországon sajnos a hidrometeorológiai mérőhálózat sűrűsége nem megfelelő, vagy legalábbis nem éri el a Nyugat- és Észak-Európai, valamint Észak-Amerikai monitoring sűrűséget. Ezen okból a legtöbb vízfolyás esetében nincs észlelési adat, nincsenek rögzítve a csapadék, lefolyás, talajnedvesség és a vízhozam adatok sem. Észlelés hiányában különféle módszerek segítségével határozhatjuk meg az adott visszatérési idejű mértékadó árvízhozamokat. Ennek egyik legegyszerűbb megközelítési módja, a mérnöki gyakorlatban használt „hidrológiai analógia”. Ennek alapján a közel hasonló nagyságú és domborzatú vízgyűjtő területekről hasonló vízmennyiségek, vízhozamok folynak le. Ez a módszer természetesen csak akkor kerül alkalmazásra, ha már semmilyen, egyéb más metódust sem tudunk alkalmazni. A hegy- és dombvidéken található vízfolyásainak árvízi előrejelzése a legbizonytalanabb. Ez a vízgyűjtőterületek nagyfokú különbözőségére vezethető vissza (eltérő felszínborítás, eltérő társulások).

## 1.2. Extrém időjárási események hidrológiai következményei kisvízfolyásokon

Az extrém csapadékos időszakok egyik legsúlyosabb hidrológiai következménye lehet domb- és hegyvidékeken megjelenő villámárvíz (angolul: *flash flood*). A villámárvizek, vagy más néven gyors lefolyású árvizek megfelelő meteorológiai és hidrológiai hatások együtteseként jöhetnek létre. Az angolszász megfogalmazás szerint: „*too much water in too little time*”, azaz túl sok csapadék, rövid idő alatt. A villámárvizek egyik jellemzője a rendkívül gyors lefutás, általános definíció szerint összegyülekezési idejük kevesebb, mint 6 óra (GEORGAKAKOS 1987; GEORGAKAKOS 2002; GEORGAKAKOS 2006; GEORGAKAKOS és HUDLOW 1984). A Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság területén, elsősorban a domborzatból és a klimatológiai sajátosságokból fakadóan, komoly veszélyforrást jelenthetnek a kisvízfolyások hirtelen áradásai. Azonban az idő előrehaladtával már az emlékeink megfakulnak egy-egy csapadékos napról, esetleg hónapról. Már szinte alig emlékszük valaki a 2010. május, júniusi nagyvizes időszakokra (helyi vízkárok a pécsi Vincze utcában és a Május 1. utcában), pedig csak alig öt éve történtek (5. ábra).



5. ábra Villámárvizek következményei emberi hanyagság következtében Pécsen a Vincze utcában és az Ágoston téren (a, c és d képek) valamint Sásdon (Baranya megye, b kép), 2010 májusában (a, c és d képek: Varga Gábor felvételei; b: Czigány Szabolcs felvétele)

A villámárvizek elsődleges és leggyakoribb kiváltó oka a tagolt felszínre lehulló nagy mennyiségű, jellemzően nagy intenzitású csapadék, de az árvizek kialakulásához számos további természeti és egyes esetekben antropogén vonás járulhat hozzá. Főként a domb- és hegyvidéki kisvízgyűjtők esetében mégis a legnagyobb mértékben csapadékfüggő természeti jelenség. Napjainkban, az előzőekben már említett éghajlatváltozás következtében mind

gyakrabban fordulnak elő szélsőséges meteorológiai események, mint például szupercellák és nagyintenzitású, torrens csapadékok.

A villámárvíz, mint veszélyforrás természetesen nem új keletű jelenség, de fellépésének gyakorisága nagy valószínűséggel nő. Tanulmányozása, kutatása a nemzetközi szakirodalomban is sokkal szegényesebb, mint a nagy folyókon tapasztalható folyóvízi elöntéseké, bár bizonyos országokban (USA, Nagy-Britannia) komoly előrehaladást értek el ezen a téren. Ezt mutatja a villámárvizekre angolul használt kifejezések nagy száma is (1. táblázat).

1. táblázat Villámárvizekre használt angol kifejezések és magyar fordításuk

Angol elnevezés	Magyar terminológia
<i>Flash flood</i>	Villámárvíz
<i>Storm-driven flood</i>	Vihar kiváltotta árvíz
<i>Urban flood</i>	Városi árvíz
<i>Rapid response flood</i>	Rövid reakcióidejű (összegyülekezési idejű) árvíz
<i>Debris flow*</i>	Törmelékfolyás

\*Ugyan nem szinonim kifejezése a villámárvíznek, azonban a villámárvizek sok esetben nagyon sok hordalékot és uszadékot szállítanak, emiatt sokszor nagy sűrűségűek és viszkózusak, innét származik a „törmelékfolyás” kifejezés, lásd pl. <https://www.youtube.com/watch?v=mHJmfySkgMw>)

Az elnevezés angolszász eredete abban is kereshető, hogy elsőként az Egyesült Államok száraz, délnyugati területein található kanyonjaiban (például: Antelope Canyon, Utah állam, 6. ábra) kezdtek el a szakemberek gyakorlati (turisztikai) indíttatásból a villámárvízi előrejelzéseket.



6. ábra Tiltó tábla vihar idejére, a Utah állambeli (Egyesült Államok) Antelope Canyonban (Fotó: Nagyvárad László)

A villámárvizek következménye, a gátszakadások vagy a földcsuszamlások következtében létrejött hirtelen hullámok továbbhaladása, propagálódása. Erre a típusra kiváló példa, a kolontári vörösiszap (angolul: *red sludge*) tároló katasztrófája, ami 2010. október 4-én a Közép-Dunántúlon (7. ábra) történt. Ekkor ugyanis átszakadt a MAL (Magyar Alumínium Termelő és Kereskedelmi Zrt.) tulajdonában lévő Ajkai Timföldgyár Kolontár és Ajka között létesített, 240.000 m<sup>2</sup> alapterületű vörösiszap-tárolójának gátja.

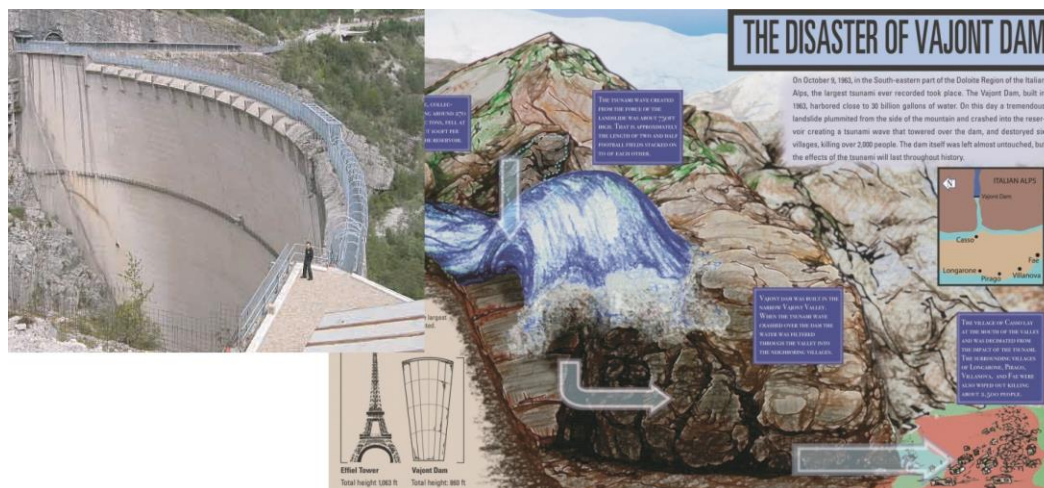




7. ábra A kolontári vörösiszap-katasztrófa során bekövetkezett gátszakadás 2010. október 4.-én. (Tóth Ferenc fotója, Országos Vízügyi Főigazgatóság)

Ugyanehhez a kategóriához sorolható a Vajont víztározó (Veneto tartomány, Olaszország) katasztrófális és tragikus esete (8. ábra). Ebben az esetben völgyzáró gáton átbukó hullám okozta a katasztrófális elöntést a Vajont-gát alatti völgyszakaszon, ami 1963. október 9-én történt. A levonuló árhullám átcsapott a gát tetején (angolul: *overtopping*), 2000 ember halálát okozva az éjszakai órákban a völgy alsó szakaszán.

Éghajlatunk ingadozásához köthetően, a hirtelen árvizeket egyre inkább az jellemzi, hogy nem évszakfüggőek. Marchi (2010) szerint például a mediterrán-hegyvidéki területeken leggyakrabban ősszel jelennek meg. Óceáni éghajlat alatt megjelenésük kevésbé valószínű, mégis az egyik legjobban dokumentált villámárvíz az Egyesült Királyságbeli Boscastle-ben következett be, 2004. augusztus 16-án. Hazánkban azonban tavasz elejétől az ősz végéig bármikor bekövetkezhetnek és nincsenek biztosan megjósolható időszakok, amikor megtörténhetnek. Az évszakok közötti határok elmosódása következtében egyre gyakrabban jelennek meg hirtelen árvizek a tél végi, tavasz eleji heves esőzésekkel együtt meginduló hóolvadás következtében (PIRKHOFFER et al. 2008). Az impermeábilis felszínek nagy aránya szintén hozzájárulhat a villámárvizek kialakulásához lakott területeken (COBBY et al. 2008; GYENIZSE 2009).



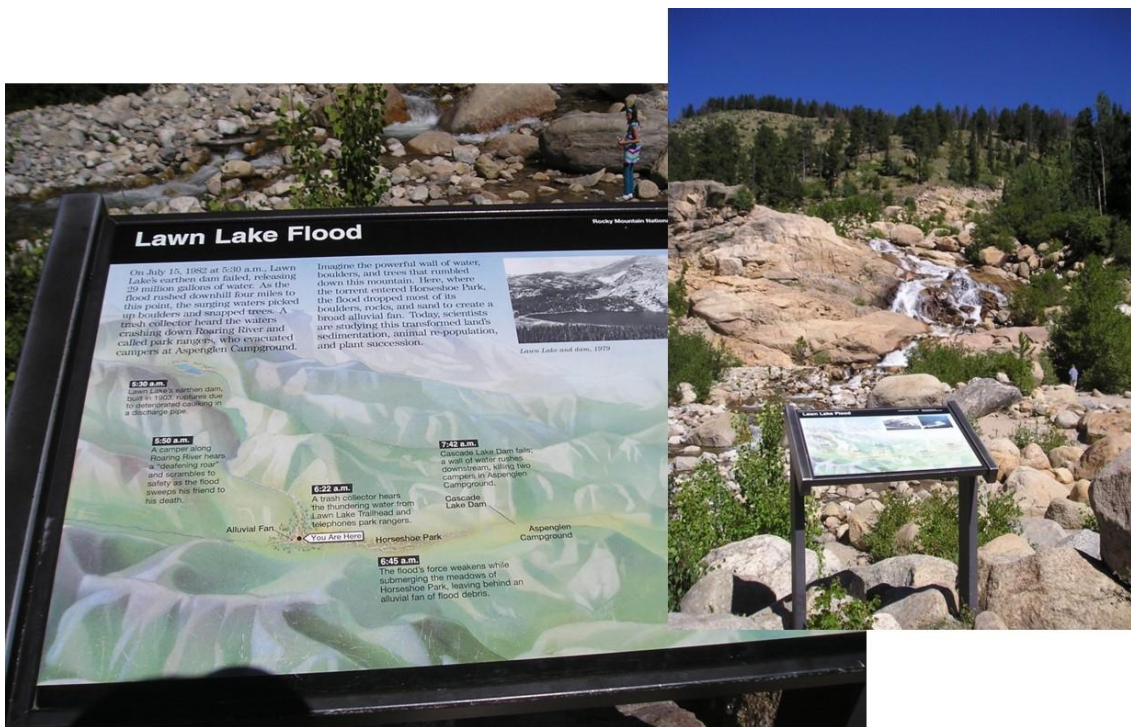
8. ábra A Vajont víztározó katasztrófája 1963. október 9.-én, valamint maga a gát 2005-ben (bal oldali kép) (Forrás: <http://www.archingsm.org> )

Nemzetközi viszonylatban a villámárvizek vizsgálata, kutatása, előrejelzése több évtizedes múltra tekint vissza (GRUNTFEST 1977; 1987; SENESI et al. 1996, CARPENTER et al. 1999, SCHMITTNER és GIRESSE 1996). A villámárvizek tanulmányozása, a peremfeltételek kutatása és részletes vizsgálata Európában már több országban is előrehaladott állapotban van (GAUME et al. 2009). Az Egyesült Államokban hosszú, több évtizedes múltra tekint vissza a jelenség kutatása, leírása és tanulmányozása, illetve a numerikus modelleken alapuló előrejelző rendszer kiépítése (GEORGAKAKOS 1986). Az Európai Unió Környezetvédelmi Hivatala szerint az árvizek a legnagyobb gazdasági károkat okozó természeti jelenségek Európában. 1998 és 2002 között körülbelül 100 jelentősebb árvíz mintegy 700 halálesetet és 25 milliárd Eurós kárt okozott, valamint mintegy 25 000 ember kitelepítését eredményezte. Habár a károk jelentős részét nagy folyókon megjelenő, úgynevezett „hagyományos” árvizek okozták, azonban árvizek mind gyakrabban jelennek meg hegy- és dombvidéki kisvízfolyásokon, melyeknek az átlagos vízgyűjtője mindössze 10-100 km<sup>2</sup>.

A jelentősebb, részletesen dokumentált villámárvízi események közül, a teljesség igénye nélkül említésre méltó, az Egyesült Királyságban Boscastle villámárvize, ami 2004. augusztus 16-án történt (9. ábra), vagy az Egyesült Államokban, Colorado államban a Thompson Canyon és Lawn Lake villámárvize (10. ábra).



9. ábra A 2004. augusztus 16.-i villámárvízi esemény képei Boscastle, Egyesült Királyságban  
(Forrás: <http://www.dailymail.co.uk/>)



10. ábra A Lawn Lake gátszakadás eredményeként létrejött villámárvízének emléktáblája a Rocky Mountains Nemzeti Parkban Colorado állam, Egyesült Államok (Fotó: Czigány Szabolcs)

### 1.3. Villámárvizek Magyarországon

Nagycsapadékok által kiváltott villámárvizek mind gyakoribbak nem csak világszerte, de Magyarországon is. Ilyen hazai példa, amiről írásos emlékünks van, 1878. augusztus 31-én hajnalban a Szinva és a Pece patakon történt (HOITSY 1878, RÉTHLY 1998, BABOS 1960, BORBÉLY 1980), s néhány óra alatt csaknem teljesen elpusztította Miskolc belvárosát. Az árvíz 277 emberéletet követelt és emberek ezreit tette földönfutóvá. Az 1878. évi katasztrófa előtt Miskolcon nem voltak ritkák az árvizek, azonban ahhoz hasonló pusztítást talán csak az 1691. évi árvíz okozott. Pusztításának nagysága ellenére a történelmi dokumentumokból kitűnik, hogy a két patak áradása külön ment végbe és így is rendkívüli károkat okozott. Miskolcot több mint egy tucatszor sújtotta komolyabb árvíz. Ezek az árvizek a mai mederben lefolyva, néhány kivétellel (ilyen az 1691-es, az 1878-as és talán az 1845-ös), már semmilyen gondot nem jelentenek. Az 1879. évi Szinva és Pece szabályozás előtt viszont még nagymértékben befolyásolták a város életét, és nem egy esetben hatalmas rombolást vittek végbe. Az árvizeket követően szinte minden alkalommal előkerült a vízfolyások medreinek rendezése, de különböző okoknál fogva általában csak kisebb, általában elodázhatatlan szabályozási munkákat végeztek el.

A Vértes-hegységben az Által-ér elöntötte a patak völgyet, előzményként 253 mm csapadék hullott a vízgyűjtőre 1953. június 4-én (SZILÁGYI 1954). Az utóbbi idők legnagyobb, villámárvizek okozta gazdasági kárt Mátrakeresztesről (11. ábra) jelentették 2005. április 18-án, amikor a Csörgő és Kövecses patakok áradtak meg és öntötték el a település alsó részét (HORVÁTH 2005).



11. ábra Villámárvizek következményei Mátrakeresztesen (2005. április 16-án) és Nógrádszakálon (jobb alsó ábra) 2010-ben (Forrás: Nógrád Megyei Katasztrófavédelmi Hivatal)

A kiragadott példák sorát természetesen és sajnos lehetne még folytatni. Szinte mindegyik felsorolt eseményben közös a vízfolyás melletti területek gyors beépítése, a szilárd burkolatú felszínek megnövekedése, továbbá a vízgyűjtő területhasználatának a változásai. A villámárvíz kialakulásában a csapadék intenzitása meghatározóbb, mint önmagában csak a csapadék mennyiségének az ismerete. A már említett, 2010 májusában és júniusában valamint, 2014 augusztusában történt helyi vízkárok Pécsen (és általában az országban) felhívták a figyelmet arra, hogy a tavaszi-nyári időszakban egyre gyakrabban fordulnak, fordulhatnak elő extrém csapadékmennyiségek.

Napjainkban, az intenzív csapadékesemények által kiváltott árhullámok kevésbé okoznak problémákat a folyókon, mivel a teljes vízgyűjtőterületre ritkábban hullik területi átlagban nagycsapadék, nagy intenzitással. A kisvízfolyások medrének befogadóképessége sokkal kisebb, ezáltal nagyobb problémát okozhat a kisvízgyűjtőre hulló lokális nagycsapadék.

#### 1.4. Elöntések és dokumentált történelmi helyi vízkárok a Bükkösdi-víz vízgyűjtőjén

Dél-Dunántúlon, illetve Pécs környékén az utóbbi évtizedben több alkalommal is voltak villámárvíz jellegű árvízi események. Számos ház és a vasúti töltés egy szakaszát sodorta el a Bükkösdi-víz árvize 1987. június 27-én, Hetvehelyen, a Nyugat-Mecsekben, amikor 6 óra alatt 71-88 mm csapadék hullott (ESZÉKY 1987; ESZÉKY 1992; GYENIZSE és VASS 1998). A legnagyobb károkat Hetvehely község nyugati részéről jelentették (12. ábra), közvetlenül a Sás- és Bükkösdi-patakok összefolyásától felfelé.

A Bükkösdi-völgy felső szakaszán található települések többször is elöntésre kerültek, amióta különféle feljegyzések a rendelkezésünkre állnak. Ezek az árvizek helyenként jelentős károkat okoztak: 1967. július 10-én, Hetvehelyen (12. ábra) tíz, az Okor-patak völgyében pedig négy épület dőlt össze a villámárvíz következtében. Az 1900 előtti időszakból, néhány kivételtől eltekintve, megbízható, árvízzel kapcsolatos leírások nem állnak rendelkezésünkre. Két feljegyzés 1733-ból és 1840-ből számol be jelentős árvíz okozta károkról (VASS 1997).

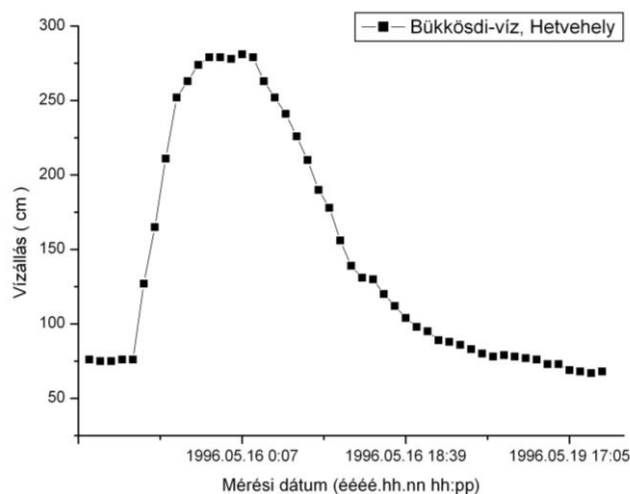


12. ábra A Bükkösdi-víz Hetvehelynél, 2011. szeptember (Saját fotó)

Az utóbbi beszámoló szerint Hetvehely település mintegy egy harmada elöntés alá került. A vízhozamot rendszeresen 1951 óta mérik Hetvehely település nyugati végében. Azóta hét jelentősebb árvízi eseményt regisztráltak a Bükkösdi-vízen, amely mind Hetvehely, mind Bükkösd településen károkat okozott.

Jelentősebb károkat okozó árvizeket figyeltek meg 1954. július 1-én, 1959. július 31-én, 1967. július 10-én, 1987. május 6-án, 1987. június 27-én és 1996. május 16-án (VASS 1997). Ezeket a villámárvízi eseményeket mindig nagy intenzitású csapadékok váltották ki, amikor a csapadékeseményt megelőzően a talaj nedvességtartalma is magas volt. Mindegyik esetben a napi csapadékmennyiség meghaladta a 60 mm-t, a csapadékesemények hossza pedig többnyire 1 és 3 óra között változott. Az árvizek összegyülekezési ideje viszonylag rövid volt, 1 és 5 óra közötti időtartamú (ez megfelel a villámárvizek definíciójának, lásd pl. GEORGAKAKOS 1986, GEORGAKAKOS 2006, GEORGAKAKOS és HUDLOW 1984.), ami nagyon rövid időelőnyt jelentett a károk megelőzésére illetve a lakosság figyelmeztetésére. Domborzati adottságaiknak köszönhetően a legnagyobb elöntések Bükkösd és Hetvehely településeket érintették (VASS 1997, ESZÉKY 1987, GYENIZSE és VASS 1998.).

A Hetvehelyt és Bükkösdt érintő árvízi károk legfontosabb környezeti tényező következményei: (a) szűk völgy keresztmetszet, (b) vízfolyások találkozási pontjai (Bükkösdi-víz, Hétméhekvölgyi, Nyáras- és Okorvölgyi-patak), amelyek visszaduzzasztó hatásuk következtében okozhatnak elöntéseket. A Bükkösdi-víz völgyének szélessége néhány helyen Bükkösd felett nem haladja meg a 200 métert sem, míg Bükkösdtől délre a völgy tölcsérszerűen kiszélesedik 800-900 méteres szélességre: itt a völgy árvizek által már nem veszélyeztetett. Ezek a tényezők, főként Hetvehely térségében nagyon gyorsan emelkedő vízszintű árvizeket eredményeznek. 1996-ban például a rendkívül aszimmetrikus árvízi hullámgörbe áradó ága mindössze 6 percig, míg az apadó ága 3,5 óráig tartott. A 2007. június 27.-i árvíz során a vízszint 10 perc alatt 1 métert emelkedett (13. ábra). A fent említett árvízi események közül két esetben a tetőző vízhozam 4 méterrel haladta meg a vízfolyás medrének magasságát (1967. július 10. és 1987. június 27.).



13. ábra 1996. májusi árvízi hullámgörbe a Bükkösdi-víz alsó vízgyűjtőjén (Hetvehely, DDVIZIG adatai alapján.)

Figyelembe véve azt, hogy Hetvehely térségében a vízfolyás medre mintegy 2,5-3 méternyire vágódik be a környező területekhez képest, tetőző vízhozamok esetében a terület, illetve Hetvehely legalacsonyabban fekvő részei mintegy 1-1,5 méteres víz alá is kerülhetett. VASS (1997) szerint, tagolt domborzatnak és a meredek völgyfalaknak köszönhetően a Sás-patak az egyik legjelentősebb okozója a Bükkösdi-patakon észlelt árvizeknek.

2010. május-júniusában, a Zsófia-ciklon következtében, szintén rendkívüli helyi vízkáresemények voltak a Dél-Dunántúlon. 2010 májusában a Mecsek felett egy heves, intenzív csapadékesemény alakult ki, 72 óra alatt 155 mm csapadék hullott (RONCZYK és CZIGÁNY 2013). A Mecsek és sok más hegység esetében is, konvektív feláramláskor, az orografikus hatások intenzívebbé, hevesebbé tesznek egy-egy csapadékeseményt (GERESDI 1999, SHARIF et al. 2005, MARCHI et al. 2010). A területen található kirtikus kockázati pontok (BALATONYI et al. 2013a) az alábbi képeken láthatóak (14. ábra).



14. ábra Fotódokumentáció a Bükkösdi-víz kitüntetett pontjain, nagyvíz idején. A Bükkösdi-víz mentén: (a) műút hídja Bükkösdi alatt, (b) Bükkösdi-híd, (c) vasúti töltés a vízfolyás közvetlen szomszédságában, (d) épületek Hetvehelyen a vízfolyás közvetlen közelében, a hetvehelyi iskola és a Kővágószőlős felé vezető út között, (e) a Bükkösdi-víz és a Hétméhekvölgye-patak összefolyása (Fotók: c: Cser Valéria, a, b, d, e: Czigány Szabolcs)



## **1.5. A klasszikus nagyvízi árvizek és kisvízfolyások árvizei közötti különbség**

Az már az első megközelítésben is szembeötlő, hogy komoly különbségek vannak a hagyományos folyami árvizek és a villámárvizek megjelenésében, lefolyásában és ezzel összefüggésben előrejelzésük módjában is (GRUNTFEST és RIPPS 2000). A leglényegesebb különbség, hogy a villámárvizek előrejelzéséhez figyelembe vett vízgyűjtő területek nagysága többségében  $200 \text{ km}^2$  alatt van, tehát akár több nagyságrenddel kisebb, mint a folyami árvizek modelljeiben. A területkülönbségből fakadó, következő legfontosabb különbség az összegyülekezési és a levonulási időben tapasztalható: a klasszikus folyami árvizek napos, több napos időintervallumával szemben a villámárvizek esetében nagyon rövid reakcióidőről (szakszóval: összegyülekezési idő, angolul *time of concentration*) beszélünk (GEORGAKAKOS 1986). Ez nagyban megnehezíti a gyors előrejelzést és a hatékony védekezést. A rövid reakcióidő miatt, valamint monitoring rendszer hiányában nehéz pontos képet kapnunk az esemény lefolyásáról. Ilyen esetben a folyamat terepi megfigyelésére szorítkozhatnánk, azonban sok esetben az előrejelzés és helyszínre érkezés közötti időszakban már rég lejátszódott a villámárvíz. Ilyenkor csak a kártétel mértékéből, nagyságrendjéről tudjuk rekonstruálni a maximális vízhozam nagyságát. A villámárvizek vízállás és vízhozam ingadozása óriási, utóbbi több nagyságrendet is elérhet. Villámárvizek gyakran jellemzők az efemer, időszakos vízfolyásokra, sok esetben a teljesen száraz völgyek torrens vízfolyásokká válnak néhány percen belül. Ezért fontos az adatok rögzítése, a környezeti monitoring, lehetőleg minél sűrűbben, illetve az adatok *online* elérhetősége.

## **1.6. A lefolyást befolyásoló környezeti tényezők a hidrológia ciklusban**

A disszertációmban elsődlegesen az intercepció és a csapadék lefolyásra és villámárvizekre gyakorolt hatásával foglalkozom, ezért a Bevezetés következő alfejezetében röviden tárgyalnám a lefolyásra (illetve tágabban a hidrológiai ciklus intenzitására) hatást gyakorló környezeti elemeket, valamint az intercepció fogalmát tisztáznám, illetve áttekintem annak kutatási előzményeit. A felszíni lefolyást, a hidrológiai ciklus egyik szerves elemét, talajtani jellemzők befolyásolják (15. ábra). A numerikus alapú csapadék-lefolyás modellekben meg is kell adni a talajra vonatkozó adatokat. Ezek meghatározzák a lefolyást, vagy éppen a beszivárgást szabályozó tényezőket (GRUNTFEST és RIPPS 2000).



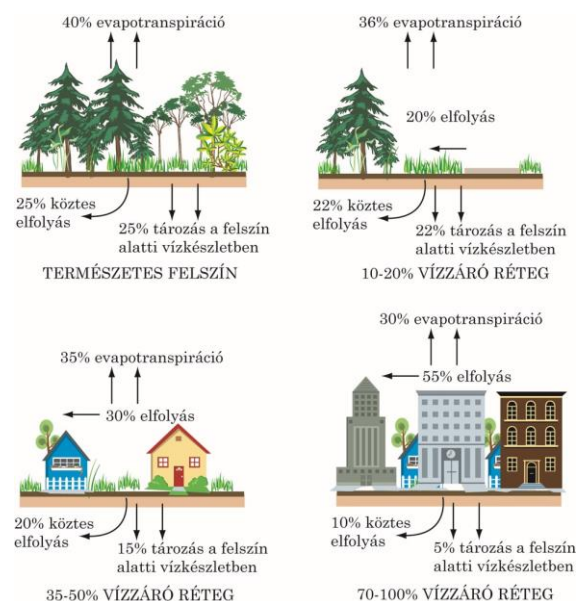
15. ábra A hidrológiai ciklus elemei, illetve a globális vízforgalom. A tározókban levő vízmennyiség  $\text{km}^3$ , míg a nyilak mentén található számok víztranszportot, fluxust jelölnek,  $\text{km}^3\text{év}^{-1}$  mértékegységben. (Davidson et al 2002 ábrája alapján)

A villámárvízi események döntő többségénél a domborzat hatása kulcsfontosságú, pontosabban annak tagoltsága és lejtőszög értéke jelentősen befolyásolja a tározás és lefolyás arányát. A talajtani tényezők közül a talajnedvesség (talaj előáztatása) szintén jelentős hatást gyakorol a beszivárgás és felszíni elfolyás arányára (TROMP-VAN MEERVELD és McDONELL 2006). Azonban a talaj nedvességtartalma, mind térben, mind időben jelentősen változhat (BROCCA et al. 2012, SVETLITCHINYI et al. 2003, COSH 2004, 2006, HEATHMAN et al. 2012). Nagy tér- és időbeli heterogenitása miatt azonban nagyon bizonytalan bemeneti paraméterről van szó, ami problematikus a különféle hidrológiai és lefolyási modellek esetében, emiatt számtalan szerző vizsgálta ezt a tényezőt, valamint a talajnedvesség számítására képes modelleket is fejlesztettek. Ilyen modell pl. a HYDRUS programcsalád (bővebb információ, az alábbi oldalon <http://www.pc-progress.com/en/Default.aspx?hydrus-1d>), pl. ŠIMŮNEK et al. 2008). A pontosabb bemeneti adatok elérése érdekében a lefolyást meghatározó talajtani és hidrometeorológiai paraméterek rendszeres mérése (lehetőség szerint távmérős eszközzel) és monitorozása szükséges, valamint numerikus modellezése elengedhetetlen része egy adatbázisokon alapuló villámárvíz előrejelző rendszernek.

A megváltozott felszínhasználat nagy befolyással van a városi klímára (KERLE és ALKEMA 2012). Mind a talaj, mind a felszínhasználat területi arányainak változása urbánus területeken jelentősen megnövelheti a felszíni lefolyást és párolgást, azonban csökkentik a talajban történő nedvességtározást. Ilyen folyamatok idézik, idézhetik elő a városi árvizeket

(16. ábra). A csatornahálózat kiépítése, hidak, belterületi csapadékvízvezető árkok nagy szerepet játszanak a lefolyás szabályozásában (RONCZYK et al. 2012). Az urbanus területeken a jelenleg érvényben lévő Vízkárelhárítási szabályzat nem tesz különbséget a települések morfológiai vagy szerkezeti jellege, mint például egy alföldi, vagy egy hegy- és dombvidéki területen elhelyezkedő település között. Hasonlóképpen, a mai napig megoldásra várnak a településeken található közművekhez kapcsolódó problémák, például az intenzív csapadékeseményekre való méretezés.

Egy vízgyűjtő erdőszültségi fokának nagy hatása van a hidrológiai ciklus legtöbb elemére (pl. intercepció, párolgás, lefolyás, talajvíz-utánpótlás), ezáltal az erdőborítottság nagy vízgazdálkodási jelentőséggel bír (HEWLETT 1982, SZÁSZ és TŐKEI 1997, VIG 2000, 2002). A lombkoronára hulló csapadék egy része közvetlenül párolog a légkörbe, miközben aktív hőháztartási kölcsönhatás zajlik a légkör és az erdőfelszín között (DELFS 1955, FÜHRER 1994, SZÁSZ és TŐKEI 1997, KUCSERA 1998, DINGMAN 2001). Az erdők párologtatása a nagyobb vízigény (levélfelületen történő párolgás) és mélyebb gyökérzet miatt általában nagyobb, mint a lágyszárú vegetációé. A felszíni és felszínalatti lefolyást az erdők jelentősen csökkentik (16. ábra), ezáltal a csapadék hasznosulását javítják (ÚJVÁRI 1980, FÜHRER 1981, SITKEY 1989, MANNINGER 2007).



16. ábra Városi árvizek kialakulása a felszínhasználat változása következtében a hidrológiai ciklus több eleme is megváltozik (Saját szerkesztés, Davidson et al 2002 ábrája alapján)

## 1.7. Az intercepció szerepe a hidrológiai ciklusban

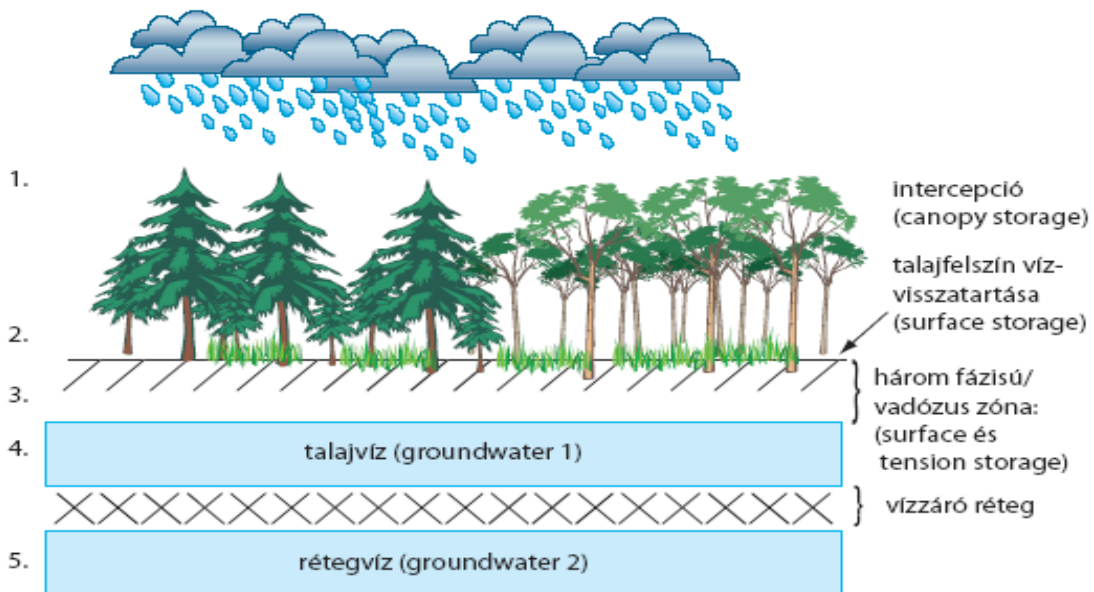
A hirtelen árvizek előrejelzésének és minél nagyobb időelőny elérésének egyik fontos befolyásoló tényezője a növényzet vízvisszatartó képessége, az intercepció (BALATONYI et al.

2012a). A csapadék újból elpárologhat és közvetlenül visszajuthat a légkörbe, emiatt néhány hidrológiai alapirodalom úgy tünteti fel, mint a növényzet felületéről elpárolgó vízmennyiséget (STELCZER 2000, SHUTTLEWORTH 2012).

Az intercepció késlelteti a csapadék felszínre jutását. A csapadék lehullását (a felső lombkoronaszint elérését) követően alapvetően öt veszteségi szintet (17. ábra) lehet elkülöníteni. Ezek a szintek az alábbiak:

1. lombkoronaszint
2. talajfelszín
3. talaj/vadózus/háromfázisú zóna
4. talajvíz
5. legfelső rétegvíz

A csapadék-lefolyás programokban (17. ábra) (pl. HEC-HMS, MIKE11) a veszteségi paraméterezés első lépése az intercepció elemzése (CZIGÁNY et al. 2010). Ebben meghatározható a tárolási deficit vagy más szóval a lombkorona víztelítettsége, amelynek értékével a csapadék felszínre hullásának idejét késlelteti a program. Az erdők, az intercepció következtében jelentős szerepet játszanak a lefolyás mérséklésében, illetve a tetőző árhullám tompításában és késleltetésben. A felszíni elfolyás nagyságát ugyanis nem csak a csapadék és a domborzat, hanem a talaj és felszínborítás (pl.: vegetáció és lombkorona fedettség) is befolyásolja. Ezek a környezeti változók jelentős szerepet játszanak a beszivárgás, illetve a felszíni lefolyás arányának alakulásában, ezért fontos meghatározni, az előzőekben említett két folyamat arányát és nagyságát (GRUNTFEST és RIPPS 2000).



17. ábra A csapadék intercepció, visszatartás és késleltetés öt helyszíne a HEC-HMS csapadék-lefolyás numerikus modell veszteségi moduljaiban (Saját szerkeztés)

A lombkoronaszinten fennmaradó víz mennyiségének a nagyságára bőséges számú irodalmi adat létezik (pl.: BALATONYI et al. 2012b, LINK et al. 2004, KEIM et al. 2006). Ezen korábbi vizsgálati adatok alapján általában elmondható, hogy a nyitvatermő fajok több víz tárolására képesek, mint a lombhullató fajok.

A lehulló csapadék ( $P$ ) egy része átesik a lombozaton ( $T$ ), majd lejut és beszivárog a talajba, majd innen válik felvehetővé a növények számára. A csapadék többi része, amikor a csapadék meghaladja az adott helyen a maximális tározási kapacitást a levelekről lehullva ( $D$ ) szintén eléri a talajt. A csapadék többi része vagy megkötődik a levelek felületén és részben elpárolog ( $S$ ), vagy a törzs felületén lefolyik ( $S_F$ ), vagy a még tartó csapadékesemény ideje alatt elpárolog ( $E$ ) (1. egyenlet).

$$P = T + D + S_F + S + E \quad [ 1 ]$$

Ezen összefüggés hátránya, hogy az intercepciót nem folyamatában határozza meg és figyelmen kívül hagyja a kiválás, kicsapódás, vagy a hócsapadékból kifésülés útján keletkezett többletsapadékot (FÜHRER 1992).

FÜHRER (1994) cikkében is találkozhatunk az intercepciós nyereség megfogalmazásával, ami alatt a szerző a kicsapódás, kiválás által létrejövő csapadéktöbbletet érti. Az intercepció nagysága lombkorona esetén az alábbi képlet segítségével számolható ki (2. egyenlet):

$$S + E = E_{su} + P - T_h - S_F \quad [ 2 ]$$

ahol:

$S$  = a tározási kapacitás

$E$  = a csapadékesemény közben elpárolgott mennyiség

$E_{su}$  = a lombkorona intercepciója (mm).

$P$  = a csapadék

$T_h$  = az áthulló csapadék

$S_F$  = a törzsön lefolyó csapadékmennyiség

Az intercepció fogalmát az egyes szerzők, a tudományterülettől függően, sokféleképpen definiálták (3. egyenlet). A lefolyással, hidrológiával foglalkozó tanulmányok, mint a jelen disszertáció is, egyféle, a hidrológiai cikluson belül megjelenő, veszteséggént értelmezik (LEONARD 1967).

$$I = S + E \quad [ 3 ]$$

ahol:

$I$  = az intercepciós veszteség

$S$  = az elpárolgott, elpárologtatott csapadékmennyiség

$E$  = a csapadékesemény közben elpárolgott mennyiség

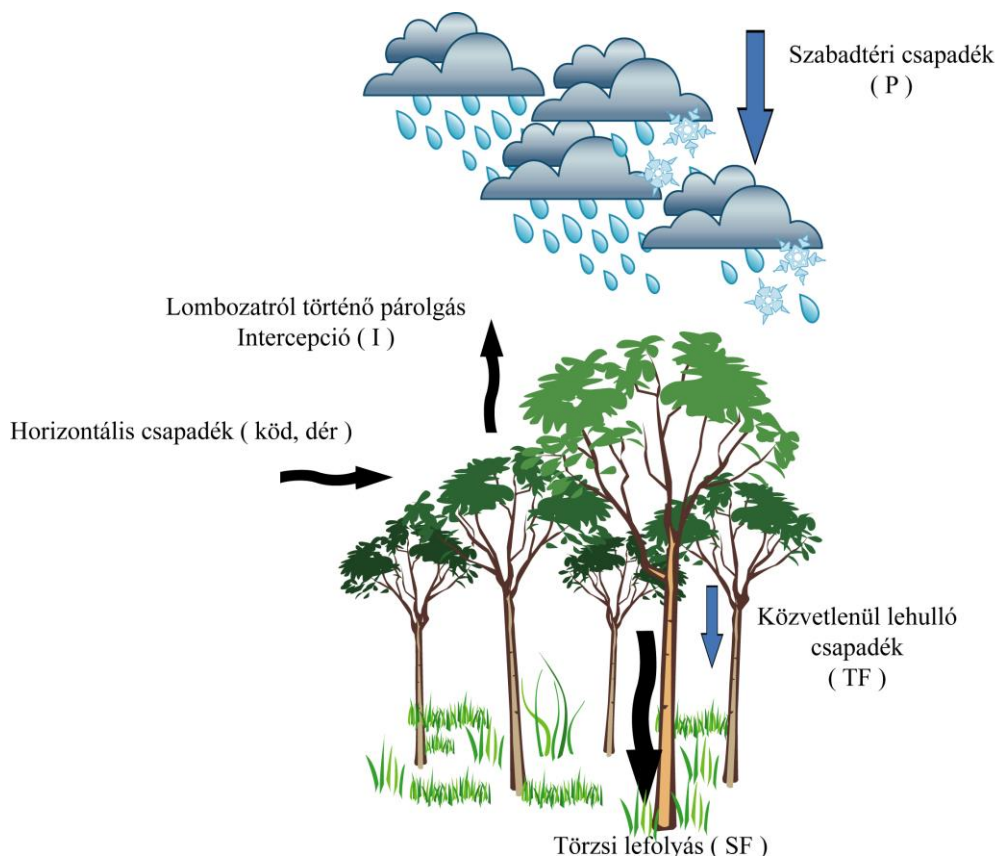
A botanikusok értelmezése szerint ez a nedvesség azonban pozitívum, mivel ez a vízmennyiség a levelek benedvesítésére szolgál, hozzájárul a növények vízfelvételéhez és komfortzónájának megtartáshoz is (pl. óriás mamutfenyők esetében szükséges a magas légnedvesség). A csapadékeseményt végét követően a párolgás ugyanis megnő, így a víz egy része visszajut a légkörbe (HORTON 1919; DELFS 1955) vagy adszorbeálódik a növények levelén (SIMONFFY 1978; FÜHRER 1994). A csapadék egy része azonban tovább juthat a talajfelszínre, vagy közvetlenül, vagy törzs menti lefolyás következtében. A talajra jutó

csapadék több tényezőre bontható, mint pl. beszivárgásra (talajban történő tározás), párolgásra, vagy ami a jelen esetben legfontosabb, a lefolyásra (4. egyenlet).

$$P = T_F + S_F + I \quad [ 4 ]$$

A lombkorona feletti és a talajt elérő csapadék aránya számos környezeti és fizikai tényező függvénye. Ilyen tényező például a lombkorona fedettsége (sűrűsége), a csapadék mennyisége és intenzitása, valamint egyéb hidrometeorológiai körülmények, többek között a léghőmérséklet, szél és a relatív páratartalom.

Az intercepció egyedileg eltérő a növények között, de a tenyészidőszakon belül is változik a nagysága. A csapadékeseményhez köthető aktuális mennyiség a csapadék mennyiségének a növekedésével egy bizonyos értékig, az előző mondatban említett küszöbértékig nő. A csapadék mennyisége, általánosan a kisebb mennyiségű csapadék esetén, a lombkorona benedvesítésére fordítódik. Általánosságban elmondható, hogy a 2 mm alatti csapadék nem jut át a lombkoronán a vegetációs időszakban (KUCSARA 1996). A csapadékesemény időtartamának a növekedésével az intercepció százalékos aránya csökken, az abszolút mértéke pedig a meghatározott küszöbértékig nő, az felett pedig változatlan marad (HORTON 1919).



18. ábra Az intercepció folyamata STAELENS (2008) nyomán

Több szerző is készített empirikus alapú egyenleteket a csapadékösszeg és az intercepciós hányad (%) közötti összefüggésre (pl. HORTON 1919, HORTON és MERRIAM 1960, FÜHRER 1992). Több szerző többféleképpen, többféle egyenlet típussal írta le a csapadék visszatérési folyamatot, a legtöbbet alkalmazott lineáris modell a HORTON (1919) szerinti (5. egyenlet):

$$E_{su} = S + R \times E_i \times t \quad [ 5 ]$$

ahol:

$E_{su}$  = a korona intercepciója (mm)

$S$  = a növényzet potenciális tározási kapacitása (mm)

$R$  = a jellemzett terület növényzetfelületének az aránya (dimenzió nélküli szám)

$E_i$  = a növényzet felületegységének a párolgási intenzitása (mm h<sup>-1</sup>)

$t$  = a csapadék időtartama (h)

Horton lineáris alapú egyenletét természetesen az eltelt közel száz év alatt többen is tovább fejlesztették. LINSLEY et al. (1949) exponenciális alapon közelítették meg a jelenség matematikai leírását (6. egyenlet).

$$E_{su} = (S + K \times P) (1 - e^{-c^{-1} P^{-1}}) \quad [ 6 ]$$

ahol:

$E_{su}$  = a korona intercepciója (mm)

$S$  = a növényzet potenciális tározási kapacitása (mm)

$K$  = a csapadékesemény alatti párolgás és a szabadtéri csapadék aránya (dimenzió nélküli szám)

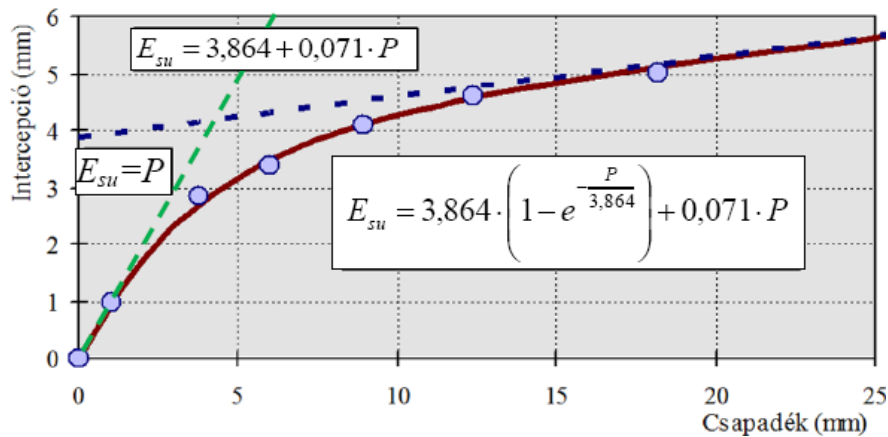
$P$  = a csapadék mennyisége (mm)

$c$  = állandó (dimenzió nélküli szám).

MERRIAM (1960) szerint a csapadékesemény ideje alatt potenciálisan létrejehető párolgást nem szükséges exponenciális függvénnyel leírni (7. egyenlet).

$$E_{su} = S (1 - e^{-c^{-1} P^{-1}}) + K \times P \quad [ 7 ]$$





19. ábra HORTON és MERRIAM függvényének összefüggése egy fiatal lucfenyvesre alkalmazva (KUCSARA et al. 2012)

Természetesen két adott csapadékesemény között eltelt idő és hidrometeorológiai tényezők (páratartalom, hőmérséklet, légmozgás) is befolyásolják az intercepció nagyságát. Például, ha még nem teljes mértékben történt meg a felületről történő párologás, akkor már csak kisebb mennyiségű csapadék tud tárolódni a levelek felületén. Száraz felületen történő tározási kapacitás így nagyobb, mint a nedves vagy félig nedves felületen, felületeken (ZENG et al. 2000). JÁRÓ (1980) szerint az intercepciót a csapadék intenzitása befolyásolja leginkább.

Az intercepció által visszatartott csapadék mennyiségének meghatározását már számtalan szerző elvégezte (FÜHRER 1992, KOLOSZÁR 1980, KUCSARA 1996, KUCSARA-VIG 1995, MÓRICZ et al. 2009). Azonban, az intercepció olyan vízgyűjtő specifikus változó, amelynek megállapítását minden modellezési (ebben az esetben lefolyási modell) eljárás előtt szükségszerű elvégezni. Sok esetben például kevés adat áll rendelkezésre arról, hogy milyen összefüggés létezik a lombzat ciklikus változása és az aktuális árvíz mértéke és az árhullám képe között.

FÜHRER (1992) lucfenyőben állományban az alábbi egyenletet javasolta a vegetatív időszak intercepció általi vízvesztésének kiszámolására (8. egyenlet):

$$I_c = 0,058P_g + 0,912n \quad [ 8 ]$$

ahol:

$I_c$  = a lombkorona által visszatartott csapadék mennyisége mm-ben

$P_g$  = a vegetatív időszakban hullott csapadék mennyisége mm-ben

$n$  = pedig a csapadékesemények száma.

## 1.8. Lombkorona vízvisszatartó képessége

Az intercepció nagysága egyedileg jellemző és eltérő a különféle fajok esetén. JÁRÓ (1980) nemes nyárasokban végzett ilyen jellegű vizsgálatokat, ahol az intercepció nagyságát 25-28 %-ban állapította, meg míg ezüst hárs esetén ugyanez az érték 28%-os, akác társulásokra (laza lombzat) pedig 30% volt. Vöröstölgyesek esetében 33-36% volt az intercepció megállapított értéke (JÁRÓ 1980). Ezt a nagyobb értéket a második lombkorona szinttel és a fajlagosan nagyobb levelekkel magyarázta a szerző.

A fenyőfélék nagyobb levélfelületük miatt 5-10 %-kal nagyobb mennyiségű csapadékot képesek tárolni a felületükön, mint a lomblevelű társaik (JÁRÓ 1980, FÜHRER 1984, KUCSARA 1996). A legjellemzőbb szakirodalmi értékeket 2. és 3. táblázat tartalmazza.

2. táblázat Néhány nyitvatermő fajjal által visszatartott csapadékmennyiségek mm-ben kifejezve irodalmi források alapján

Fafaj (magyar név)	Fafaj (tudományos név)	Tárolt vízmennyiség (mm)	Irodalom
Douglas-fenyő	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2,7-4,3	LINK et al. (2004)
Douglas-fenyő	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	1,2	RUTTER et al. (1975)
Douglas-fenyő	<i>Pseudotsuga menziesii</i>	2,4	KLAASSEN et al. (1998)
Fekete fenyő	<i>Pinus nigra</i>	1,0	RUTTER et al. (1975)
Erdei fenyő	<i>Pinus sylvestris</i>	1,02	GASH et al. (1980)
Erdei fenyő	<i>Pinus sylvestris</i>	0,8	GASH és MORTON (1978)
Szitka luc	<i>Picea sitchensis</i>	kb. 2,0	HUTCHINGS et al. (1988)
Szitka luc	<i>Picea sitchensis</i>	0,75	GASH et al. (1980)
Szitka luc	<i>Picea sitchensis</i>	1,2	GASH et al. (1980)

ROWE (1983) déli bükk (*Nothofagus fusca*) esetén, megkülönböztetett téli és nyári intercepciós veszteséget, 22%-os téli és 35%-os nyári értékkel. A fedettség időbeli változása miatt különbséget kell tenni a lombosodás előtti, valamint a lombos állapotban mért intercepciós értékek között. Ezt vizsgálta JUSTYÁK (1989) kocsányos tölgyre, aki 32%-os téli és 40-50%-os nyári értékeket kapott.

SILVIA-OKUMARA (1996), alacsony, 18%-os értéket mért intercepcióra, 60 éves fehér tölgy állomány esetén. KONTUR et al. (2001) eredményei alapján a fedettségtől függően 0,3-6,5 mm vízvisszatartással számoltak csapadékeseményenként. A legtöbb irodalmi adat alapján egyszeri, 5-10 mm nagyságrendű csapadékesemény felett, már gyakorlatilag konstans a csapadék-visszatartás értéke. Több éves átlagos értéket tekintve pedig a szerzők többsége 20-30%-ban határozta meg az éves intercepciós arány értékét (3. táblázat). A

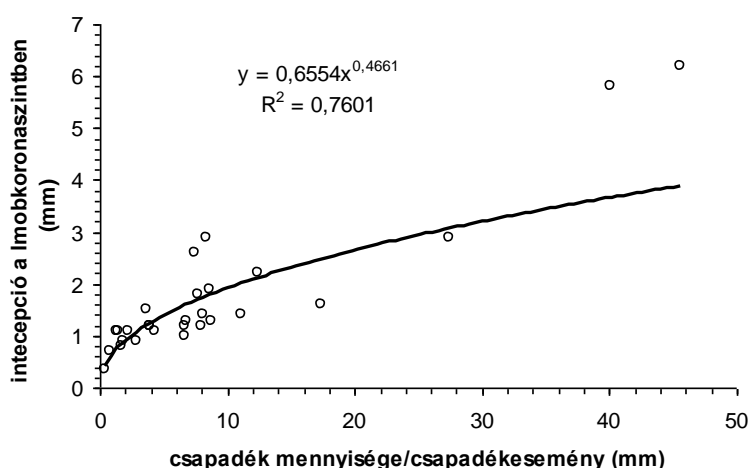
lombkoronaszintben tárolt csapadék mennyiségét nem csak az esemény csapadékösszege, hanem a csapadékintenzitás is befolyásolhatja (4. táblázat).

3. táblázat Néhány nyitvatermő és zárvatermő fafaj által visszatartott csapadékmennyiségek százalékban kifejezve irodalmi források alapján

Hivatkozás	Intercepció mértéke éves szinten	Megjegyzés
HERBST et al.	29 / 20%	Lombozat / lombozat nélkül, Anglia
RUTTER et al. 1971	25-50%	Nyitvatermő
ROWE 1983	10-35%	Lombhullató – déli bükk ( <i>Nothofagus</i> )
NIZINSKI és SAUGIER 1989	28-33%	Bükk ( <i>Fagus sylvatica</i> )
GASH et al. 1980	23-28%	Bükk ( <i>Fagus sylvatica</i> )
JOHNSON 1990	33-35%	Bükk és gyertyán ( <i>Carpinus betulus</i> )
ROSENQVIST et al. 2010	30-40%	Nyitvatermő társulás ÉNy-Európa
GÁCSI 2000	36%	Lombhullató, Magyarország
FÜHRER 1992	16%	Bükk ( <i>Fagus sylvatica</i> ) Magyarország
FÜHRER 1992	23%	Kocsánytalan tölgy ( <i>Quercus robur</i> )
FÜHRER 1992	36%	Lucfenyő ( <i>Picea abies</i> )

4. táblázat Néhány lombhullató fafaj es esetében mért víztárolási kapacitás a csapadékintenzitás függvényében (Keim et al. 2006 alapján)

Fafaj	Tárolt vízmennyiség (mm) adott csapadékintenzitás esetében (mm h <sup>-1</sup> )		
	20	60	250
Oregoni juhar ( <i>Acer macrophyllum</i> )	0,12 – 0,20	0,17-0,21	0,25-0,29
Vörös éger ( <i>Alnus rubra</i> )	0,17-0,26	0,19-0,27	0,27-0,28
Szőlőlevelű juhar ( <i>Acer circinatum</i> )	0,15-0,18	0,19-0,22	0,25-0,28



20. ábra Az intercepció mértékének (mm) változása a beérkező csapadék függvényében lombhullató elegyes, kutatási célokra szolgáló erdőben; fafajok: vörös tölgy (*Quercus rubra*), cukorjuhar (*Acer saccharum*), amerikai bükk (*Fagus grandifolia*), vörös tölgy (*Acer rubrum*), fehér köris (*Fraxinus americana*) és amerikai hárs (*Tilia americana*). PRICE, E. G. és CARLYLE-MOSES (2003) alapján

A csapadék megjelenési formája is nagyban befolyásolja az intercepció nagyságát. Túlevelű növények esetében az átlagos intercepciós képesség nagyobb a hó esetén, mint esőnél (LEE 1980). A fenyőfélékre vonatkozó megfigyelések alapján a lombzat nagy mennyiségű havat képes visszatartani (STROCK 2002, 21. ábra).



21. ábra Hó intercepciója ezüstfenyő (*Picea pungens*) alatt (Fotó: Czigány Szabolcs)

HEAL et al. (2004) egy közel negyven éves szitka luc fenyő állománnyal (*Picea sitchensis*) betelepített kisvízgyűjtőn vizsgálták az intercepció megoszlását. Éves szinten 37 %-os intercepciós veszteségről számolnak be, vizsgálataikban a mikrocsepdek bevitelét is mérték, ahol a szakirodalomban a fajra jellemző 35-40%-os értéknél jóval nagyobb intercepciót állapítottak meg.

## 1.9. Numerikus modellezés lehetőségei a villámárvizek előrejelzésében

A villámárvizek előrejelzése nagyon nehéz és bizonytalan, mivel számtalan környezeti paraméter befolyásolja kialakulásukat. A villámárvizek előrejelzésnek egyik lehetséges módja a numerikus lefolyási modellek előrejelzésén alapszik. Azonban ezek a modellek nagy mennyiségű, mért, vagy függvények segítségével előállított bemeneti adatot igényelnek. Magyarországon a legjelentősebb problémát az előrejelzések megalkotásánál az jelenti, hogy nincs megfelelő térbeli sűrűségű vízállás, vízhozammérés, valamint nem áll rendelkezésre megfelelő hidrometeorológiai (csapadék, talajnedvesség) mérőhálózat a kisvízfolyásoknál. Korábbi kutatások eredményei alapján (PIRKHOFFER et al. 2009) egy jól működő előrejelző

rendszer felépítéséhez többek között a talajnedvességi adatok nagy sűrűségű, gyakoriságú (időben és térben) tanulmányozása is szükséges a folyamat parametrizációjához.

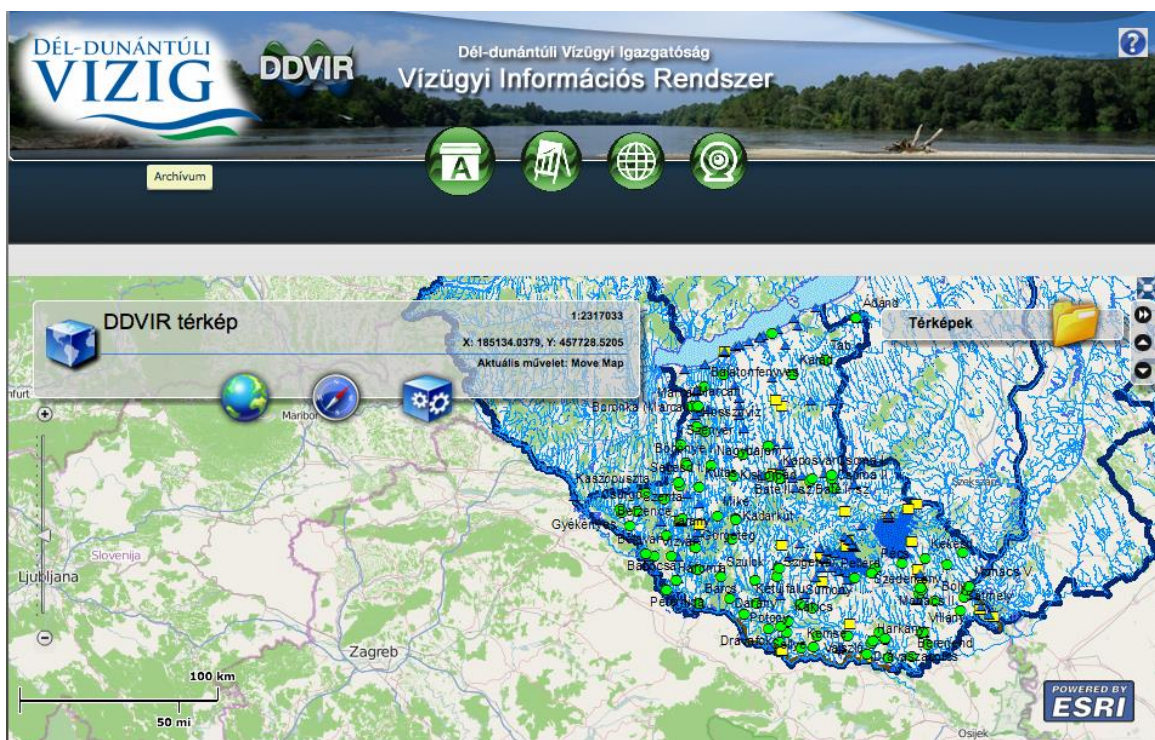
A villámárvizek előrejelzésének egyik lehetséges megoldása a numerikus lefolyási modellek használata, melyek valós idejű (*real-time*) adatokat használnak fel bemeneti paraméterként. A veszélyeztetett területek kijelölésére, a hirtelen események modellezésére, előrejelzésére használható modellek nagyon sokféle megközelítésűek lehetnek: statisztikai, térinformatikai és bonyolult numerikus modellek. A modellek mindig a valóság leegyszerűsítései, ezért az előrejelzések sohasem teljesen biztosak, de validációval pontosabbá tehetők.

A gyors elemző („*rapid screening*”) modelleket különböző természeti katasztrófák bekövetkezési helyszíneinek szűkítésére alkalmazzák. Jó áttekintő képet, veszélytérképet (*Risk Map*) biztosít a szakembereknek és a nem szakember döntéshozóknak egyaránt, a megelőzés, ill. a szükséges beavatkozások helyszíneinek kijelölésében. A kutatás fontosságát és aktualitását demonstrálja az előző évtizedben egyre gyakrabban megjelenő extrém csapadékterhelés. A nagyobb mennyiségű és intenzitású csapadék sokszor konvektív, néha több napig is kitartó csapadékokat követő árvizek rámutattak, hogy a hegy- és dombvidéki patakok is katasztrófális elöntésekre képesek. A kártételének nagyságrendje közel azonos lehet a nagyobb folyókon tapasztalttal (2010. május és június: Sásd, Csikóstóttós, Szekszárd stb.) A kutatáshoz szervesen kapcsolódik a hegy- és dombvidéki tavak, árvízcsúcs csökkentő tározók villámárvíz szempontú vizsgálata, mert egy esetleges tározó szakadás további katasztrófális elöntésekhez vezethet. Ugyancsak a kutatás időszerűségét mutatja, hogy a MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) műholdas monitoring hálózat elemzései szerint a nagy folyókon megjelenő árvizek után a leggyakoribb árvízi események torrens, szupercellákból származó nagy intenzitású csapadékokból jönnek létre.

Ehhez egy új, minden eddiginél részletesebb, mérőállomások adatsorainak statisztikai elemzése szükséges, továbbá esetlegesen új mérőállomások telepítésére való javaslattétellel lehet finomítani, pontosítani a jelenleg érvényben lévő árvízhozam számítási módszereket. Ezek a módszerek viszont alkalmassá válhatnak, akár néhány óra alatt, egy dombvidéki vízfolyás bármely pontján, a legfrissebb mérési adatokra, adatsorokra támaszkodva, a lehető legtöbb passzív paraméter figyelembe vétele mellett a mértékadó árvíz meghatározására.

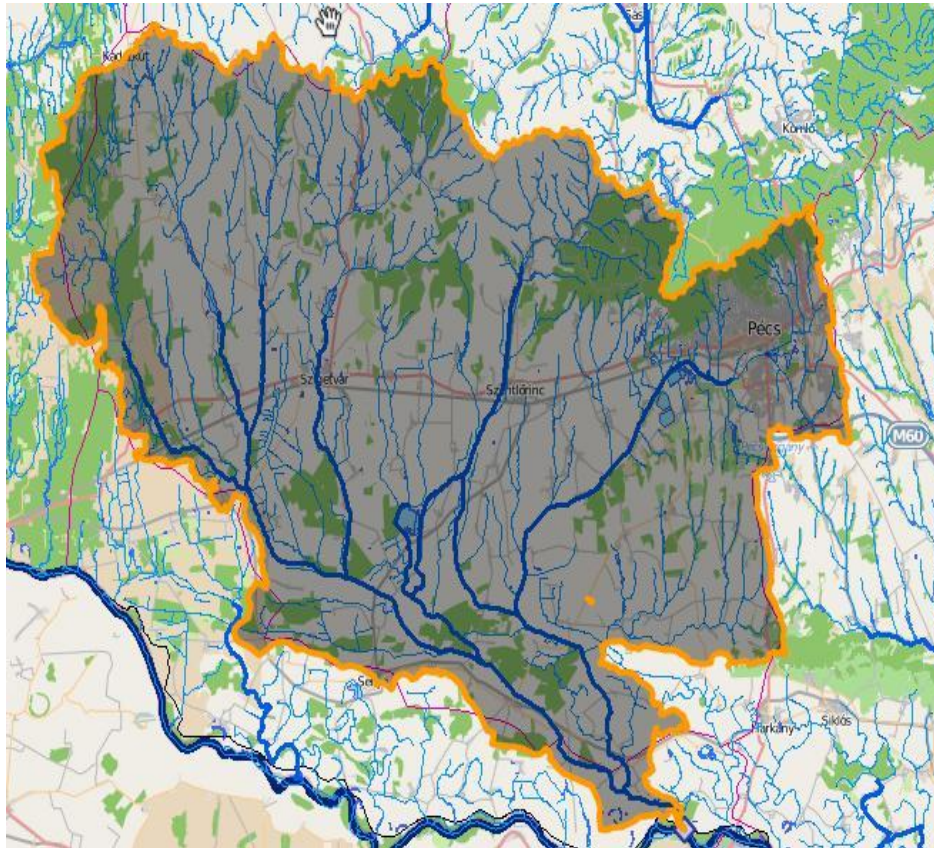
## 1.10. Jelenleg működő Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság Vízügyi Információs Rendszer (DDVIR) bemutatása

Jelenleg is van egy működő rendszer, amit használnak a vízügyi szakemberek a hidrográfiai, hidrológiai információk megosztására, az a DDVIZIG esetében a DDVIR nevű program (22. ábra). A rendszer jelenlegi, statikus formájában nem képes online előrejelzési adatok közlésére, azonban az aktuális mért adatok (pl. vízállás) kiolvashatóak a térképi alapú adatbázisból. A DDVIR több modullal is rendelkezik: karbantartási, vízkészlet-gazdálkodási és webkamera beépülő funkciókkal. A doktori disszertációm témájához a vízkészlet-gazdálkodási modul szervesen kapcsolódik..



22. ábra A DDVIR felhasználói felülete

Jelenleg az Igazgatóság M 1:10 000 méretarányú digitalizált raszteres alaptérképet használ a program vízhálózati alaptérképek. Vízyűjtők, rész-vízyűjtők is lehatárolhatóak (23. ábra) a jelenleg használt rendszerben. Vízyűjtők lehatárolása a digitális domborzati modell (10 m × 10 m) alapján történik. A modul a vízhálózat bármely 100 méterenkénti szelvényére képes a terepmodell felhasználásával vízyűjtő lehatárolást készíteni egy speciális program segítségével. A DDVIZIG területe nagy része dombvidéki, ahol terepmodell alapján nem okozott gondot a vízyűjtők lehatárolása, ilyen gondok alapvetően csak a Dráva síkján fordultak elő.



23. ábra Fekete-víz vízgyűjtőjének a lehatárolása a DDVIR-ben

### 1.11. *Online* előrejelző rendszer kiépítésének lehetőségei a Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság működési területén található vízfolyásokra

Ahogy az az előző alfejezetben már taglaltam, a DDVIR rendszer nem képes *online* előrejelzési információk közzlésére. Országos szinten előrejelzéseket a Hydroinfo ([www.hydroinfo.hu](http://www.hydroinfo.hu)) oldalon található. Az OVSZ (Országos Vízjelző Szolgálat) által üzemeltetett oldal, előrejelzési információikat tartalmaz a magyarországi folyókra, nagyobb vízfolyásokra. Ebből következik, hogy nem tartalmaznak viszont előrejelzéseket a kisvízfolyásokra vonatkozóan. Igazodva a hivatalból érdekeltek valamint a veszélyeztetett területeken élők tájékoztatási szükségleteire, igény lenne, egy a kisvízfolyásokat is magába foglaló *online* előrejelző rendszer kiépítésére.

A kisvízgyűjtőkön található vízfolyások előrejelzéshez egy potenciális numerikus modell (szoftver) lehet a GIS rendszeren alapuló vízgyűjtő értékelés (AGWA- *Automated Geospatial Watershed Assessment*) és előrejelzési modul. Az AGWA egy többfunkciós vízgyűjtő elemző hidrológia (statisztikai alapú) modell. A modell kétfajta megközelítést alkalmaz az elemzésekre, a SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) és a KINEROS (*Kinematic and Runoff and Erosion modell*) modelleket. A KINEROS a kinematikus hullám

elvét alkalmazza, elsősorban kis vízgyűjtőkre (Yang és Li 2011). A SWAT modell egy komplex, elméleti, hidrológiai, félig osztályozott modell területileg világos parametrizációval. A Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság részt vett egy már lezárt Közép- és Dél-Európai országokat magába foglaló (*Central Europe*) projektben (résztevő országok: Németország, Ausztria, Olaszország, Lengyelország és Magyarország). A projekt neve: „The INARMA Project” volt, amiben az INARMA akroníma, az „*Integrated Approach to Flood Risk Management on Small Catchments*” kifejezésből származott (magyarul: Árvízi kockázatkezelés egységes megközelítése kisvízgyűjtőkön). Az INARMA projekt az EU által nemrég kiadott direktívákat próbálja gyakorlati útra terelni, a legutóbbi a 2007. október 23-i 2007/60/EC direktíva, mely az árvízi kockázat értékelésével és kezelésével foglalkozik. A direktíva különös figyelmet szentel a jelenleg zajló éghajlatváltozás okozta szélsőséges eseményeknek (árvizek, illetve aszály) a különböző régiókban. A projekt folytatásának a szükségességét indokolja az, hogy a valószínűsíthető éghajlatváltozás miatt elkerülhetetlen az árvízi előrejelző rendszerek kiépítése, fejlesztése az összes hazai Vízügyi Igazgatóság működési területén. A DDVIZIG működési területe, Baranya, illetve Somogy megyében található, amely közel 10.000 km<sup>2</sup> kiterjedésű területet jelent. A működési terület fő befogadói - Duna, Dráva, Balaton. A vízfolyáshálózat sűrűsége 1,17 km km<sup>-2</sup>. A jelenleg kezelésben lévő vízfolyások hossza közel 4200 km, amelynek 60%-a dombvidéken helyezkedik el. A dombvidéki területek belterületi részein, mind gyakrabban és gyakrabban jelentkeznek elöntések. Ezen okokból kifolyólag, a város, településvezetés, illetve a lakossági oldalról is érkezik az az igény, hogy szeretnének egy megfelelő biztonságú tájékoztatási rendszerhez hozzájutni. Az INARMA 1. projekt eredményeiből látható, hogy a Bükkösi-víz vízgyűjtője további hidrológiai, hidraulikai és domborzati elemzéseket igényel. Az Igazgatóság működési területén a Bükkösi-víz mellett, a Baranya-csatornán, illetve a Karasica-patak vízgyűjtőjén találkozhatunk még a domborzat és a vízhálózat jellegéből adódó elöntési és árvízi problémákkal (SZLÁVIK, 2007). Az igazgatóság hidrológiai és domborzati adottságaiból fakadóan más hasonló és a Dél-Dunántúlra reprezentatív vízgyűjtőterületeket is szeretnénk bevonni az elemzésekbe az INARMA 2 projekt esetében (CZIGÁNY és PIRKHOFFER 2013). Természetesen a jelenlegi finanszírozási környezetben, ez nem oldható meg az állam által nyújtott fejlesztési pénzekből, egyéb források bevonása szükséges. Az előző projekt összköltsége összesen 1 millió Euro volt, a résztvevő hat projekt partnerre. A DDVIZIG jelenleg a “START - *Danube Region Project Fund*” támogatási rendszer anyagi támogatását használja fel az *online* monitoring hidrometeorológiai rendszer kiépítési lehetőségeinek felméréséhez.



## 2. Célkitűzések

A jelen dolgozatban az alábbi célokat, illetve vízgyűjtő szintű hidrológiai problémák vizsgálatát tűztem ki:

1. Csapadék és talajnedvesség adatok közötti összefüggések vizsgálata erdővel borított és fátlan mérőpontok esetében
2. A lombkorona fedettség éves lefutásának meghatározása egy, a Nyugat-Mecsekben található kisvízgyűjtő esetében, valamint az eredmények felhasználhatóságának vizsgálata más hasonló környezeti adottságokkal rendelkező közép-európai kisvízgyűjtőkre
3. Az intercepció nagyságának meghatározása egy, a Nyugat-Mecsekben található kísérleti vízgyűjtőn, az eredmények összehasonlítása korábbi irodalmi adatokkal
4. Szemi-empirikus, vízgyűjtőspecifikus, talajparaméterezettségű nomogrammok kialakítása a gyors árvízhozamszámítás elősegítéséért az AGWA numerikus modell alkalmazásával.

### **3. Eszközök és módszerek**

Az eszközök és módszerek első fejezeteiben bemutatásra kerül a kiválasztott ultra kisméretű vízgyűjtő (1,7 km<sup>2</sup>) természetföldrajzi és környezeti jellemzőit, a vízgyűjtőterület sajátosságait és hidrogeográfiai jellemzői. A vízgyűjtőt elsősorban a múltban bekövetkezett, továbbá a jövőben is várható helyi vízkáresemények miatt választottuk ki. A terület dombvidéki és középhegységi jellegéből fakadóan a villámárvízi veszélyeztetettsége nagy, illetve a terepi bejárások is könnyebben voltak megvalósíthatóak, mint egy távolabbi mintaterület esetén. Továbbá a kísérleti vízgyűjtő reprezentatívnak tekinthető a Magyarországon található középhegységi, többségében erdősült vízgyűjtők lefolyási viszonyaira.

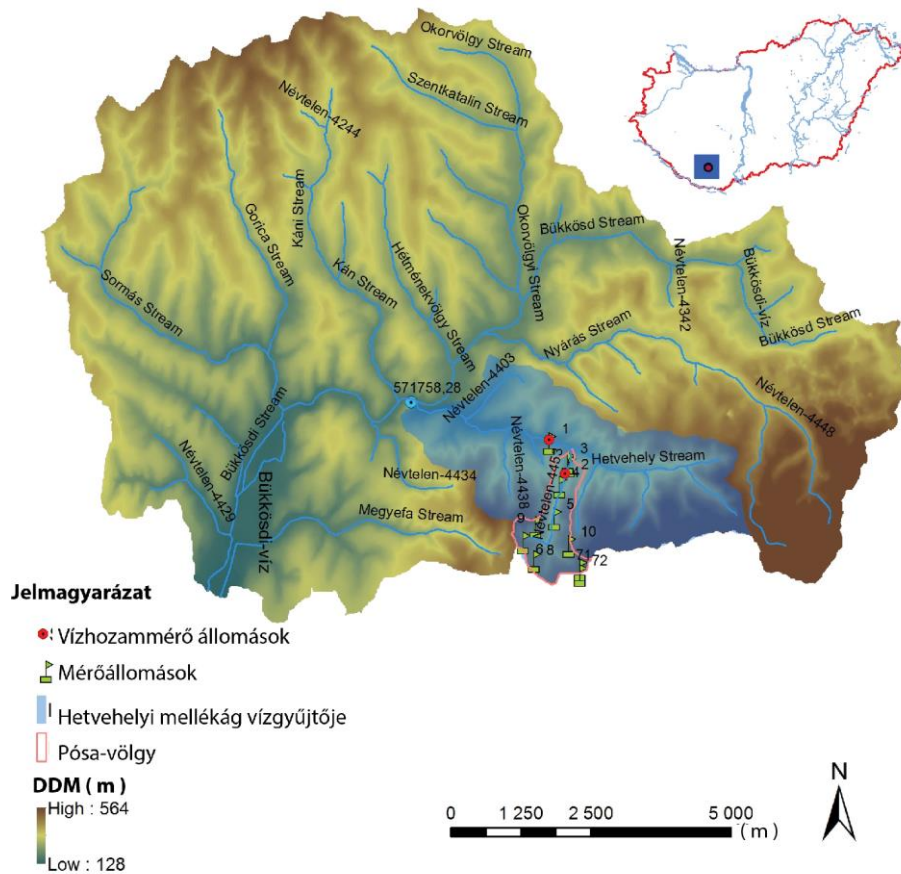
Az általános leírás után a mintaterületen üzemeltetett monitoring rendszert mutatom be, majd végül az adatok feldolgozási módszereit a térinformatikai rendszer (ArcGIS) alá beépülő, AGWA modul alapján.

#### **3.1. A Bükkösdi-víz, illetve a felső vízgyűjtőjén elhelyezkedő Pósa-völgy bemutatása**

A Bükkösdi-víz vízgyűjtője két részre bontható: egy síkvidéki és egy dombvidéki jellegű területre. A jelen alfejezetekben a felső, Bükkösd település feletti szakasz részletesebb vizsgálatával, vízgyűjtő lehatárolásával és ezen a területen rögzített adatokkal foglalkozom.

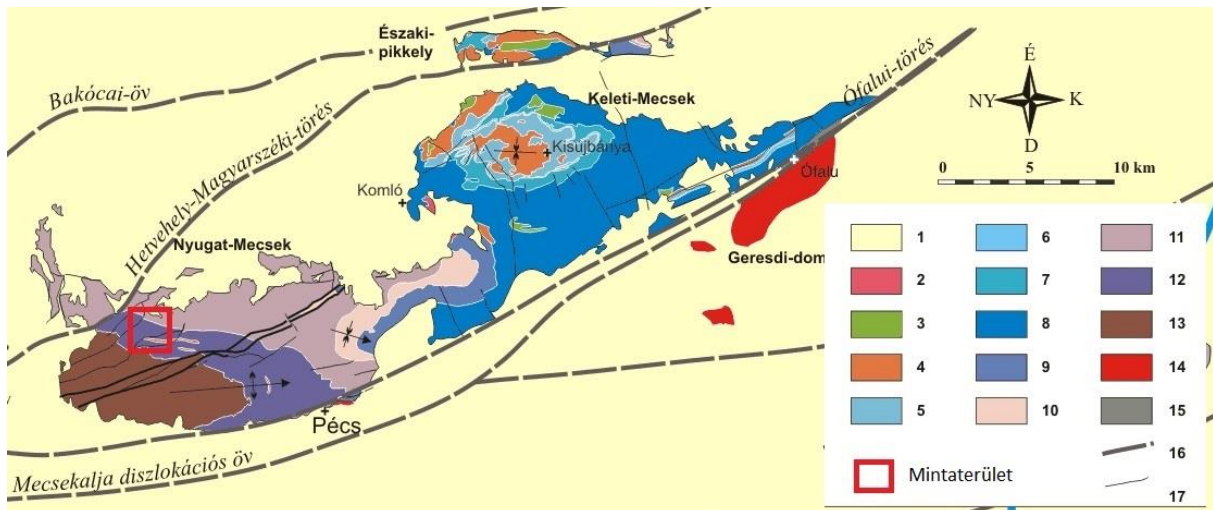
##### **3.1.1. Mintaterület bemutatása, a Bükkösdi-víz vízgyűjtőjének általános jellemzése**

A vizsgálatok elvégzéséhez, valamint a modell létrehozásához szükségem volt a vizsgált mintavízgyűjtő környezeti változóinak a pontos ismeretére. A részletes monitoring vizsgálatokat 2010 és 2012 között a Bükkösdi-víz (Fekete-víz felső folyásának részvízgyűjtője) vízgyűjtőjén található Pósa-völgyben (piros poligon) végeztem (24. ábra). A vízgyűjtő terület bemutatása során a befoglaló vízgyűjtő felől haladok a felvízi szakasz felé. Ennek megfelelően először, a Bükkösdi-víz, illetve a Bükkösdi-víz részvízgyűjtőinek (különös tekintettel a Pósa-völgy) általános jellemzésére térek ki.



24. ábra A Pósa-völgy elhelyezkedése a Bükkösdí-víz felső vízgyűjtőjén, továbbá a területen található monitoring rendszer elemei az elhelyezkedése

A mintaterület geológiai értelemben a Mecsek–Szolnoki- egységhez tartozik a Tiszai-főegységen belül, a felépítésére pedig kompressziós szerkezetek, redők és pikkelyek jellemzőek (BUDAI és KONRÁD 2011). A Bükkösdí-víz vízgyűjtője a Mecsek nyugati elvégződésében található, főleg homokkő, kisebb részben mészkő alapkőzeten. A Nyugat-Mecsek antiklinális szerkezetét főként perm és triász karbonátos kőzetek és homokkő alkotja. Az antiklinális tengelyében a legidősebb felszínre bukó képződmény karbon gránit, illetve perm és alsó-triász törmelékes üledékek, helyenként pedig középső triász sekélytengeri karbonátokat is megtalálhatunk. Hetvehely térségére, leginkább neogén-negyvedidőszaki fedőüledékek, illetve középső-triász karbonátok (germán triász „muschelkalk”) jellemzőek (25. ábra).



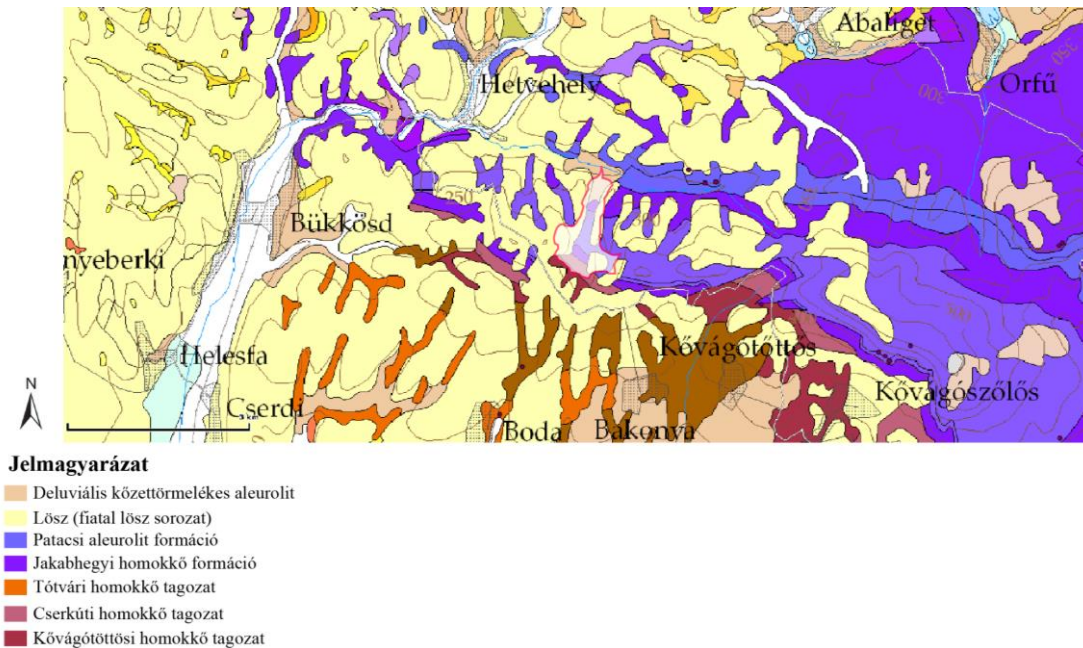
25. ábra A Délkelet-Dunántúl földtani térképe (Forrás: KONRÁD et al. 2010).

Jelmagyarázat: 1. neogén–negyedidőszaki fedőüledékek; 2. miocén andezit; 3. alsó-kréta üledékes kőzetek; 4. alsó-kréta bazalt; 5. felső-jura üledékes sorozat; 6. középső–felső-jura karbonátok; 7. középső-jura ammoniteszes mészkő; 8. alsó–középső-jura képződmények („foltosmárga” sorozat); 9. felső-triász–alsó-jura kőszénteleges homokkő, 10. felső-triász törmelékes üledékek („keuper”); 11. középső-triász karbonátok („muschelkalk”); 12. alsó–középső-triász törmelékes és evaporitos üledékek („buntsandstein és röt”); 13. perm-i törmelékes üledékek és riolit; 14. paleozoos gránit–monzonit; 15. paleozoos metamorf képződmények; 16. szinklinális tengely; 17. antiklinális tengely; 18. a hegység szerkezet meghatározó (felül) és egyéb szerkezeti elemek (alul)

A torkolattól Bükkösd településig a vízfolyás síkvidéki jellegű, míg Bükkösdtől felfelé a nyugati oldal (jobb part) dombsági jellegű, keletre pedig tagolt, középhegységi domborzattal jellemezhető, V-alakú völgyekkel és meredek völgyfalakkal. A V-alakú völgyek és a sekély talajokkal rendelkező völgyoldalak ideális lefolyási felületek, és nagymértékben hozzájárulhatnak a villámárvizek kialakulásához. A vizsgált területen húzódik végig Pécs-Budapest vasútvonal. A vasúti töltés helyenként mindössze néhány 10 méterre található a vízfolyás medrétől, és mesterséges gátat is képez, amelyet azonban esetenként megrongálhatnak a Bükkösdi-víz árvizei. A teljes vízgyűjtő 112 km<sup>2</sup> területű, kerülete 69 km, legalacsonyabb (kifolyási) pontja 127 m. tszf. magasságban, míg a legmagasabb pont 609 m tszf. magasságban (Jakab-hegy) helyezkedik el (5. táblázat). A meredekség a teljesen sík felszíntől, az 53°-os lejtőszögig változik (5. táblázat). ITT

A legtagoltabb domborzati viszonyokat a vízgyűjtő DK-i területein találjuk. A Mecsek domborzati viszonyai általánosságban jellemzőek és reprezentatívak Magyarország és mindent egybevetve a Kárpát-medence középhegységi topográfiai és domborzati viszonyaira. A Mecsekben (26. ábra) ugyanis találunk laza pleisztocén lösz és miocén homok és márga üledékeket, homokkövet, mészkövet, valamint foltokban vulkáni és magmás kőzeteket is.

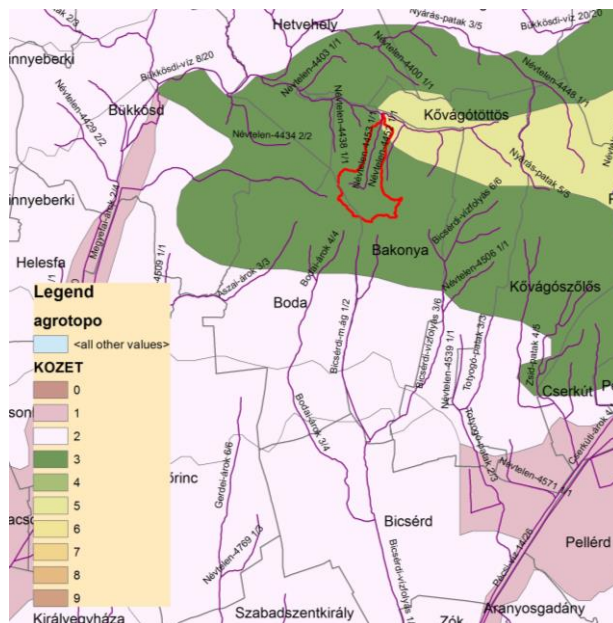
Mészköterületek a vízgyűjtő legmagasabban fekvő területein találhatóak, azonban ezek a kőzetek, nagy porozitásuk és a litoklázisok magas arányának köszönhetően növelik a beszivárgás arányát a felszíni elfolyáshoz képest.



26. ábra Nyugat-Mecsek földtani alap szelvénye M 1:100 000 (Forrás: MÁFI). A piros poligonnal jelöltem a Pósa-völgyi mintaterületet. Saját szerkesztés

Ezen a területen a víznyelők nagy térbeli sűrűsége jellemző, ahol a felszín alatt összegyűjtött víz szolgáltatja az Abaligeti-barlangban a Bükkösd-víz forrását környékén (LOVÁSZ és WEIN 1974; DÖVÉNYI 2010).

A legtöbb robusztus talajtani adatokat felhasználó térinformatikai kutatás alapját hazánkban az AGROTOPO digitális térkép jelenti. A Talajtani Kutatóintézet által létrehozott, M 1 : 100 000 méretarányú adatbázis azonban nem alkalmazható ultra kisméretű vízgyűjtők esetében. Az adatbázis alapján a Pósa-völgy teljes területére egységesen 20-40 cm talajvastagság szerepel humuszos homoktalaj (27. ábra).

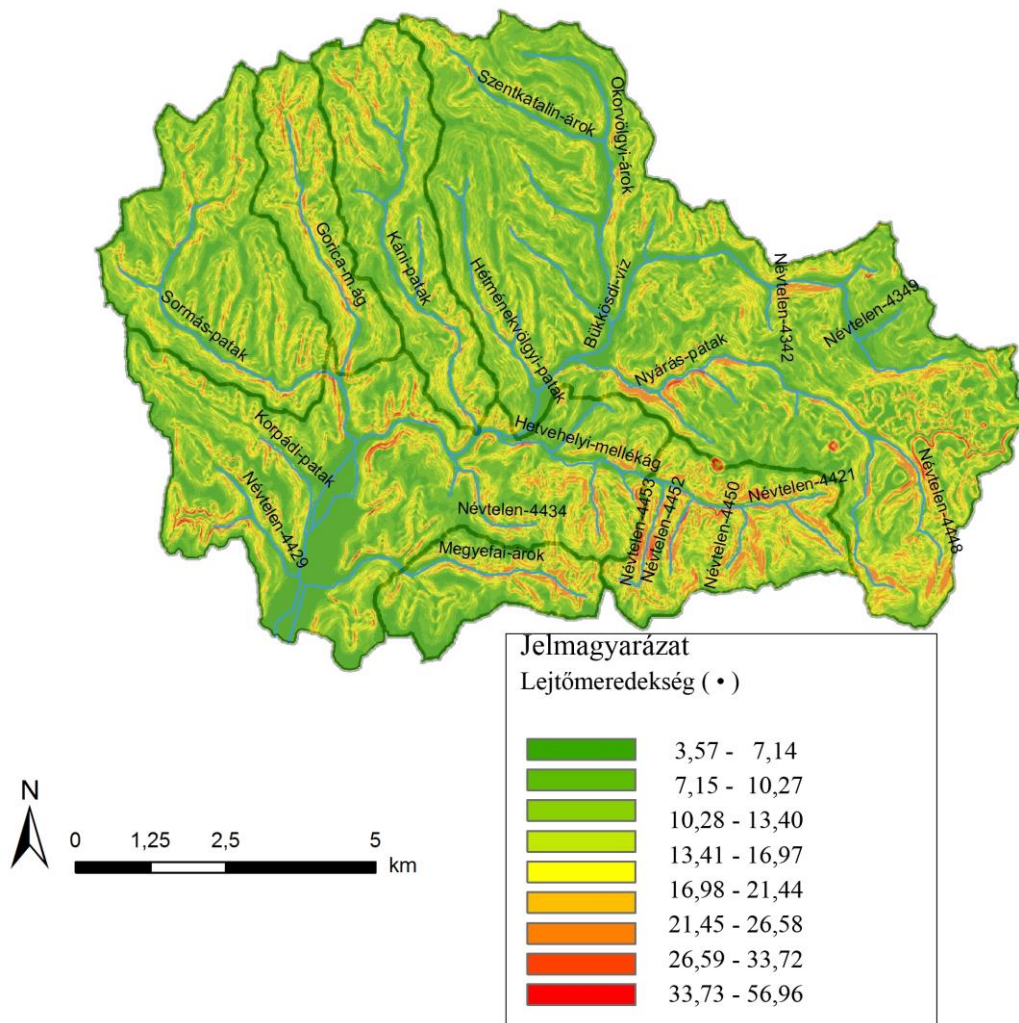


27. ábra A Bükkösi-víz felső vízgyűjtőjének genetikai talajtípusai és altípusai az AGROTOPO adatbázis alapján

5. táblázat. A Bükkösi-víz vízgyűjtőjének (Szentlőrinc település felett) főbb domborzati jellemzői (Forrás: mintaterület 10 méteres domborzati modellje alapján)

	Minimum	Maximum	Tartomány	Átlag	Szórás
Magasság (m)	127	609	435	245,70	60,57
Meredekség (°)	0	53,92	53,92	9,88	5,68
Kitettség (azim °)	0	360	360	169,54	103,10

A vízgyűjtő meredekségi, lejtőkaraktere a már ismertetett módon két részre osztja a Bükkösi-víz vízrendszerét (28. ábra). A legmeredekebb, és ehhez kötődően a leggyorsabb összegyülekezésű területek a Hetvehelyi-mellékághoz kötődnek. Kiemelten veszélyeztető tényező, hogy a fővölgy partoldalai is meredek – mind Bükkösd, mind Hetvehely település a meredek völgyoldalak inflexiós pontjai alatt fekszik - ami azt jelenti, hogy ha a csapadékterhelés a vízgyűjtő központi területére jut, akkor ott is nagyon gyors (pár óra, vagy akár kevesebb is) összegyülekezéssel kell számolni.



28. ábra A Bükkösd-víz vízgyűjtőjének meredekségi jellemzői

### 3.1.2. A Bükkösd-víz vízgyűjtőjének felszínhasználati jellemzői

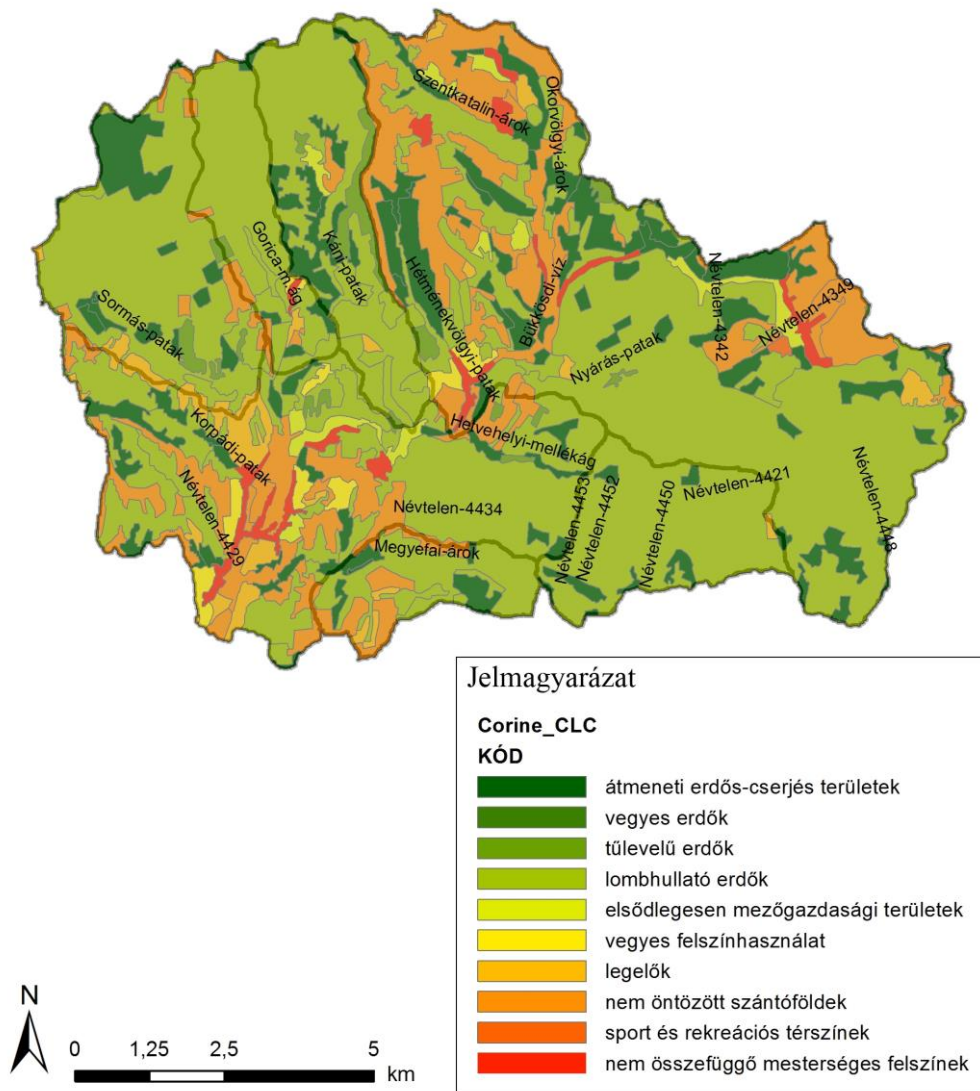
Vizsgáltam a Bükkösd-víz vízgyűjtőjén a felszínborítást, mivel a terület hidrológiai modellezése során, a lefolyás meghatározásánál szükséges bemeneti paraméter, főleg az intercepcióhoz kapcsolódóan, a terület felszínhasználata, illetve a vegetációs borítottság jellege. A Bükkösd-víz vízgyűjtőjének felső részét a nedves kontinentális éghajlatra, valamint hazánk középhegységi területeinek legjellemzőbb lombhullató fafajai uralják. Ezek közé tartozik a bükk (*Fagus sylvatica*) elegendő erdőt alkotva főleg a gyertyánnal (*Carpinus betulus*) és csertölgygel (*Quercus cerris*) (29. ábra).



29. ábra Csertölgy (*Quercus cerris*) a mintaterületen, 2011. május (Saját fotó)

A Bükkösd-víz felső vízgyűjtője felosztásra került a CLC 2000 felszínhasználati térkép alapján, amely szerint a felső vízgyűjtő mintegy 68,9%-át borítják erdők. A Bükkösd-víz felső vízgyűjtője tagolt felszínű, az erdős területeken kívül legelők és mezőgazdasági területek is nagy kiterjedésben találhatóak (30. ábra). A Hetvehelyi-mellékág vízgyűjtőjén hat felszínhasználati kategória különböztethető meg, ezek mindegyike természetes eredetű.





30. ábra A Bükkösi-víz vízgyűjtőjének felszínhasználati jellemzői a CLC 2000 alapján

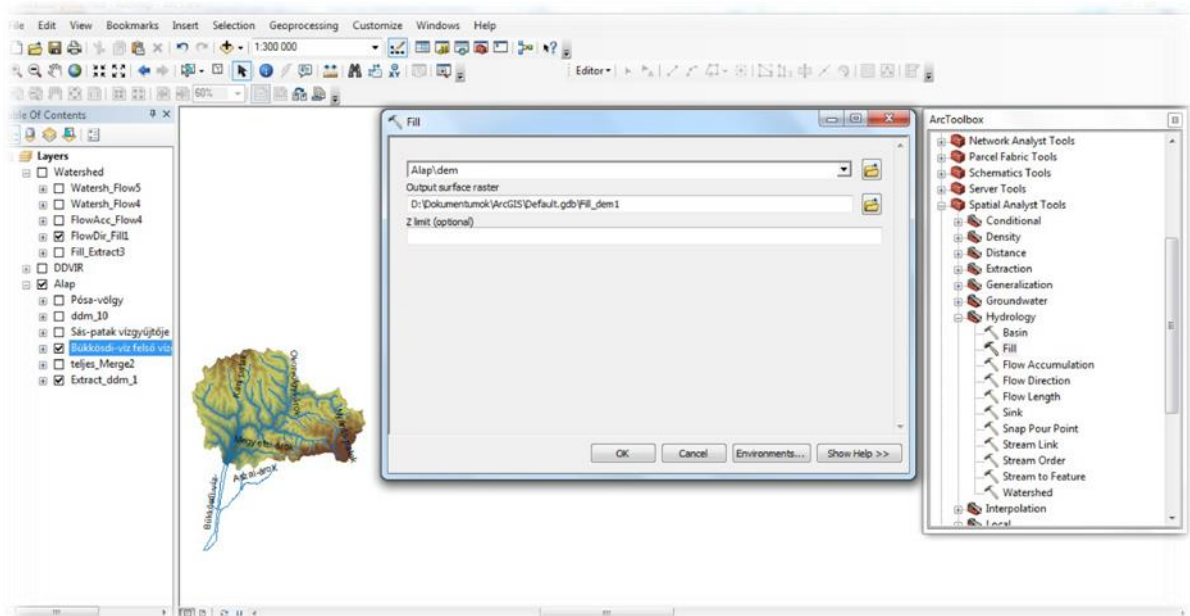
### 3.1.3. A Bükkösi-víz mederviszonyai

A Bükkösi-víz medre mintegy 2-3 méter mélységben vágódik be a környező területek alluviális üledékeibe. Azonban néhány helyen a bevágódás mélysége nem haladja meg az 1 métert sem, ezáltal ideális térszíneket hozva létre lokális elöntésekhez. A korábbi általános fenntartási gyakorlat szerint a mederben és közvetlen közelében található növényzet többnyire eltávolításra kerül a rendelkezésre álló pénzügyi források függvényében. Ezáltal biztosítva a víz szabad és gyors lefolyását. A jelenleg is folyamatban lévő Vízgyűjtő Gazdálkodási Tervek felülvizsgálatában a vízügyi szakemberek igyekeznek ökológiai szempontokat is figyelembe venni, így ennek megfelelően kialakítani a szükséges műszaki intézkedéseket, beavatkozásokat. Azonban elburjánzott vízi növényzetet, bokrokat, cserjéket,

csak minimálisan, helyenként és időnként ritkítják, ezáltal lehetőséget teremtenek előnyösebb társulások kifejlődésének.

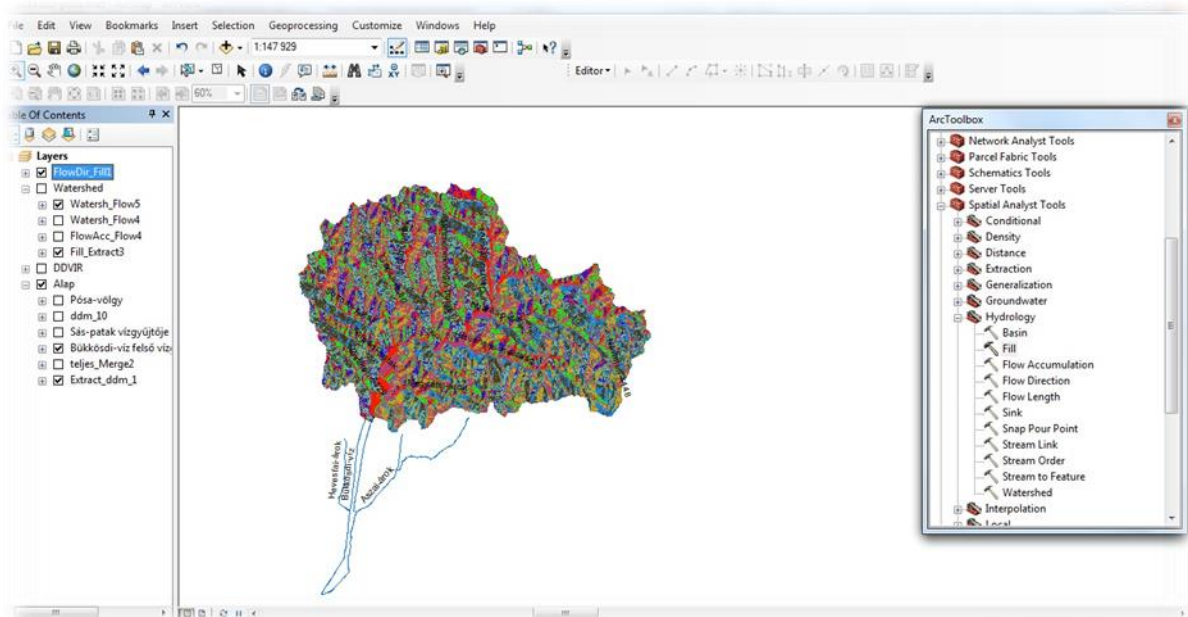
### 3.1.4. Vízgyűjtő lehatárolása ArcGIS-ben

A vízgyűjtő terület lehatárolását az ArcGIS 10.2 verziójú szoftverkörnyezetben végeztem el. Lehatárolásra került a Bükkösdi-víz felső vízgyűjtője, a Hetvehelyi-mellékág, illetve ezen a területen belül maga a kisebb tervezési egységű, Pósa-völgy vízgyűjtő területe is. Fontos, hogy olyan domborzati modellel kell rendelkezünk a területre, amely nem tartalmaz kitöltetlen részekkel, ezért ehhez első lépésként a *Fill* kitöltő eszközt használtam (31. ábra). Munkám során a terület, FÖMI-től vásárolt 10-méteres domborzati modelljével dolgoztam.



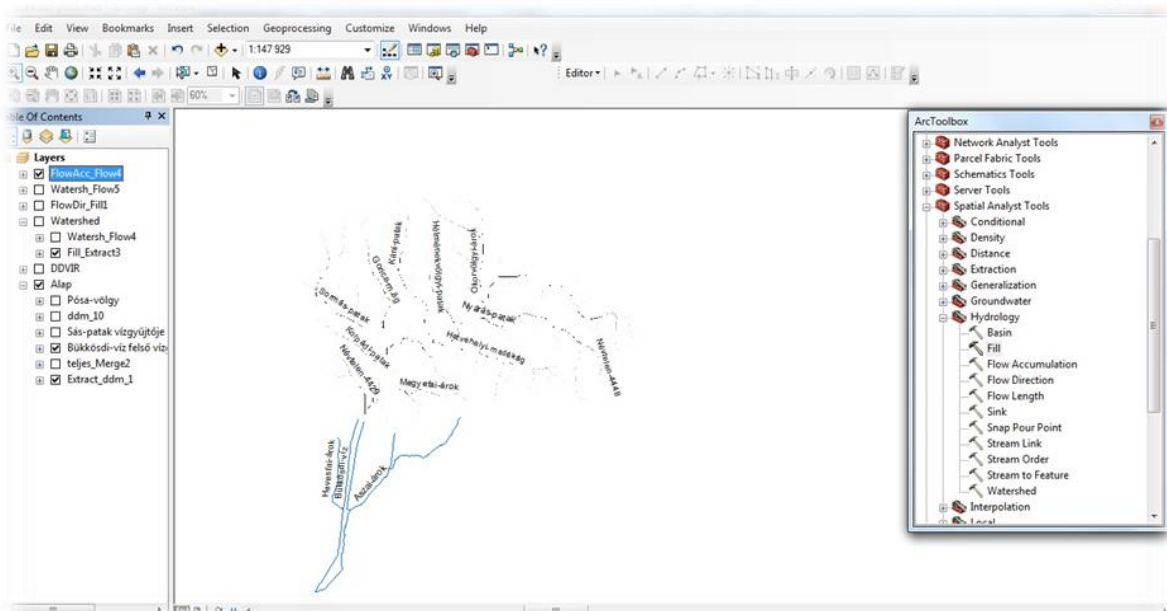
31. ábra A Fill kitöltő eszköz használata ArcGIS szoftverver környezetben (Spatial Analyst Tools > Hydrology)

A következő lépésben a területen megjelenő folyási irányok meghatározását (32. ábra) végeztem el. Az input fájlként az első lépés eredményeként kapott raszter fájlt adtam meg.



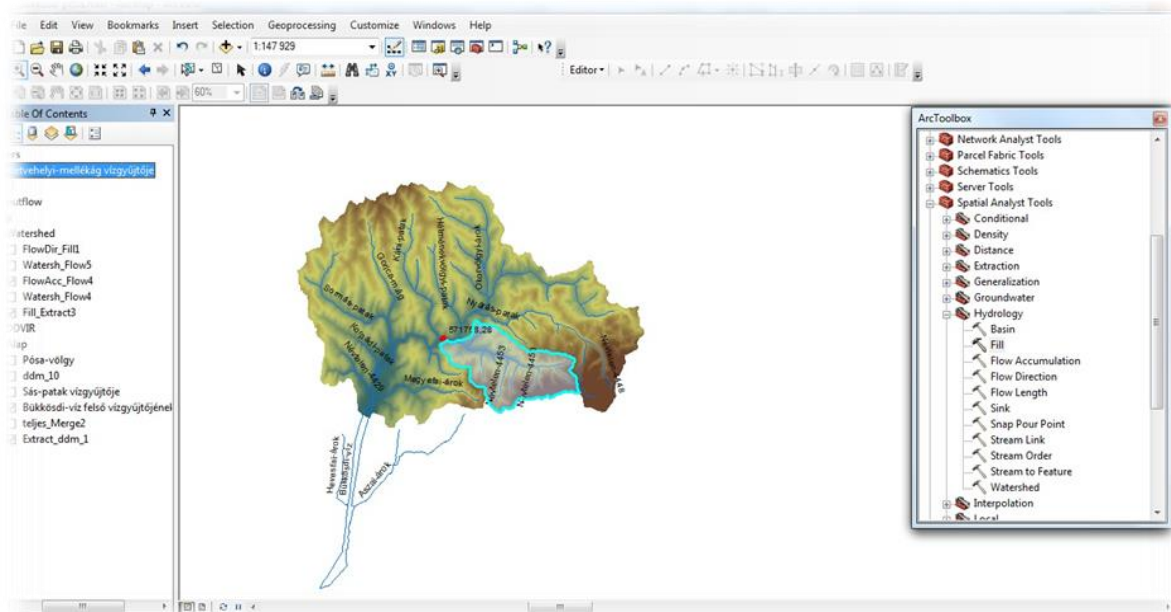
32. ábra A *Flow Direction* eszköz használata ArcGIS szoftverkörnyezetben (Spatial Analyst Tools > Hydrology)

A harmadik lépésben a *Flow Accumulation* függvényt (33. ábra) használtam. A *flow accumulation layer* minden egyes cellája értékekkel rendelkezik, az értékek azt mutatják, hogy az adott cellába hány másik felvízi cellából gyűjti össze a vizet. Tehát a mederben, illetve a kifolyási pont (torkolat) irányába a cellák magasabb értékekkel rendelkeznek.



33. ábra A *Flow Accumulation* eszköz használata ArcGIS szoftverkörnyezetben (Spatial Analyst Tools > Hydrology)

Következő lépésben definiáltam a vízgyűjtő terület kifolyási pontját (34. ábra). Ezt a pontot x-y koordinátákkal adtam meg egy külső fájlban. Két kifolyási pontot definiáltam, az egyik a Pósa-völgy kifolyási pontja, a másik pedig a Hetvehelyi- mellékágé.

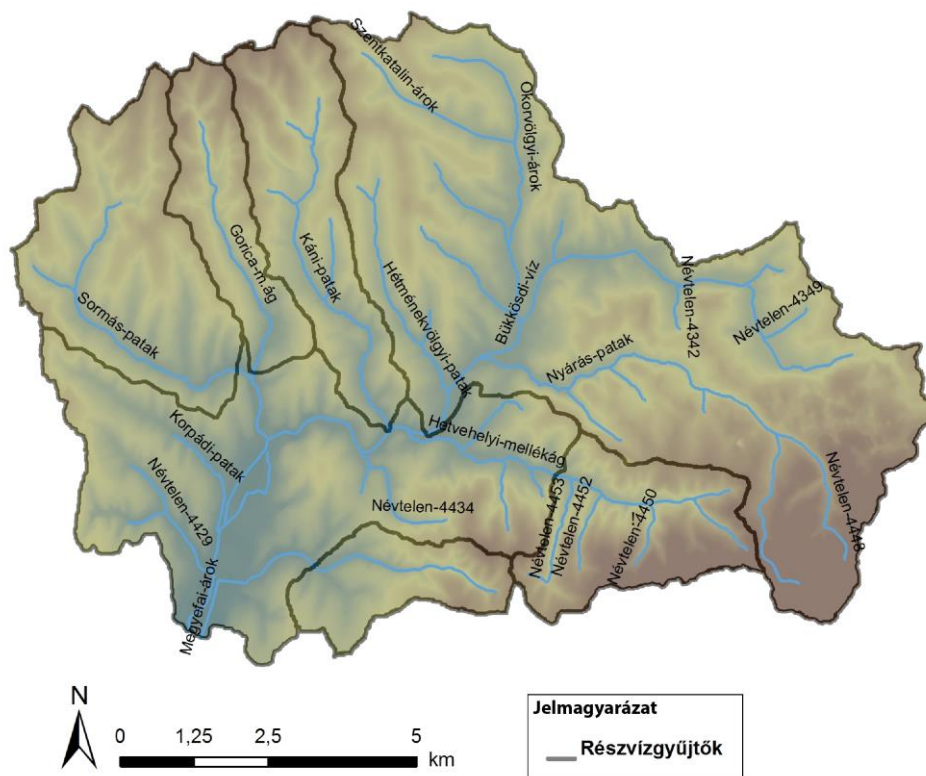


34. ábra A Hetvehelyi-mellékág *outflow* (piros pont), kifolyási pont koordinátájának a megadása EOVBan ArcGIS szoftverver környezetben

Utolsó lépésben a *Watershed* függvényt használtam. Végeredményül a program meghatározta a Pósa-völgy, illetve a Hetvehelyi mellékág vízgyűjtő területét (35. ábra). A vízgyűjtő leválogatásnál még egy vízgyűjtőt lehatároltam (35. ábra), a Bükkösd-víz Hetvehely feletti területét. Ez utóbbi vízgyűjtő területe 45,8 km<sup>2</sup>. A teljes Bükkösd-víz Bükkösd feletti vízgyűjtőjét tekintve a vízfolyások teljes 111,26 km, a vízfolyások térbeli sűrűsége 0,99 km km<sup>-2</sup>. A mellékpatatok általános hidrogeográfiai és hidrometriai és a domborzati jellemzői az alábbi táblázatban olvashatóak (6. táblázat).

6. táblázat A Bükkösd-víz és mellékvízfolyásainak magasság, hossz és lejtőszög/merekség jellemzői (Forrás: a mintaterület 10 méteres domborzati modellje alapján)

	Bükkösd-víz (Bükkösdnél)	Bükkösd-víz (Hetvehelynél)	Sormás- patak	Megyefai- árok	Sás-patak (Hetvehelyi- mellékág)	Gorica- patak	Káni- patak
Forrás magassága (m)	235	235	221	276	288	247	240
Torkolati magasság (m)	135	157	191	150	181	151	154
Hossz (m)	13 583	10 751	1 841	3 406	3 182	4 816	6 800
Merekség (m/m)	0,0074	0,0073	0,0167	0,0371	0,0336	0,0199	0,0126



35. ábra A Bükkösi-víz felső szakaszának mellékvízgyűjtői

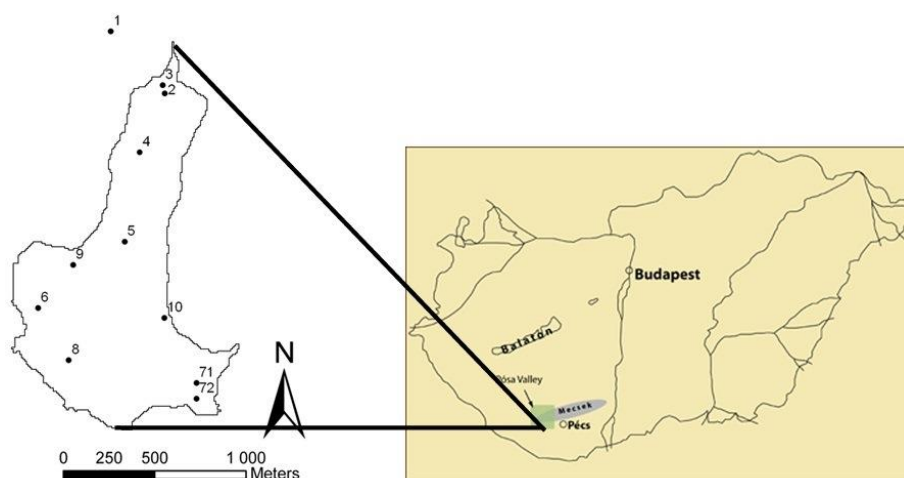
A Bükkösi víz felső vízgyűjtő területe is kis, részvízgyűjtő területekre bontható Sormás-patak, Gorica-patak, Káni-patak, Hetvehelyi mellékág és a Megyefai-árok vízfolyások vízgyűjtőjére. Ezekre a részvízgyűjtőkre vonatkozó értékeket a tartalmazza 7. táblázat.

7. táblázat A Bükkösd-víz részvízgyűjtőinek főbb domborzati és hidrometriai jellemzői (Forrás: a mintaterület 10 méteres domborzati modellje alapján)

	terület (km <sup>2</sup> )	MIN	MAX	tartomány	átlag	szórás
<i>Sormás-patak (1)</i>						
magasság (m)	12,13	153	343	190	241,85	36,53
meredekség (°)	12,13	0	36,71	36,71	9,26	4,57
kitettség (azim °)	12,13	sík	359,96	360,96	170,88	91,11
<i>Gorica-patak (2)</i>						
magasság (m)	5,84	151	355	204	255,56	43,03
meredekség (°)	5,84	0	35,41	35,41	11,02	5,32
kitettség (azim °)	5,84	sík	358,60	359,60	174,74	90,91
<i>Káni-patak (3)</i>						
magasság (m)	9,58	154	356	202	248,88	43,63
meredekség (°)	9,58	0	35,16	35,16	10,00	4,86
kitettség (azim °)	9,58	sík	359,78	360,78	160,82	88,04
<i>Bükkösd-víz, Hetvehely kifolyási pont (4)</i>						
magasság (m)	45,81	157	562	405	259,748	65,21
meredekség (°)	45,81	0	44,66	44,66	9,418652	5,07
kitettség (azim °)	45,81	sík	359,99	360,99	166,74	105,45
<i>Hetvehelyi-mellékág (5)</i>						
magasság (m)	7,73	181	437	256	303,45	53,97
meredekség (°)	7,73	0	38,67	38,67	14,43	6,60
kitettség (azim °)	7,73	sík	359,99	360,99	184,67	111,98
<i>Megyefai-árok (6)</i>						
magasság (m)	4,63	150	361	211	238,77	45,92
meredekség (°)	4,63	0	34,11	34,11	10,32	6,84
kitettség (azim °)	4,63	sík	359,97	360,97	189,24	109,29

### 3.1.5. Pósa-völgy bemutatása

Az 1,7 km<sup>2</sup> nagyságú vízgyűjtő terület (36. ábra) a Bükkösd-víz rendszer területéhez tartozó Sás-patak (37. ábra) vízgyűjtőjén helyezkedik el. A terület többnyire gyertyános bükkösökkel fedett, s helyenként tarvágásokkal, gyepekkel tagolt.



36. ábra Pósa-völgy és a monitoring pontok elhelyezkedése



37. ábra. A Pósa-völgyben húzódo Sás-patak, 2011. április. 11 (Saját felvétel)

A vízgyűjtőben több alkalommal is leírtak pusztító árvizeket (VASS 1997, ESZÉKY 1987). A mintaterület kijelölésénél az előzőekben említett, múltban történt ár- és nagyvízi eseményeket is figyelembe vettem, illetve a reprezentativitás mellett, a területen korábban, a Mecskérc Zrt., valamint a MecsekÖko Zrt. által kialakított hidrográfiai és hidrológiai monitoring rendszer megléte is (talajmechanikai fúrások, valamint vízállás és vízhozam mérések) közrejátszott. A Bükkösi-víz vízgyűjtőjében rendszeres vízállás és vízhozam, valamint meteorológiai mérések folynak 2000 óta a MÉV, illetve utódja, a MecsekÖKO közreműködésével. Részletes meteorológiai adatokat Hetvehely mellett, a Sás-patak völgyének nyugati elvégződése (38. ábra) mellett elhelyezkedő automata meteorológia mérőállomás szolgáltat.

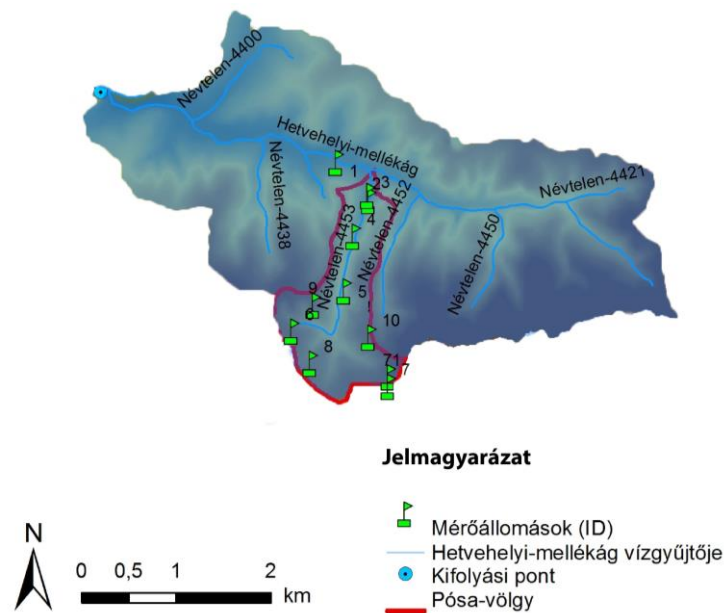


38. ábra A Sás-patak vízgyűjtőjének felső szakasza a Nyugat-Mecsekben, 2011. október (saját felvétel)

### 3.2. Monitoring hálózat általános jellemzése

A monitoringhálózatot 2010 szeptemberében a Pósa völgyben alakítottam ki. Ennek eredményeként az 1,7 km<sup>2</sup> területű vízgyűjtőben 2011. évben 11 adatgyűjtővel ellátott mérőállomás működött. Minden egyes mérőállomás tartalmazott egy *Decagon* (Pullman, WA, Egyesült Államok) gyártmányú EM50 (egy esetben EM50G GPRS alapú adatküldő modullal felszerelt) adatgyűjtőt, 5TM TDR rendszerű talajnedvesség szenzort és egy ECRN-100 típusú billenőedényes csapadékszenzort. Az összes kihelyezett adatgyűjtő közül háromhoz egy-egy árnyékolt hő- és relatív páratartalom mérő szenzort csatlakoztattunk. Az egyetlen *GPRS* modullal felszerelt adatgyűjtőt egy levél nedvességmérővel és egy beszivárgás mérő szenzorral is elláttuk. Az adatgyűjtés és tárolás 10 perces időközönként történt. A Pósa-völgy kifolyó pontja közelében kihelyeztünk egy *DATAQUA* gyártmányú vízhőmérséklet és vízállás szenzort is, így vízgyűjtő szinten vizsgáltam a hidrológiai ciklus releváns elemeit. A Pósa-völgy területén található mérőállomások elhelyezkedése a 39. ábra alatt látható.





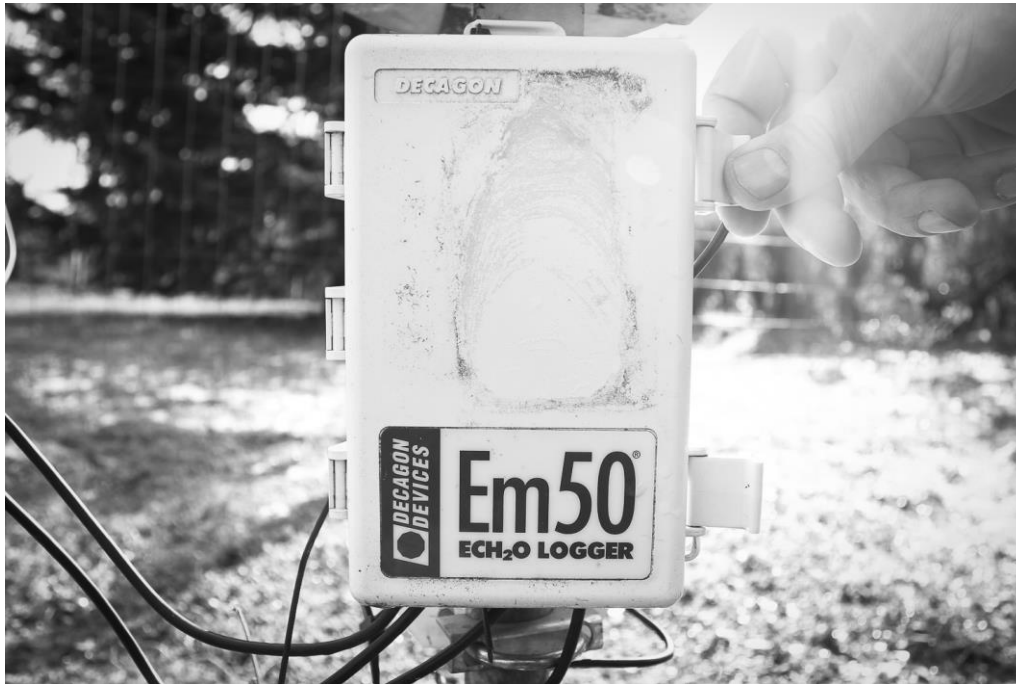
39. ábra A Pósa-völgyben kihelyezett hidrometeorológiai mérőállomások elhelyezkedése

A vízállás és vízhozam adatokat a DDVIZIG-től szereztem be. A Bükkösi-víz alább felsorolt mellékvizein az adatgyűjtés szabálytalan időközökben történt, általában 30 perc és 24 óra között, ezeket az adatokat felhasználtam a modellfuttatások verifikálására:

1. Sormás-patak
2. Gorica-patak
3. Káni-patak
4. Sás-patak (Hetvehelyi-mellékág)
5. Megyefai-árok

### 3.2.1. Csapadékadatok rögzítése

A csapadékadatok mérését a *Decagon* termékcsaládhoz tartozó ECRN-100 típusú billenőedényes elven működik csapadékmérő eszközökkel végeztem. Az alkalmazott eszközt csatlakoztattam egy *Decagon* EM50 adatrögzítőhöz (40. ábra), amelyből USB kábel és *Decagon* ECH<sub>2</sub>O szoftver segítségével kiolvastam a mért és gyűjtött adatokat.



40. ábra Decagon gyártmányú, Em50 típusú adatrögzítő (Saját fotó)

Az adatok rögzítése első körben 10 perces időintervallumokban történt. Az ECRN-100 esetében egy billenés 0,2 mm csapadék mennyiséget jelent, ez a minimálisan mérhető csapadékmennyiség, vagyis a legkisebb mérhető csapadékkintenzitás  $0,2 \text{ mm min}^{-1}$ . A mérőpontokra telepített összes csapadékmérő eszköz felső pereme a földfelszín felett 100 centiméterrel volt rögzítve.

A mérőeszközök megrongálására több alkalommal is sor került, emiatt a mérőpontok száma változó, illetve adatsoruk nem folytonos. Ebből kifolyólag törekedtem arra, hogy a túraösvényektől távolabb, ám mégis a terület felszínhasználata tekintetében jellemző helyszíneken legyenek kitelepítve, illetve lehetőségeimhez mérten a lehető legsűrűbb (1-2 hetes intervallumokban) adatkiolvasást végeztem. A gyakori adatgyűjtő kiolvasásra a karbantartás, illetve a rongálások, elemlopások (Kelet-Európai mentalitás) miatt is szükség volt.

### **3.2.1.1. Csapadékmérő szenzorok elhelyezkedésének részletes jellemzése**

A Pósa-völgy területén a telepített mérőpontokat fedettségi szempontból három csoportra osztottam. Első csoportba azokat a fátlan mérőpontokat sorolom, amelyek fölött nem volt növényzet, így ezek az „összes” csapadék mennyiségét rögzítették a kijelölt  $1,7 \text{ km}^2$  nagyságú területen. Az első kategóriába sorolt mérőpontok azonosító száma: 7.2, 9 és 10.

A második kategóriába sorolt egyetlen mérőpontot az erdősáv szélén helyeztem el, így ezek már kisebb mennyiségű csapadékot rögzítettek, mivel a növényzet (fa, lombos, levél) felfogott hol kisebb, hol nagyobb mennyiségű csapadékot az intercepció folyamata következtében (1, 6. mérőpont).

A harmadik kategóriába azok a mérőpontok tartoztak, amelyek az erdő centrumába, sűrűjébe kerültek telepítésre, nullára redukálva a szegélyhatásokat. Ezen mérőeszközök (41. ábra) által rögzített csapadékadatok szolgáltatták a legkisebb mennyiséget, mivel a lehulló csapadék jelentős része a növényzeten tározódott. (2, 3, 4, 5, 8 és 7.1. mérőállomásokon).



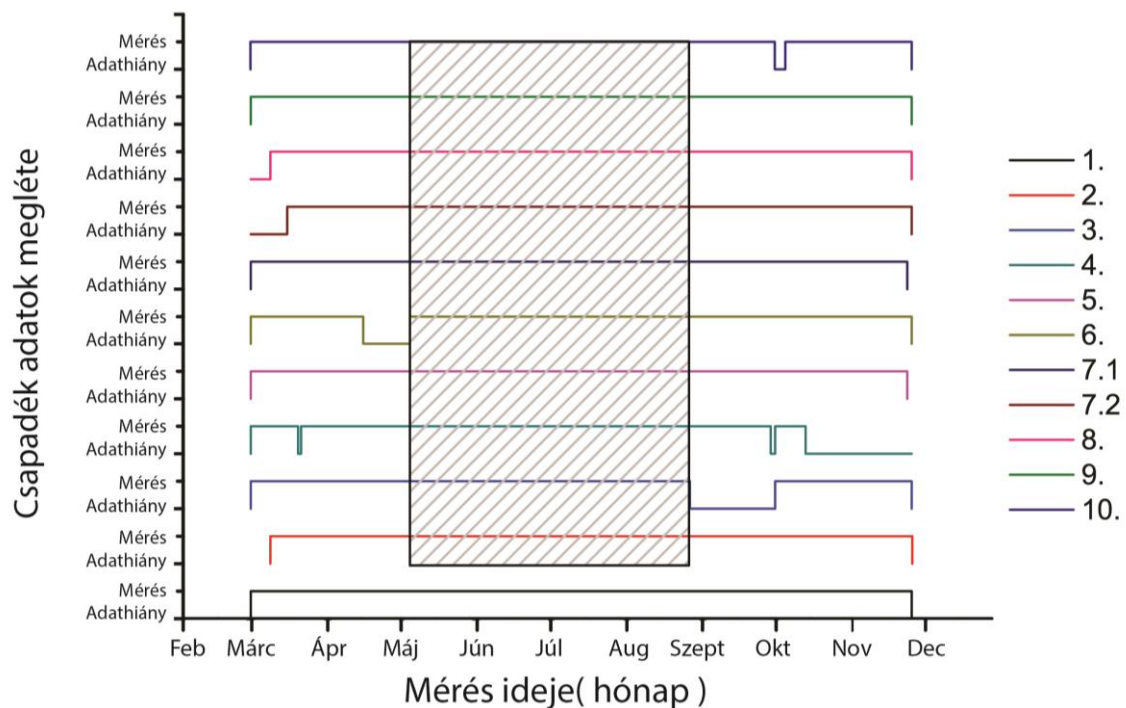
41. ábra Decagon ECRN-100 típusú, billenőedényes elven működő csapadékmérő (Saját fotó)

A csapadékadatok gyűjtése, 2011. március 8-án kezdődött. A monitoringhálózat elemeit pedig 2011. november 25-én gyűjtöttem össze. 2011. június 9-től – 2011. augusztus 23. az adatok gyűjtését sűrűbbre állítottam, 1 perces mérési időintervallumra. A mérési idő sűrítésének az volt az oka, hogy még részletesebb, időbeli felbontást szerettem volna kapni a területen lehulló csapadék mennyiségéről, intenzitásáról. 2011. augusztus 23-tól pedig a csapadékadatok gyűjtése 5 perces intervallumokban történt, egészen a mérési időszak (tenyészedőszak) végéig.

A 8. mérőponton detektált csapadék arányaiban, a mérési időszak hosszához képest, illetve a hely klimatikus viszonyok fényében, nagyon kevés, melyet azonban a mérési körülmények is befolyásolhattak. Ezen a mérőponton mérési hiba több okból is bekövetkezhetett: terepi bejárásaim alkalmával találkoztam azzal a „hibajelenséggel”, hogy

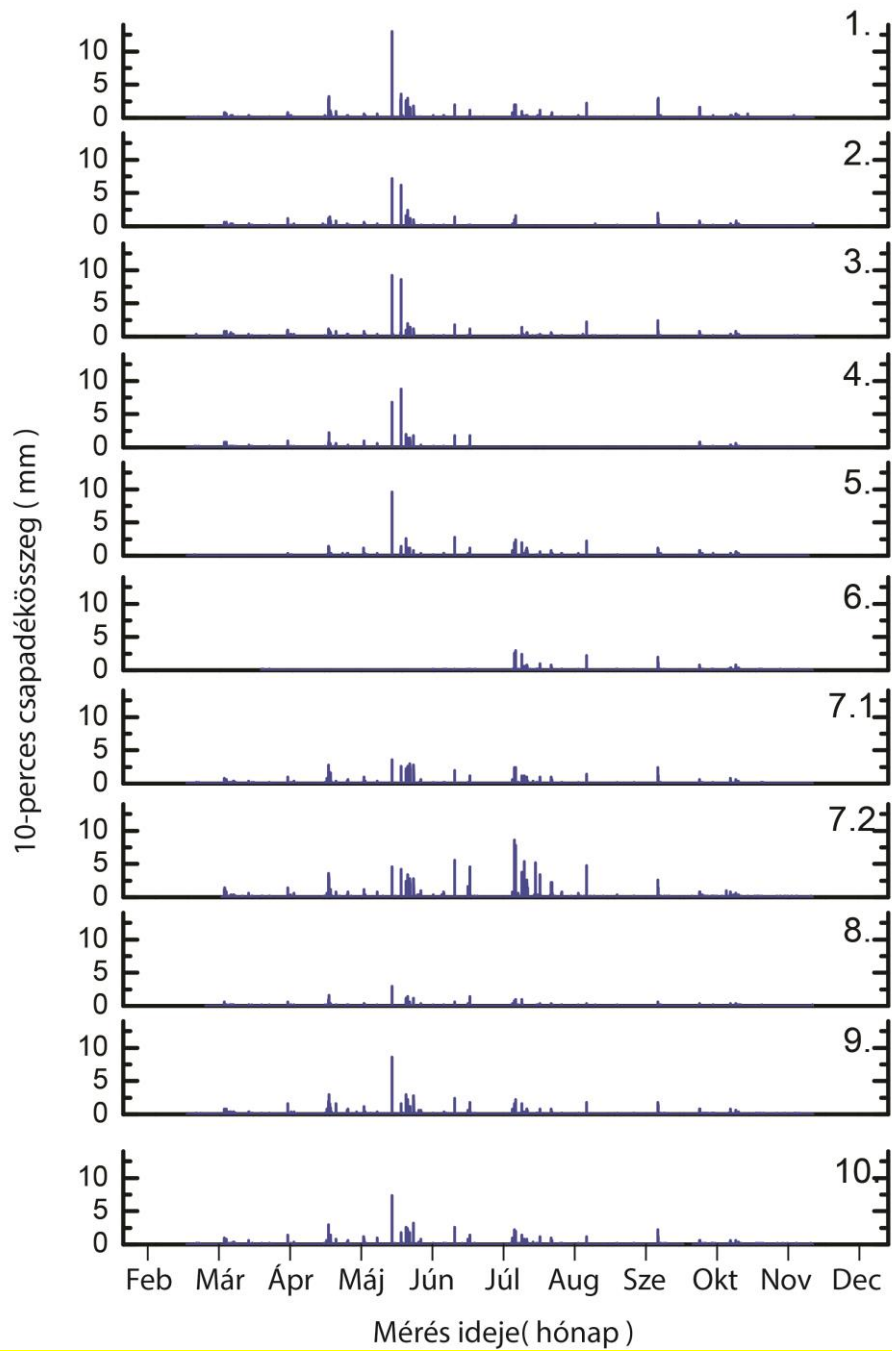
a lehulló falevelek eltömítették szenzorok tölcserét (ezt a hibát a későbbiekben egy áttetsző tég fonású hálóval minimalizáltam). További hibaforrás volt az adatgyűjtő megszakított működése (elemek ellopása, illetve az adatgyűjtő megrongálása, kábelek átvágása).

A 42. ábrán a téglalap azt a közös időintervallumot jelöli, ahol az 1-es mérőpont kivételével, minden telepített csapadékmérő állomáson (2., 3., 4., 5., 6., 7.1., 7.2., 8., 9., 10.) párhuzamosan, egy időben rögzítésre kerültek a csapadékadatok, csapadékesemények.



42. ábra Rögzített és adathiányos csapadékadatok időszakok a monitoring évében (2011)

A monitoring időszak során többször is voltak adathiányos időszakok (42. ábra). Az adatok meglétét, vagy hiányát binomiális skálán (van adat- nincs adat) ábrázoltam az összes mérési pontra. Az 1. mérőállomás adatai azért nem került bele az analízis időtartományába, mivel az ott gyűjtött adatok kontrollként szolgáltak, illetve ez a mérőpont teljesen vízszintes térsíkon helyezkedett el az ártéren, éppen a vízgyűjtő területén kívül, így a lefolyást számottevően nem befolyásolta.

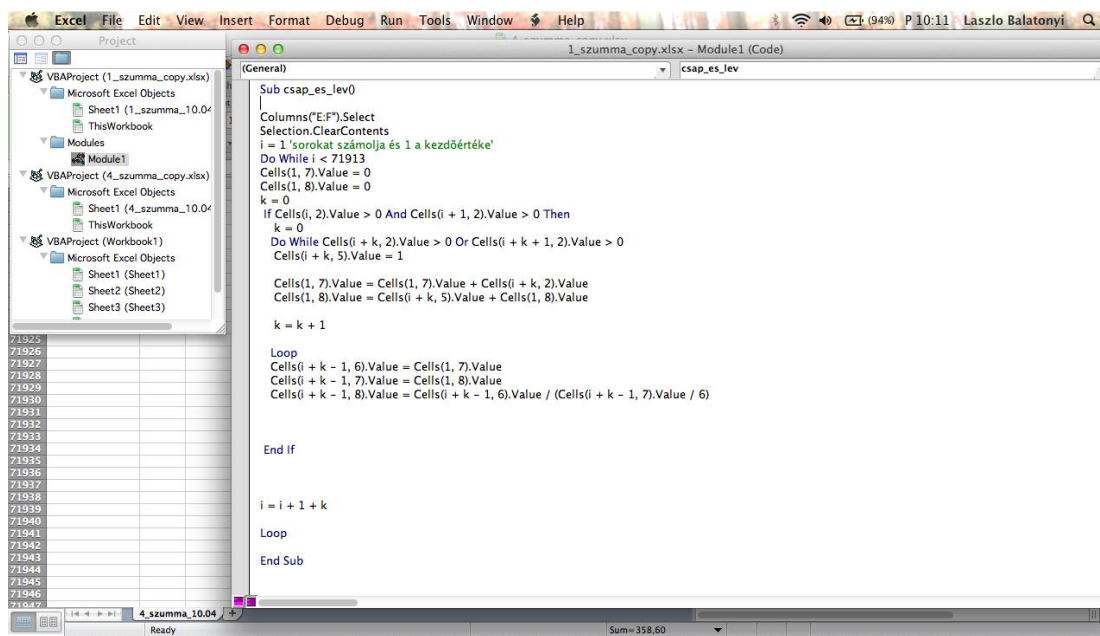


43. ábra 10-perces csapadékösszegek időbeli eloszlása a terepi monitoring teljes időszakában 2011-ben

### 3.2.1.2. A csapadékesemények definiálása

A vizsgált időintervallumban különböző mérési időket alkalmaztam (1 perc, 5 perc, 10 perc). Mivel az egy perces adatok óriási adatmennyiséget jelentettek, nehezen voltak kezelhetőek mind Excelben, mind Origin programban, valamint nem voltak olyan mértékben használhatóak, mint amire számítottam a mérések kezdetén, ezért az egy perces adatokat a csapadékesemények kiértékelésénél a végén újra átválogattam („lebutítottam”) tíz perces csapadékösszegekre.

A csapadékok talajnedvességre gyakorolt hatásának vizsgálatához leválogattam az összes csapadékeseményt (1022 db). A kezdeti időpont definiálásához egymás utáni két mért adat (0-tól eltérő) jelölte ki a csapadékesemény kezdeti időpontját. A záró időpont meghatározása, ennél már sokkal bonyolultabb volt, mivel nem volt egyszerű a “tolerancia” definiálása, az adatsorok tanulmányozása utána (trendek ismeretében) került megállapításra. A végső időpontot úgy határoztam meg, hogy 40 perces csapadékszünet után befejezettek tekintetem az adott csapadékeseményt. Mivel az előzőekben már említettem, hogy közel 150.000 adatsorból (mérőállomásonként) kellett, hogy leválogassam a csapadékeseményeket, így ezt a folyamatot automatizáltam, Excel Makró segítségével (44. ábra).



```
Sub csap_es_lev()
|
Columns("E:F").Select
Selection.ClearContents
i = 1 'sorokat számolja és 1 a kezdőértéke'
Do While i < 71913
Cells(1, 7).Value = 0
Cells(1, 8).Value = 0
k = 0
If Cells(i, 2).Value > 0 And Cells(i + 1, 2).Value > 0 Then
k = 0
Do While Cells(i + k, 2).Value > 0 Or Cells(i + k + 1, 2).Value > 0
Cells(i + k, 5).Value = 1

Cells(1, 7).Value = Cells(1, 7).Value + Cells(i + k, 2).Value
Cells(1, 8).Value = Cells(i + k, 5).Value + Cells(1, 8).Value

k = k + 1

Loop
Cells(i + k - 1, 6).Value = Cells(1, 7).Value
Cells(i + k - 1, 7).Value = Cells(1, 8).Value
Cells(i + k - 1, 8).Value = Cells(i + k - 1, 6).Value / (Cells(i + k - 1, 7).Value / 6)

End If

i = i + 1 + k

Loop
End Sub
```

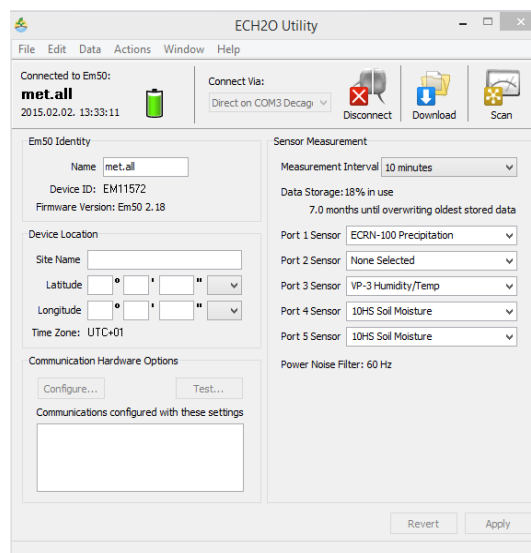
44. ábra Csapadékesemények leválogatásának automatizálása Excel makróban

### 3.2.2. Talajnedvességi adatok gyűjtése

A talajnedvesség mérését a *Decagon* termékcsaládhoz tartozó 5TM típusú *time domain reflectrometry* (TDR) elven működő talajnedvesség szenzorral (45. ábra) került rögzítésre. Az alkalmazott eszközt szintén csatlakoztattam egy Decagon EM50 adatrögzítőhöz, ECH<sub>2</sub>O szoftver segítségével (46. ábra). Az adatgyűjtőből a csapadék adatokat exportáltam Excel (.xls) formában.

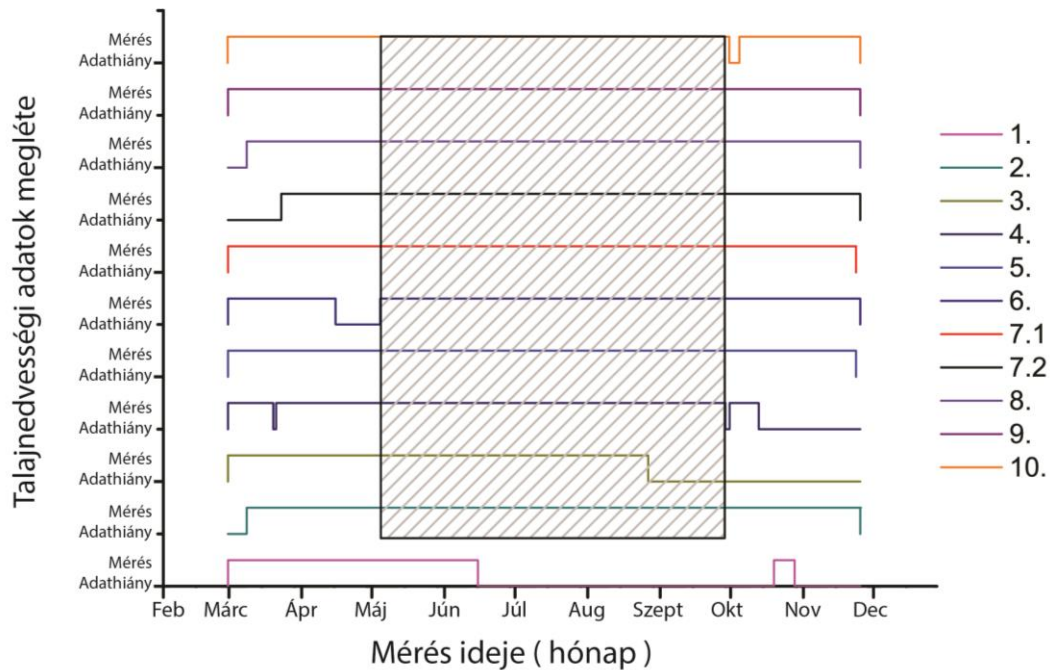


45. ábra 10HS típusú Decagon talajnedvesség (*soil moisture*) mérő szenzor (Saját fotó)



46. ábra Decagon adatrögzítő kiolvasó (ECH<sub>2</sub>O) szoftver kommunikációs felhasználói ablaka

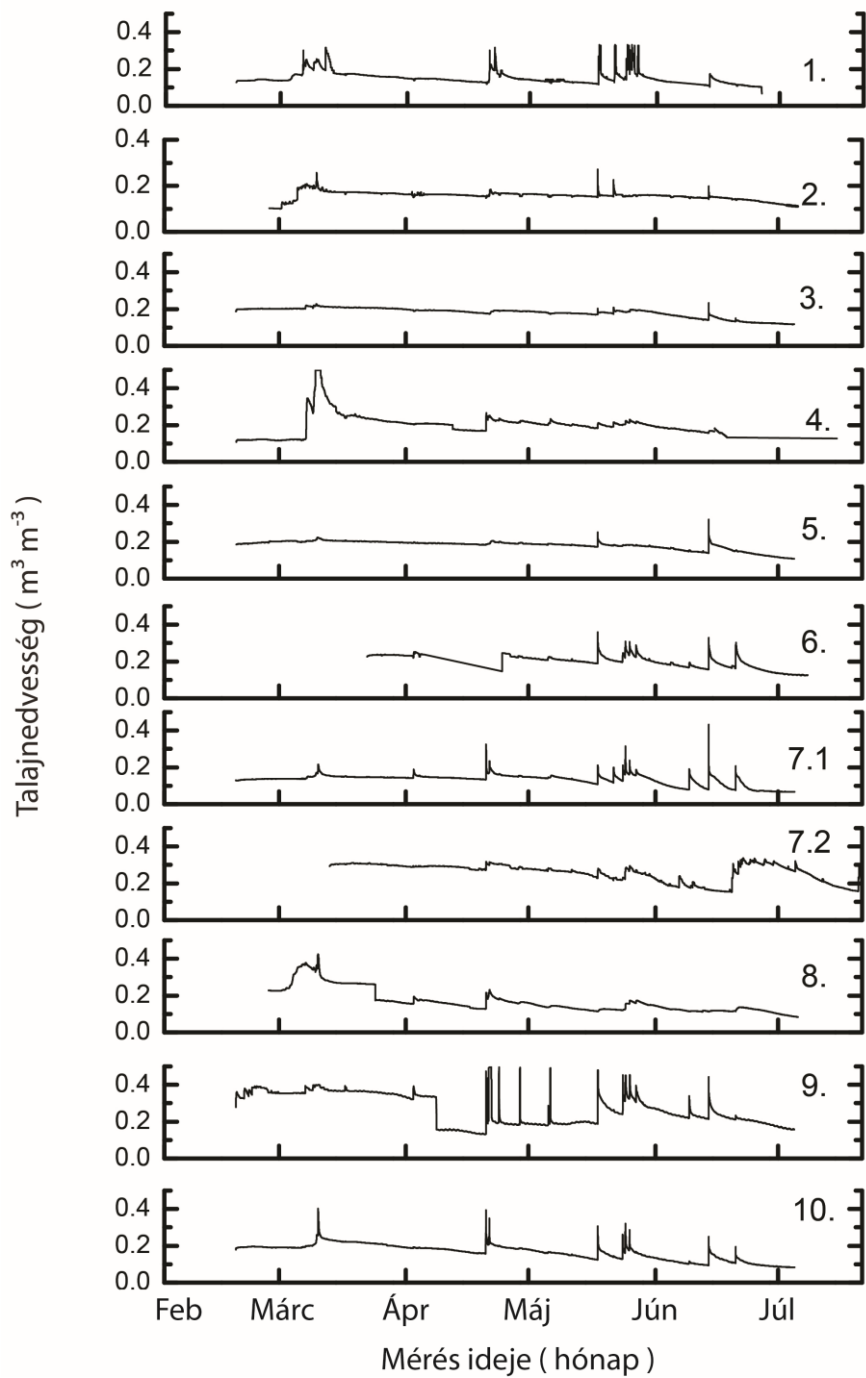
A csapadékadatokhoz hasonlóan a talajnedvességi adatok összehasonlíthatóságának érdekében meghatároztam azt a mérési időintervallumot, ahol minden (vagy legalább közel minden) mérőhelyen párhuzamosan történt adatrögzítés (42. ábra). A gyűjtött talajnedvesség adatok időbeli eloszlását, az egyes állomásokon a 47. ábra szemlélteti. Leghosszabb adathiány a talajnedvesség adatokban az 1. mérőponton volt, itt többszöri rongálás (ez a mérőpont volt legközelebb a turistaúthoz, illetve egy erdészeti úthoz) következtében június közepétől október végéig nem volt adatrögzítés.



47. ábra Rögzített és adathiányos talajnedvességi adatok időszakai a monitoring évében (2011) a Pósa-völgyben

A 47. ábrán látható téglalap azt az időszakot jelenti, amikor mind a 11 mérőállomáson volt adatrögzítés egyidejűleg. Annak érdekében, hogy minél nagyobb legyen a potenciálisan vizsgálható időtartomány - a 2. és 3. mérőpont közelsége (300 m) miatt - eltekintettem attól, hogy a 3. mérőponton már szeptembertől nem kerültek rögzítésre talajnedvességi adatok. Az 1. mérőhelyen gyűjtött adatokat nem vettem figyelembe, mivel ez a mérőpont az ártéren helyezkedik. A vizsgált időszakra vonatkozó talajnedvességi adatok a 48. ábrán láthatók.





48. ábra 10 perces talajnedvesség adatok a Pósa-völgyben a monitoring évében (2011)

### **3.3. Fedettség meghatározása a megfigyelési időszakban**

A terepi bejárások alkalmával rögzítettem a lombkorona fedettség százalékos arányát, Canon 60D digitális tükörreflexes dslr (*digital single-lens reflex*) típusú fényképezőgéppel. A fényképezőgépben és a csapadékmérő eszközben beépített vízszintmérő volt, illetve rögzíttem az első felvétel alkalmával a fényképező eszköz pontos elhelyezkedését, ezáltal biztosítottam azt, hogy minden alkalommal pontosan ugyanaz a térszín kerüljön rögzítésre a csapadékmérő felett. A fényképek szolgáltatták a lombkorona fedettségre vonatkozó, ArcGIS környezetben elvégzett elemzések alapjait.

### 3.3.1. A lombkorona fedettség meghatározása és digitális rögzítése

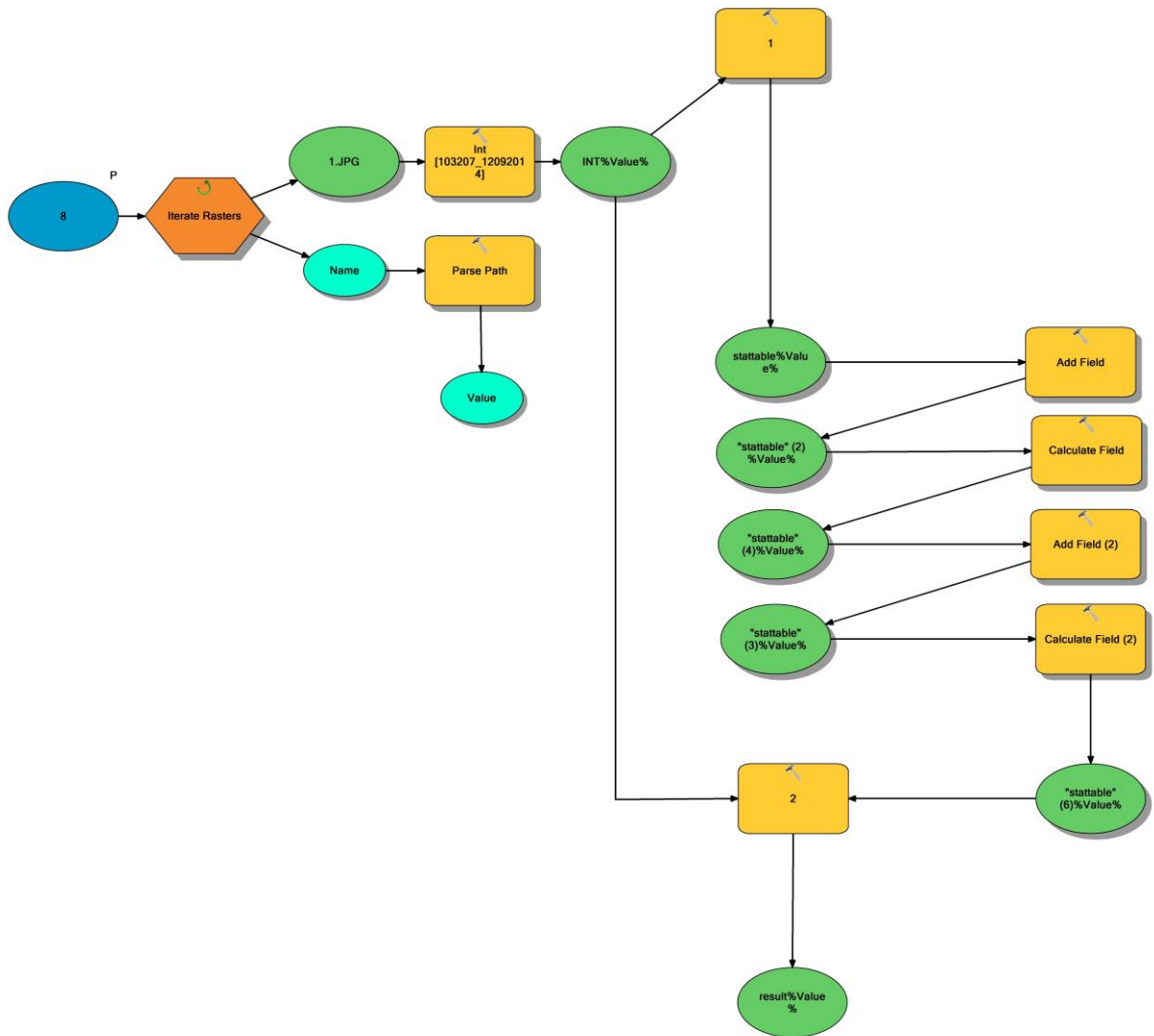
A lombkorona fedettség meghatározását fényképezőgéppel végeztem el a csapadékmérő edény tetejéről, mivel csapadékmérő hengeren vízszintjelző buborék található, ezáltal közel azonos területet fényképeztem minden alkalommal. A fényképek készítése során az alábbi beállításokat alkalmaztam: 1/60 s zársebesség, a rekesz értéke állandóan változott a fényviszonyok miatt, fix ISO100 fényérzékenység mellett. A fénykép készítése alkalmával fekete-fehér (8 bit, monochrome) fényképeket készítettem (49. ábra). 18-55 mm átmérőjű objektívet alkalmaztam, mely teljesen nyitva volt minden egyes fénykép készítésekor (18 mm). A monokróm fényképek százalékos kvantitatív kiértékelése az ArcGIS 10.2-es szoftverkörnyezetben végeztem el.



49. ábra A fedettség mértéke a 7.1 mérőponton 2011.04.15-én (a) és 2011.05.12-én (b)

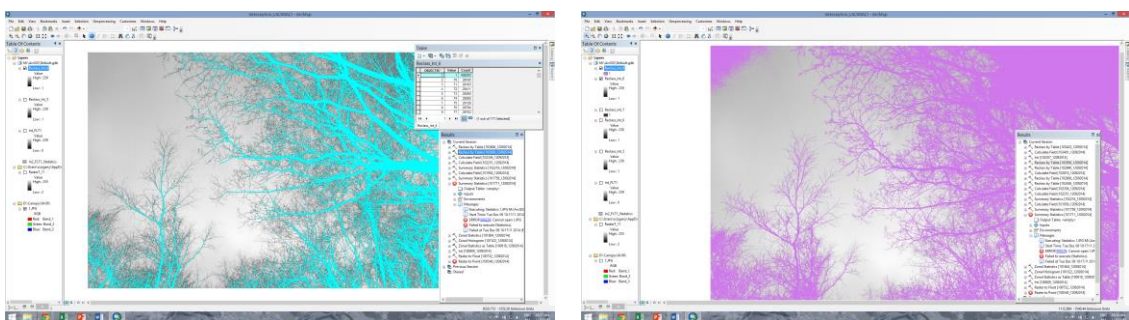
### 3.3.2. Fényképes adatok kiértékelése Arc GIS szoftverkörnyezetben

Az elkészített fényképek elvi és gyakorlati lehetőséget adtak a lombkorona modellterének leképezésére. A kiértékelés azt jelentette, hogy meghatároztam a fátlan és lombkorona pixelek arányát a hisztogram alapján. Mindezt a képek nagy száma miatt automatizáltam (50. ábra).



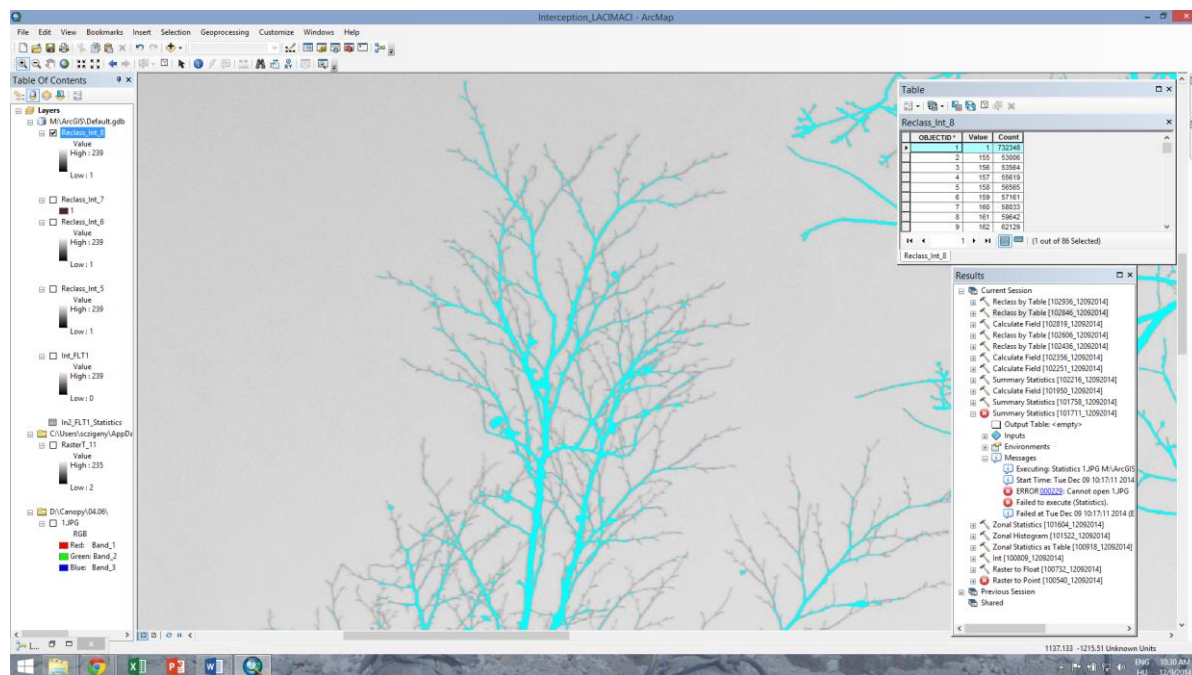
50. ábra A 8 bites monokróm fényképek elemzési mechanizmusa az ArcGIS- ModelBuilder szoftverkörnyezetben

Az automatizált leválasztási folyamatot megelőzően megállapítottam a szürkeárnyaltos határértéket. Ez az értékhatározta meg a fehér és fekete pontok szétválasztási alapját (51. ábra).



51. ábra Elválasztási határérték meghatározása ArcGIS/ArcMAP 10.2-es szoftverkörnyezetben (bal oldali képen aluli, a jobb oldali képen pedig a túlzott leválogatás eredménye látható)

Az 52. ábra mutatja a végső meghatározás alapját, amely  $\text{átlag} \pm 0,5 \text{ szórás}$  értéken lett meghatározva minden egyes képen. Jól látható, hogy itt is található még pár pont, ami fehér pontok közé lett sorolva, de sokkal több zavaró érték jelentkezett a magasabb ( $\text{átlag} \pm 0,75 \text{ szórás}$ ) alkalmazása esetén (53. ábra).



52. ábra Matematikai alapon történő fehér és fekete pontok elválasztása ArcGIS-ben

(a)



(b)



53. ábra A fekete és fehér pixelek elkülönítés: az eredeti fotó (a) és a származtatott, csak fekete és fehér pixeleket tartalmazó fénykép (b)

Az éves fedettség trend modellezésére alkalmas lehet a módszer, de több hibalehetőség is felmerülhet a fényképkészítés és fotóanalízis során, mint például a légmozgás hatása, az eltérő fényképezési szög, valamint a fekete-fehér konverzió hibája a küszöbérték meghatározásakor.

### **3.4. Árvízhozamok előrejelezhetősége a korai számítási módszerektől a számítógépes alapú numerikus lefolyásmodellekig**

A számítógépes hidrológiai modellfuttatásokat megelőzően is voltak már törekvések arra, hogy előrejelezzék és megbecsüljék egy adott keresztmetszvényben vízállásokat és tetőző vízhozamokat, ezeket az alábbiakban összefoglalóan egyszerű módszereknek nevezem. A kisvízfolyásokon ez a feladat, azaz a mértékadó vízhozamok előállítása még nagyobb nehézségekbe ütközött, mind a mai napig. Manapság azonban főként számítógépes lefolyásmodellek segítségével számoljuk a tetőző vízhozamokat. A jelen dolgozatban érintőlegesen használtam az egyszerű numerikus modelleket is, azonban dolgozatom fő célja a tetőző vízhozam számítás az AGWA számítógépes lefolyásmodell felhasználásával, melyet a Bükkösdi-vízfolyásra végeztem el első sorban, azonban további két villámárvízzel veszélyeztetett vízfolyásokra is kiterjesztettem (Karasica-patak, Baranya-csatorna).

A Karasica-vízfolyást azért választottam, mert a felső vízgyűjtője szintén dombvidéki jellegű, így gyakran alakulhatnak ki hirtelen vízhozam csúcsok, heves, intenzív csapadékesemények alkalmával. Ezen a vízfolyáson is történt a 2010 májusában és júniusában helyi vízkáresemény. A vízfolyás elöntötte Bóly települést, elúsztotta a helyi iskola tornatermét is. Megjegyezendő, hogy a Karasica határt metsző vízfolyás, így fontos a szomszédos Horvát Vizek (*Hrvatske Vode*) időbeli tájékoztatása a vízfolyáson esetlegesen levonuló, vagy éppen várható árhullámokról.

A Baranya-csatorna vízgyűjtőjén található települések esetében is nagymértékű veszélyeztetettség jellemző, valamint a 2010. május-júniusában történt vízkáresemények hívák fel a figyelmet a területre. 2010-ben még a töltés (depónia) átvágására is szükség volt, annak érdekében, hogy a vízfolyás alsóbb szakaszán található települések ármentesítését elvégezzék.

#### **3.4.1. Egyszerű árvízhozam számítási módszerek**

Az árvizek nagyságának számítására és a vízfolyások árvízhozamának meghatározására a tervezői gyakorlatban több alkalmazott módszer is létezik. Ezeket részben hazai, részben külföldi kutatási eredmények alapján dolgozták ki, közös jellemzőjük, hogy a számításokhoz észlelt, de eltérő hosszúságú és viszonylag rövid adatsorokat vettek alapul. A különféle mérőállomások mind eltérő hosszúságú idősorú adatokkal rendelkeznek, minél hosszabb az adatsor, annál kisebb a statisztikai bizonytalanság vízhozamok esetében. A

pontszerű észlelések területi kiterjesztése a természetes környezet változók csak igen korlátozott mértékű alkalmazására terjednek ki, mivel azok igen bonyolulttá és hosszadalmassá tennék a számításokat, miközben a végeredményre gyakorolt hatásuk bizonytalan, és meghatározásuk is körülményes a hagyományos módszerekkel. Jelentős pontatlanságot eredményez az is, hogy a számítási módszerek alapadatai több évtizeddel ezelőttiek, mára elavultak, akár az adatsorok hosszának, akár az időjárási viszonyok vagy az antropológiai hatások változásának hatásait vesszük figyelembe.

Az eddig meglévő, a mérnöki gyakorlatban leggyakrabban alkalmazottak a Csermák, Koris, Kollár, Racionális (KORIS 2014) módszerek. Ezek általában egyszerű, terület alapú modellek (a racionális módszer kivételével), ezáltal, sok esetben, nagy hibahatárral dolgoznak. Természetesen az is előfordulhat, hogy az előzőekben felsorolt módszerek pontos értékeket szolgáltatnak (statisztikai hibahatáron belül), csak esetleg egyéb környezeti változó módosult a vízfolyás mentén, mint például csökkent a vízfolyás levezető sávjának szélessége. A jelenleg meglévő árvízhozam számítási eljárás a Dél-dunántúli vízfolyás hálózatot mindössze két területbe sorolja, valamint, ezeken belül egy szórási sávot ad meg a további finomítás egyedi értékeléséhez. Tehát a témában készült feldolgozás finomításokat igényel (akár csak az is pontosítást eredményezhet, hogy, ha az elmúlt 20-30 év alatt gyűjtött adatok feldolgozásra, azok eredményei pedig integrálásra kerülnének) annak érdekében, hogy az egyes mérési pontokhoz rendelt fajlagos vízhozamok átlagtól való eltérése rögzíthető legyen és ezzel egy-egy izovonalakkal jellemezhető területi megjelenítést nyerjünk.

A vízügyi igazgatóságok végzik a vízkárelhárítási tevékenységek szervezését, összehangolását, szakmai felügyeletét. A vízkárelhárítás, árvízvédelem egyik legfontosabb alapadata a mértékadó árvíz hozam az adott vízfolyás tetszőleges szelvényében. Ennek jogszabályi háttere jelenleg nincs, a műszaki szabályozás a szakirodalomra hagyatkozik, ami vagy a korszerűtlen több évtizedes módszereket, vagy az igen idő- és adatigényes modellezést ajánlja. Ezt a kényszerpályát módosítja a jelen kutatás által létrehozott árvízhozam meghatározási módszer a térinformatika és a szimulációs modellezés lehetőségeinek ötvözetével.

### 3.4.2. Komplex robosztus lefolyási modell alkalmazása árvízhozam előrejelzésekben

Az előzőekben bemutatott egyszerű lefolyási modellekhez képest sokkal pontosabb és részletesebb eredményeket érhetünk el mind térben, mind időben a komplex csapadék-lefolyás szimulációs modellek alkalmazásával, amelyeknél nagyszámú paraméter vehető figyelembe. Azonban a lefolyási modellek mindennapi alkalmazása a gyakorlatban (tervezői, vagy a napi vízkár-elhárítási tevékenységben) ma még nem meghatározó, használata időigényes és a megbízhatósága sem mindig tökéletes.

A DDVIZIG jelenlegi lefolyási modelljének (DDVIR) fejlesztésére és pontosításra a TÁMOP pályázat keretében került sor. A modell alapja az amerikai, az EPA (*Environmental Protection Agency*, Nemzeti Környezetvédelmi Hivatal) által fejlesztett AGWA modell. Az ArcGIS térinformatikai szoftver alá beépülő AGWA modul lehetőséget biztosított rá, hogy egy gyors robosztus modell segítségével kapcsolatot teremtsék a vízgyűjtőben összegyülekező csapadék és a vízgyűjtő környezeti változói között, valamint az árvízi csúcs vízhozamokat modellezhessem aránylag kevés adat felhasználásával.

Csapadék és a talajtelítettségi adatok, valamint a statikus környezeti változók alapján kiszámoltam a tetőző vízhozamokat. A csapadék adatokat, a vízhozam mérési keresztmetszvényhez legközelebbi meteorológiai állomás adataiból használtam fel. A modellezés során lényegében azt vizsgáltam, hogy a mért tetőző vízhozam eléréséhez mekkora csapadékterhelésre lenne szükség, ha a megadott csapadékmennyiség az egész vízgyűjtőterületre esne, ami azt jelentette, hogy a mért adatot területileg arányosítanom kellett.

Minden esetben a tetőző vízhozam értékét próbáltam reprodukálni a lehullott csapadék és a csapadékesemény idejének a kombinálásával. Így kaptam különféle variációjú adatokat egy vízhozam értékre (adott csapadék, adott idő alatt) nomogrammok formájában.

A vízmércén rögzített konkrét adatok eredményeit összehasonlítottam a mérnöki gyakorlatban leggyakrabban használatos statisztikai árvízhozam számítási módszerek eredményeivel. Az AGWA bementi csapadékadatokat, pedig összehasonlítottam a ténylegesen az egy pontban rögzített (legközelebbi) hidrometeorológiai állomás adatával. Az egyes nomogrammból leolvasható, hogy milyen feltételek mellett alakul ki az adott vízfolyásra jellemző tetőző vízhozam érték.

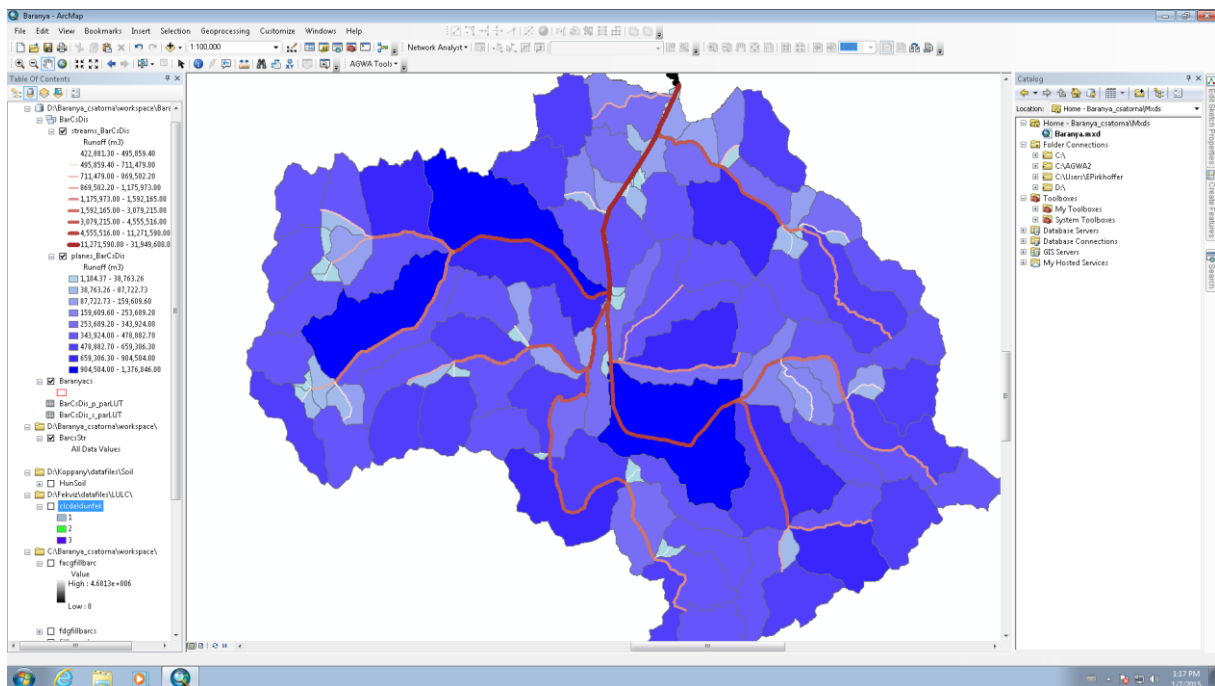


A működő modell létrehozásához a Dél-Dunántúl területén három, villámárvíz által veszélyeztetett vízgyűjtőjét válogattam le (Fekete-víz, Karasica, Baranya-csatorna.). Az AGWA program alkalmazhatóságát a kisvízfolyásokon kialakuló villámárvizek előrejelezhetőségére a fent felsorolt három vízgyűjtőn végeztem el. A vízgyűjtők leválogatás ArcGIS programban végeztem el, és az alábbi főbb lépéseket követtem (8. táblázat).

8. táblázat Vízgyűjtő meghatározás ésleválogatásának főbb lépesei ArcMap szoftverkörnyezetben

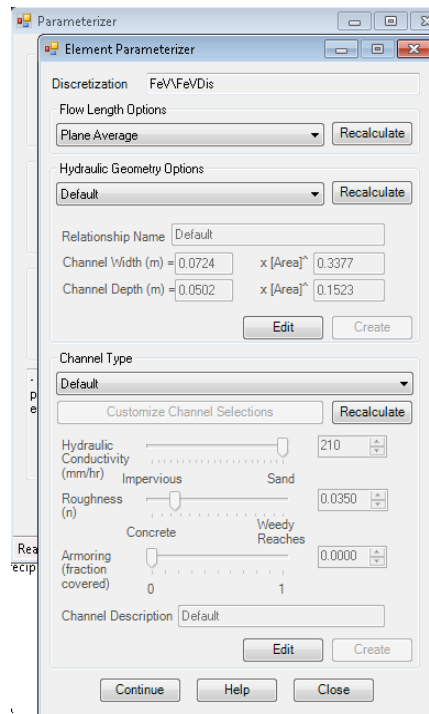
Az egyes lépések elnevezése ArcGIS Saptial Analyst/Hydrology függvénycsoportban	Lépések funkciója
1	DEM hibáinak feltöltése
2	Folyásirány meghatározása
3	Víz-összegyülekezés meghatározása
4	Vízgyűjtő kifolyási pontjának letétele
5	Vízgyűjtő létrehozása
6	A raszteres állomány vektorizálása

Az AGWA modellben a hat létrehozott részvízgyűjtőt egyenként importáltam ArcGIS-be. A szükséges mappabeállításokat követően a vízgyűjtő meghatározását (*Watershed Delineation*) végeztem el. A diszkretizáció végeredményei a kvázi részvízgyűjtők, illetve a lefolyási egységek a vízfolyás jobb vagy bal partján (tehát nem mindig egy teljes részvízgyűjtő, 54. ábra), valamint vízfolyás szakaszok.



54. ábra Lefolyási egységek (*planes*) felosztása az AGWA programban *Discretization* függvény alapján, a Baranya csatornán

A lefolyási egységek létrehozása után elvégeztem ezek, illetve a vízfolyás szakaszok parametrizációját. Ez tartalmazta a mederparaméterek létrehozását, a felszínborítás és a talajtani tényezők hozzárendelését a mederhez és a lefolyási egységekhez. A meder parametrizálásánál először a meder szélességet adtam meg (55. ábra). Itt a mederszélességet az alábbi egyenletek (9. és 10. egyenletek) megadásával végeztem el.



55. ábra Meder parametrizációs beállítások AGWA programban

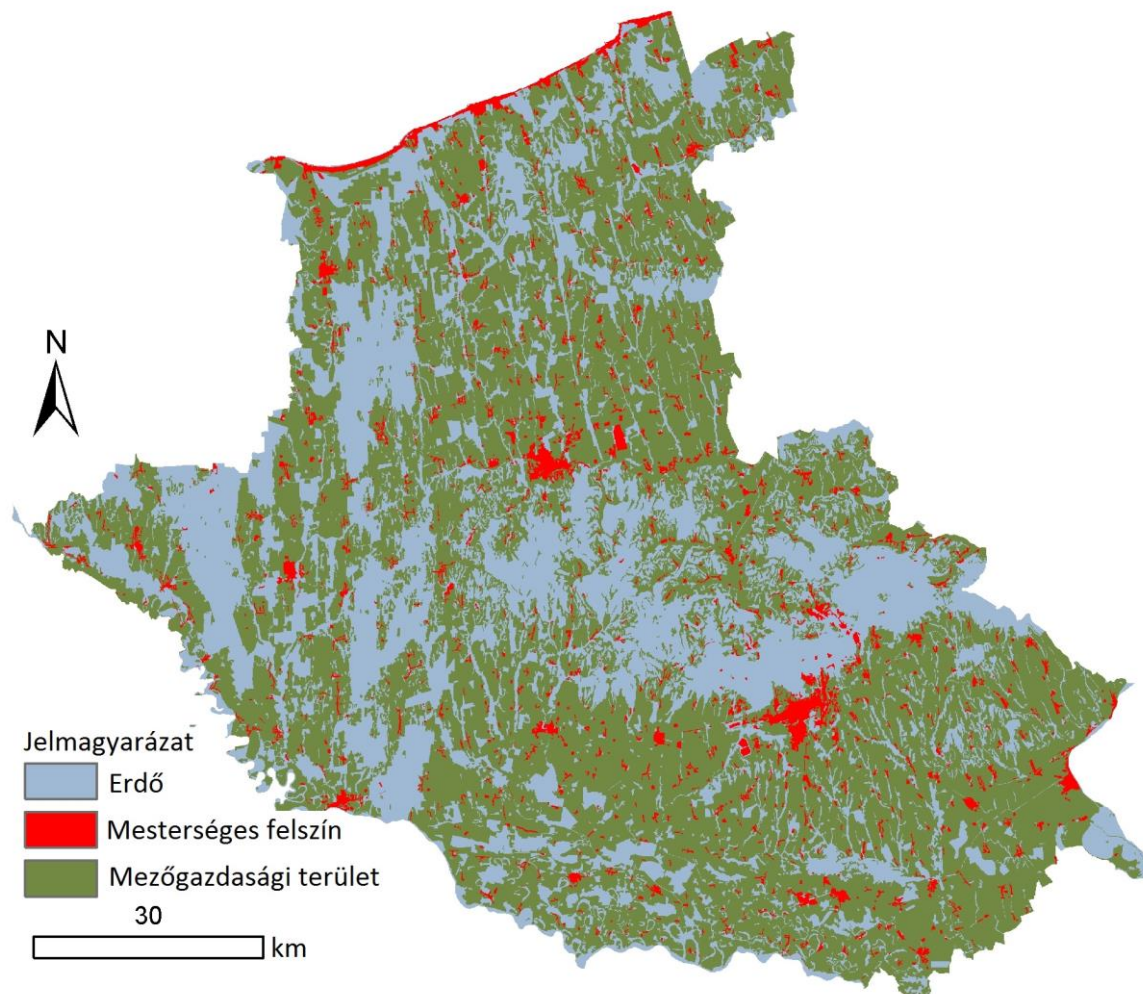
$$\text{Megerszélesség} = 0.0724 * A^{0,3377} \quad [ 9 ]$$

$$\text{Mélység} = 0.0502 * A^{0,1523} \quad [ 10 ]$$

ahol:

$A$  = az adott szelvény feletti vízgyűjtő összterülete

Az egyenletből következően a torkolat felé haladva egyre szélesebb medret állít elő a program. A medertípus kiválasztásánál a modellben szereplő alapbeállításokat alkalmaztam. A következő lépésben a felszínborítási paramétereket adtam meg. Itt leválogattam a CLC 2000 alapján az egyszerűsített kategóriákat, amelyek befolyásolhatják a felszíni lefolyást. Az egyszerűsítés eredményeképpen három kategóriát hoztam létre: erdőt, mesterséges felszínt és mezőgazdasági terület (56. ábra).



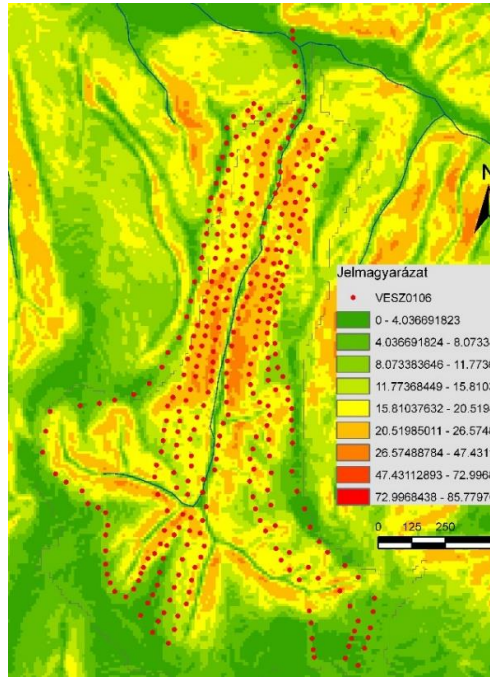
56. ábra Egyszerűsített felszíntípusok, CLC 2000 felosztás alapján a Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság működési területére

### 3.4.2.1. Az AGWA talajt jellemző értékeinek a parametrizálása

Az AGWA modellfuttatásokhoz szükség volt a területre és a kisvízfolyásokra jellemző környezeti változók és bemeneti paraméterek ismeretére. Az AGWA talaj oldali parametrizációját három módszerrel határoztam meg: a talajvastagság meghatározását terepi mérésekkel, a szemcseeloszlás meghatározását laboratóriumi mérésekkel, a genetikai típust az AGROTOPO adatok FAO talajtípussá történő konvertálásával oldottam meg.

#### 3.4.2.1.1. A talaj vastagságának a megállapítása

A méréseim célja az volt, hogy meghatározzam a talaj vastagságát, valamint a fizikai talajféleségek térbeli eloszlását a Pósa-völgyben (57. ábra), mint reprezentatív középhegységi vízgyűjtőben, jobb területi felbontásban, mint az AGROTOPO esetében.



57. ábra A Pósa-völgy domborzati modellje alapján készült lejtőszög térkép, valamint a VESZ alapú talaj- és üledékvastagság mérések helyszínei

A talaj vastagának megállapítására vertikális elektromos szondázást, mint geoelektromos-geofizikai módszert alkalmaztunk (továbbiakban VESZ). A Pósa-völgy teljes területén 50 méteres hálóban végeztük el a szondázást. A méréseket a RESP–12 geoelektromos rendszerrel végeztük (58. ábra), melyet a KBFI-Triász a DIAPIR Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben gyártott DIAPIR-10 műszerből fejlesztett ki. A mérőegység magából a műszerből, két hagyományos kábeldobból, valamint négy darab rozsdamentes acél elektródából állt. Egyes VESZ pontok esetében validáló fúrásokat is végeztünk a KUBOTA KCR 121R kéthengeres dízelmeghajtású hidraulikus fúrógép/ CPT sajtológép segítségével, 125 mm átmérőjű fúróspirállal, védőcső nélkül. A fúrás mód szárazfúrás volt, a fúróspirál átmérője pedig 60 mm volt (59. ábra).



58. ábra A RESP-12 geoelektromos műszer (Fotó: Czigány Szabolcs)

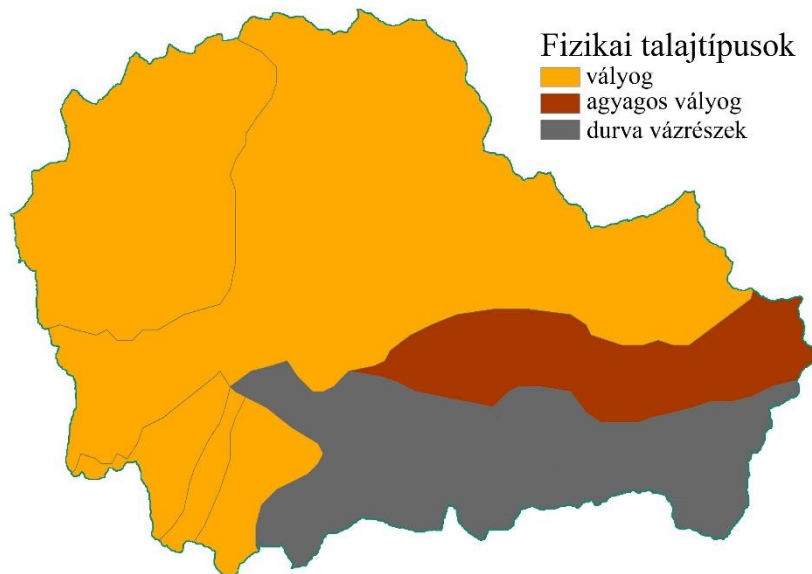


59. ábra A talaj- és termőrétegvastagság meghatározása közben használt eljárások: (a) Stihl BT 360 kézi talajfúró használat közben. (b) Kubota KCR 121 R típusú önjáró fúrógép (c) RESP-12 VESZ kezelőfelülete, (d) multielektrodás szonda kezelőfelülete (e) dinamikus szondázás, (f) fúrásmag-minta a Pósa-völgy É-i részéből, (g) multielektrodás szonda kábelhálózata (fotó: Czigány Szabolcs)

A vizsgált vízgyűjtő fizikai talajtípusai elsősorban vályog, illetve agyagos vályog kategóriába tartoznak az AGROTOPO adatbázis adatai alapján (60. ábra és 9. táblázat). A vizsgált terület leggyakoribb genetikai talaj főtípusa a barna erdőtalaj. Mivel az AGROTOPO adatbázis felbontása túl elnagyolt ekkora vízgyűjtőre, ezért egy korábbi szakdolgozat keretében elvégeztük a részletes talajtani térképezést (Zalavári 2008, 60. ábra). A genetikai altípusok közül az agyagbemosódásos barna erdőtalaj a leggyakoribb (ABET), de előfordul savanyú barna erdőtalaj, mészmaradványos barna erdőtalaj, Ramann-féle barnaföld és rendzina talaj is.

9. táblázat A főbb fizikai talajfélések területi részaránya a Bükkösi-víz vízgyűjtőjében.

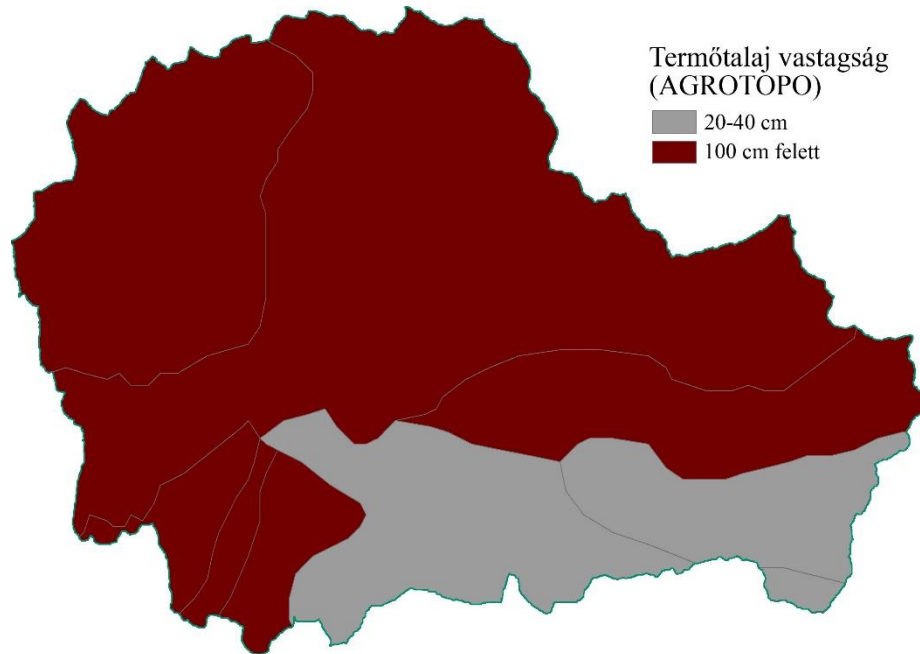
Fizikai talajfélések	Terület (km <sup>2</sup> )	
	AGROTOPO	Zalavári (2008) felmérése alapján
homok	nincs	0,56
homokos vályog	nincs	8,00
vályog	75,83	81,71
agyagos vályog	12,35	17,58
agyag	22,96	3,06



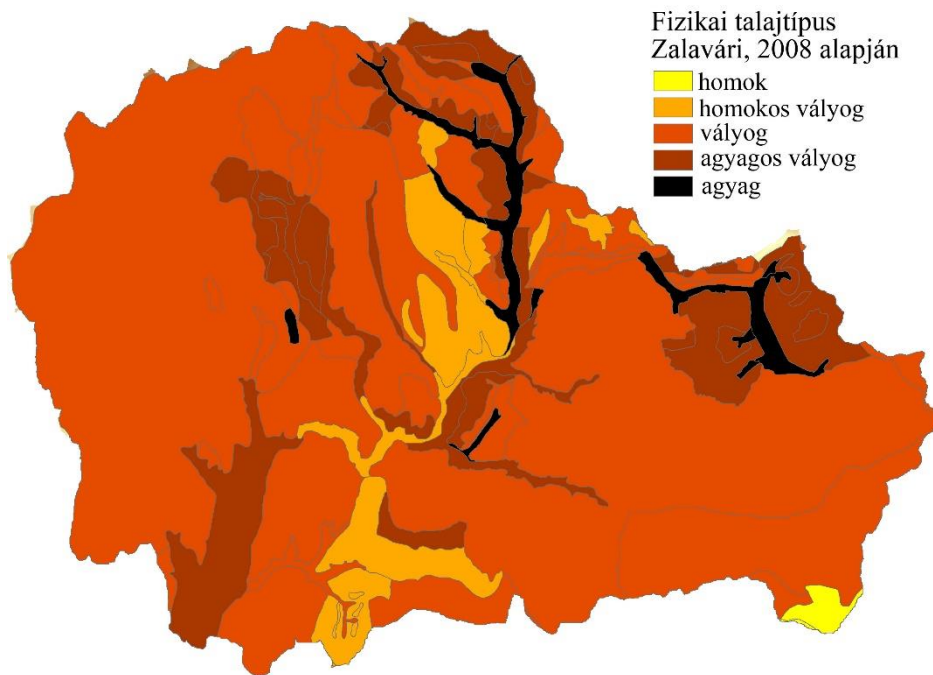
60. ábra A főbb fizikai talajfélések elhelyezkedése a Bükkösi-víz vízgyűjtőjében az AGROTOPO adatbázisa alapján

A talajréteg vastagságának ismerete elengedhetetlenül fontos a pontos lefolyásra vonatkozó előrejelzések megalkotásakor. A magyarországi adatbázisok azonban nem a talajvastagságot, hanem a termőréteg-vastagságot (61. ábra) határozzák meg, A VESZ mérések alapján azonban a laza üledék vastagságának meghatározása volt lehetséges, ami magában foglalhatja a közetmálladékot, regolitot, vagy akár a laza Pannon korú üledékeket is.

Korábbi kutatásaink rámutattak arra, hogy villámárvíz esetén csak a talaj legfelső, néhány cm-es rétege tud aktívan részt venni a lefolyás mérséklésében (Czigány et al. 2010). Azonban a talajnedvesség tározásának megbecslése szükségzserű a csapadék-lefolyás modellekkben, s olyan meteorológiai helyzetekben, mint amelyek az elmúlt években árvizeket okozták, már részletesebb talajtani ismeretekre van szükségünk.



61. ábra A termőtalaj vastagságának térbeli alakulása a Bükkösdí-víz vízgyűjtőjében az AGROTOPO adatbázisa alapján



62. ábra Fizikai talajfélések térbeli eloszlása ZALAVÁRI (2008) alapján a Bükkösi-víz vízgyűjtőjében

### 3.4.2.1.2. Szemcseeloszlás meghatározása

A talajminták tömegalapú nedvességtartalomnak meghatározását szárítószekrényben (Linn High Term GmbH, Németország) történő szárítással végeztem 105°C-on súlyállandóságig, BÚZÁS (1993) módszerei alapján. A szemcseeloszlás meghatározása előtt a talajmintákat kémiaileg kezeltem, hogy elősegítsem a talajaggregátumok diszpergálását. A szervesanyag eltávolításakor 100 g tömegű talajmintához 100 ml H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oldatot adtam, majd 24 órán át inkubáltam a mintákat. A szénsavas mésztartalmát 100 ml (bár a pontos mennyiség változott a talajminta mésztartalmának függvényében) 10 %-os HCl (sósav 20 tömegszázalékos) oldattal végeztem el 24 órás inkubálás során. További aggregátumok kialakulását pedig 100 ml 10 %-os nátrium-acetátos oldat 60 percen át történő kezelésével akadályoztam meg. A tömegmérést követően behelyeztem a mintákat a szárítószekrénybe, majd ismételtelen lemértem a tömegét. A durva szemcsefrakció szemcseeloszlását rázógéppel (Fritsch GmbH, Idar-Oberstein, Németország) és szitasorral határoztam meg. A szitasorozat 2 mm, 500 µm, 250 µm lyukbőségű szitákból állt. Az átszitálást vízzel segítetttem elő. Az egyes szitákon visszamaradt szitálási maradékokat összegyűjtöttem, a szitátgot és a mintákat szárítószekrényben kiszárítottam. A legkisebb szemcseátmérőjű frakciót, ami a 250 µm átmérőjű szitán átesett, további szemcseeloszlás analízisre használtam fel. Ez utóbbi frakció

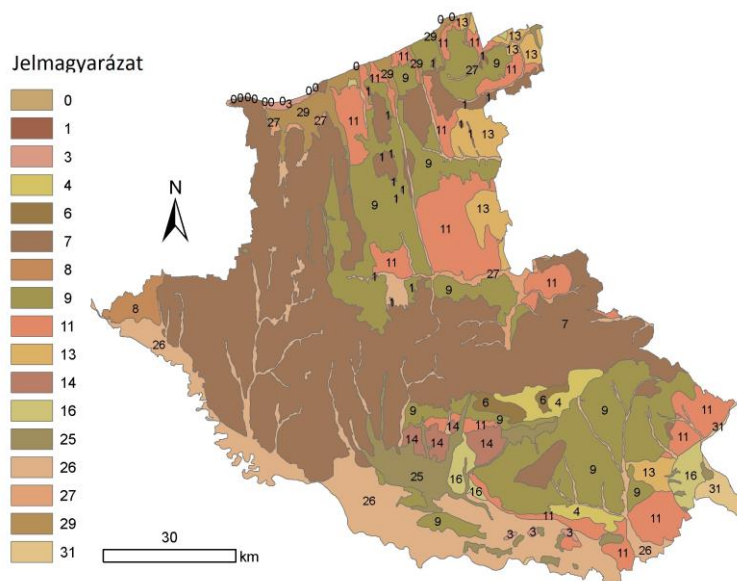


meghatározása *static light scattering* módszerrel történt, lézeres szemcseeloszlás meghatározó készülékben (Fritsch Analysette Pro22) a Fraunhofer-egyenletet használva.

### 3.4.2.1.3. A Dél-Dunántúl genetikai talaj típusainak meghatározása

Az AGROTOPO a magyar felosztásban szereplő, genetikai alapú talaj fő- és altípusokat tartalmazza. Az AGWA modell azonban vagy USDA (*United States Department of Agriculture*) vagy FAO (*Food and Agriculture Organization*) bemeneti talajtípusokat tud feldolgozni, illetve értelmezni. Ehhez szükségem volt a magyar genetikai talajtípusokat a FAO kategóriákkal megfeleltetnem, lefordítani a FAO-ban szereplő talajtípusokra (10. táblázat).

A genetikai talajtípusok térbeli eloszlásának a megállapításához az AGROTOPO adatbázisát használtam fel (63. ábra).



63. ábra A Dél-Dunántúl genetikai talajtérképe, az AGROTOPO adatbázis alapján. A számok az egyes AGROTOPO talajtípus azonosítókat jelöli

10. táblázat Magyar genetikai talajtípusokat konverziója a FAO osztályoknak megfelelően (Soil Atlas of Europe 2005 évben kiadott, majd 2015 évben pontosított új WRB osztályozás alapján)

AGROTOPO Szám	AGROTOPO Genetikai talajtípus neve	FAO Név	AGWA/FAO SNUM
1	Köves és földes kopárok	Leptosols	6494
3	Humuszos homoktalajok	Leptosols	3141
4	Rendzina	Rendzina	6494
6	Savanyú, nem podzolos barna erdőtalajok	Haplic Luvisol	6571
7	Agyagbemosódásos barna erdőtalaj	Chromic Luvisol	6550
8	Pszeudoglejes barna erdőtalaj	Gleyic luvisols	6559
9	Barnaföldek (Ramann)	Chromic Cambisols	6400
11	Csernozjom barna erdőtalaj	Eutric Cambisols	6434
13	Mészlepedékes Csernozjom	Calcic Chernozem	6485
14	Alföldi Mészlepedékes Csernozjom	Calcic Chernozem	6485
16	Réti csernozjom	Luvic Chernozem	3067
26	Réti öntéstalajok	Calcari fluviols	3141
27	Lápos réti talaj	Calcari fluviols	3141
29	Lecsapolt és telkesített síkláptalajok	Calcari fluviols	3141
31	Fiatal nyers öntéstalajok	Calcari fluviols	3141

### 3.4.3. A parametrizált AGWA program

A pécsi székhelyű Innoteq Kft. programozói segítségével, egy TÁMOP pályázat keretében a hidrológiai modellnek egy felhasználóbarát felületét hoztuk létre. Ez a felület a közeljövőben publikusan is elérhető lesz a DDVIZIG honlapján. Itt kiválasztató lesz a fentiekben említett három vízgyűjtő (Karasica, Fekete-víz, Baranya-csatorna) digitális domborzati modellje. Az ArcGIS alatt a felső menülecében található egy Vízhozam számítás menüpont, amelyre kattintva egy új ablak jelenik meg öt menüponttal. A baloldali menüpontban választhatók ki a vízgyűjtők. A második menüpontban (64. ábra) kell megadni a csapadékot és a talajnedvesség telítettséget (*saturation level*), vagy a csuszán, vagy egyszerűen begépeljük az értéket (0,14 és 0,93 között). Ez utóbbi tehát nem talajnedvesség tartalom, amennyiben ilyen adatunk van, akkor a talajporozitás ismeretében kiszámolható a talajnedvesség telítettségi értéke az alábbi egyenlettel (11. egyenlet):

$$S = \theta_v \times \varepsilon^{-1} \quad [ 11 ]$$

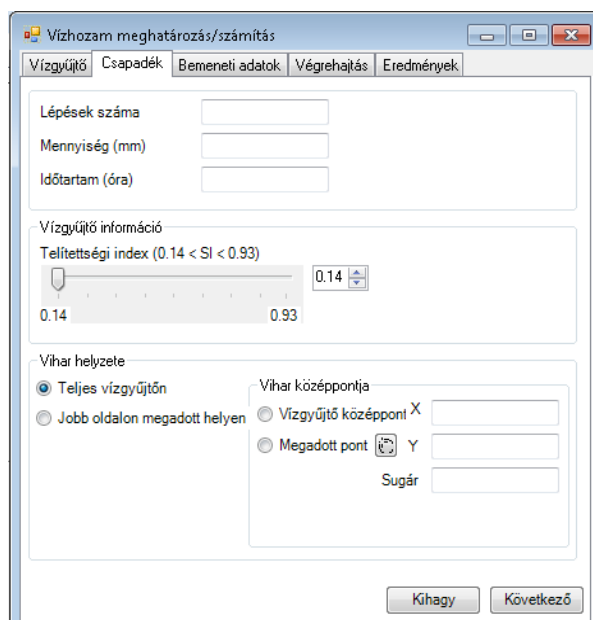
ahol:

$S$ = a talajnedvesség telítettség a talajban

$\theta_v$ = a térfogat alapú nedvességtartalom ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ )

$\varepsilon$ = a porozitás

A csapadék bemeneti adatok esetében három változó megadása szükséges a lefolyási programban (64. ábra). A legfelső ablakba (lépések száma) a csapadékesemény mérési intervallumainak a száma kerül, (pl. ha 1 órás esemény volt 10 perces mérésekkel, akkor  $60/10 = 6$ -ot írunk ide), a második (mennyiség) a csapadékesemény csapadékösszege mm-ben, a harmadik ablak pedig a csapadékesemény teljes időtartama. A következő menüpont a bemeneti adatok (meder, felszínborítás és talaj, ezeket definiáltam előre, ezek nem változnak, statikus bementi paraméterek), a 4. fül a futtatás (Végrehajtás), míg az ötödik (Eredmények) az eredmények megjelenítése fül. A kiválasztott események csapadékadatainak és a kezdeti talajnedvesség értékek beírása után már könnyen ment a vízhozam számítás, a nehézség a talajnedvesség beírása volt, mivel sok esetben nem volt erre vonatkozó adatom.



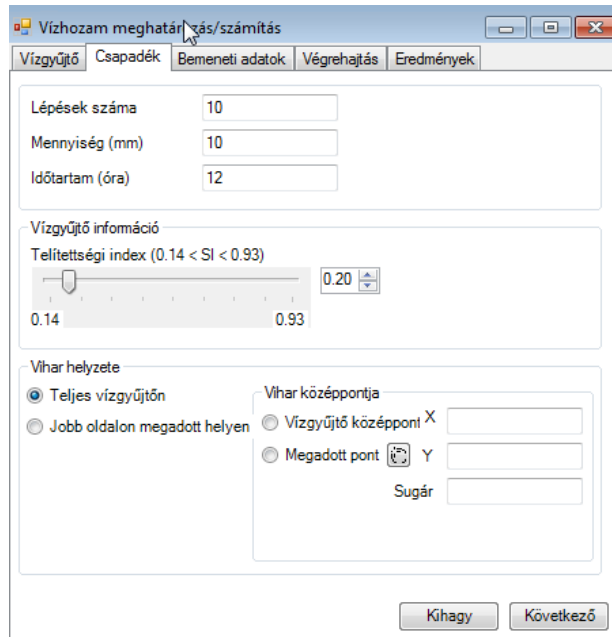
64. ábra Vízhozam számítás menüpont az Arc GIS programban

Az AGWA csapadék-lefolyás modell Dél-Dunántúli vízgyűjtőkre történő kalibrálásához több kiválasztott nagyvízi esemény, tetőző vízhozam és csapadék adatait

használtam fel. A célom az volt, hogy a robosztus modellen keresztül bemutassam a csapadék, vízhozam kapcsolatát több hegy- és dombvidéki vízgyűjtőn. Ehhez válogattam le jól definiálható árvízi eseményeket Dél-dunántúli vízgyűjtőkre.

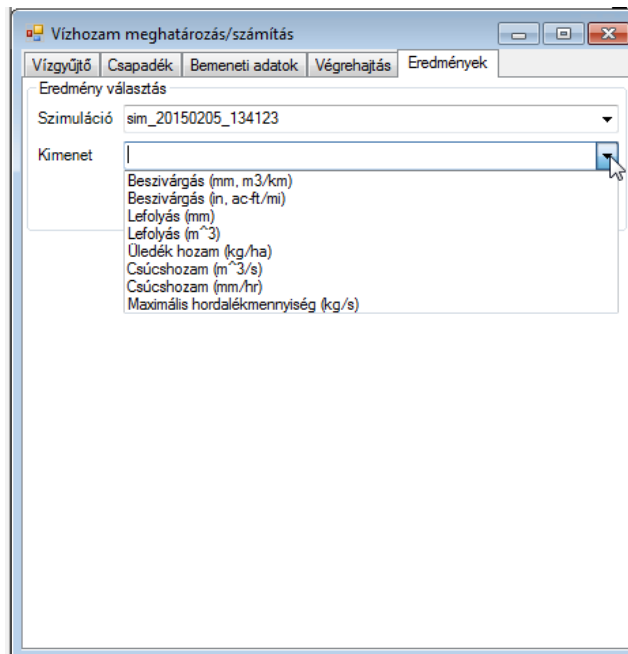
A csapadék adatokat a vízhozam mérési keresztmetszethez legközelebbi meteorológiai állomás adataiból használtam fel. A modellezés során lényegében azt vizsgáltam, hogy a mért tetőző vízhozam eléréséhez mekkora csapadékterhelésre lenne szükség, ha a megadott csapadékmennyiség az egész vízgyűjtőterületre esik. Ehhez leválogattam, a DDVIZIG által rendelkezésemre bocsátott adatokból, az esemény alatt rögzített tetőző vízhozam értékeket, így a csapadékatok (mennyiség, időtartam) kapcsolatát tudtam feltárni, valamint ezek alapján elvégeztem az AGWA modell kalibrálását Dél-Dunántúli vízgyűjtőkre.

A programban a vízgyűjtő kiválasztása után vittem be a csapadékeseményekre jellemző adatokat. A csapadékatok bevitelénél a lépések száma minden egyes esetben 10 volt, ezt a nem változtattam az elemzéseim alkalmával. A második a csapadék mennyisége volt mm-ben kifejezve (65. ábra). Mivel legtöbb esetben napi csapadékatok álltak csak rendelkezésemre, ezért választottam a 10 lépéses eseményekben való modellezést. Utána még szükséges megadandó érték a csapadék esemény időtartama órában kifejezve, ezt 3; 4,5; 6; 8 és 12 órára állítottam be modelfuttatástól függően. A talajba való beszivárgás, lefolyás (arányának) hatását 0,2; 0,4; 0,6 és 0,8 (kb. 0,1; 0,2; 0,3 és 0,4  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  értékekkel ekvivalens) értékeken vizsgáltam, a modell futtatások alkalmával. A minimálisan vizsgált érték ( $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) extrém száraz talajnedvességnek felel meg, de mivel a csapadékesemények a teljes vízgyűjtőre esett, ezért magas talajtelítettségénél a kifolyási pontnál a modellezett vízhozamok akár 5-szörösen is felülmúlták a tényleges, mért értéket, így praktikus volt ezen alacsony talajnedvesség értékekkel kezdenem a modellezést. A továbbiakban közepesen nedves, nedves és közel telített talajnedvesség esetén is vizsgáltam a keletkező tetőző árhullám nagyságát.



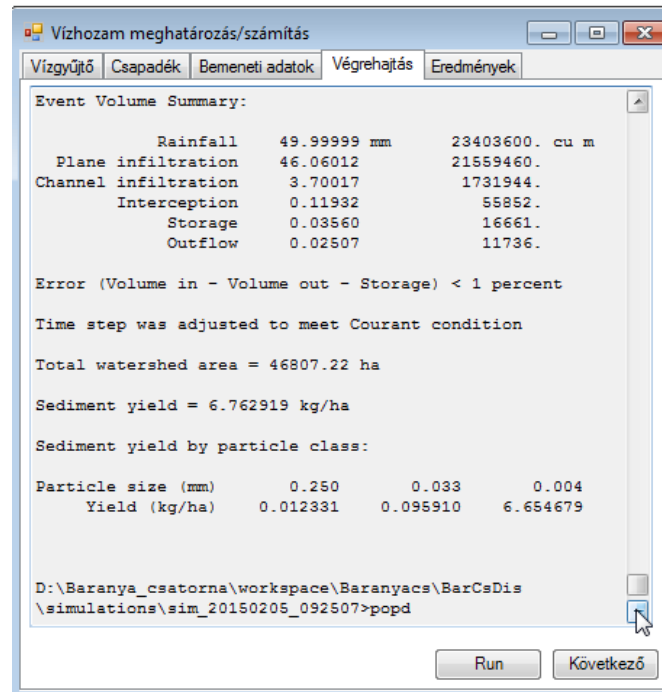
65. ábra A csapadékesemény beállítása az egyik modellfuttatás esetében az AGWA programban. A legelső megadandó a csapadékesemény lépéseinek száma, a másodiknak a csapadékesemény összege, míg a harmadik lépésben a csapadékesemény teljes időtartamát adtam meg.

A kimeneti eredményfájlok közül több hidrológiai paraméter is választható. A kimeneteknél, minden esetben a csúcshozam (tetőző vízhozam) értékét ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ ) választottam ki (66. ábra).



66. ábra Választható kimeneti paraméterek felsorolása az AGWA modellfuttatás után

A modellfuttatás végén a „Végrehajtás” fülben számos eredmény adat jelenik meg (67. ábra), így nem csak grafikusán, de numerikusan is látható a modellfuttatás összegzése, illetve az egyéb eredmények.



67. ábra A végrehajtás fülben láthatóak az elemzés alkalmával megadott és számított értékek

A csapadék összeg és a csapadék időtartamának változtatásával azonban végtelen számú megoldást érhettem volna el. Amikor ezt elvégeztem több tetőző vízhozam értékre (az adott vízfolyásra jellemző), akkor létrehoztam az adott vízgyűjtő AGWA alapú nomogramját, azaz azt a vizuálisan kiértékelhető grafikont, ami megmutatja, hogy adott tetőző vízhozam értékéhez milyen csapadékösszegre és csapadék időtartamra van szükség.

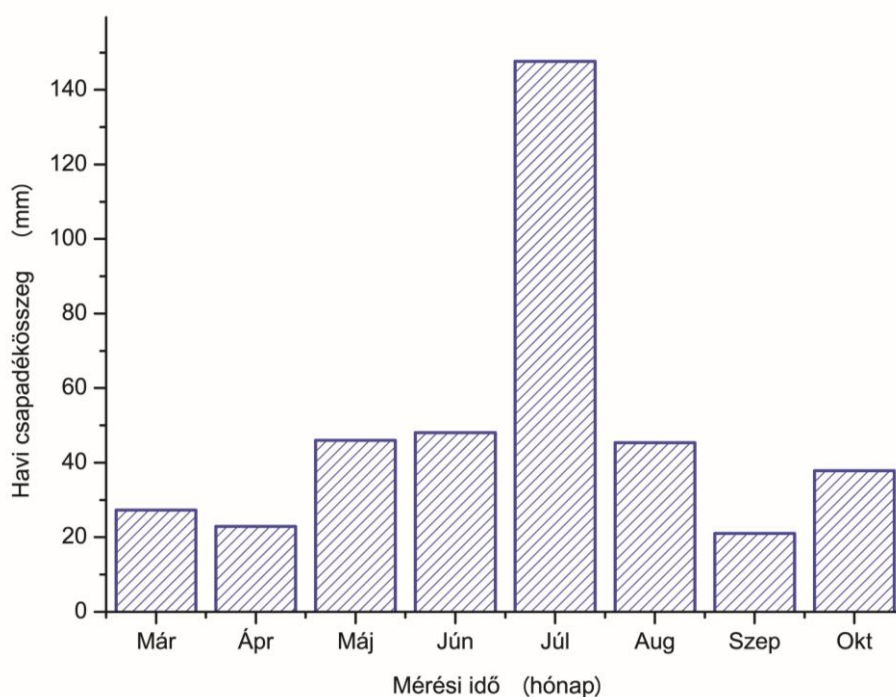
## 4. Eredmények

### 4.1. Egy ultrakisméretű vízgyűjtőn terepi monitoring rendszer kiépítése

A modellfuttatásokhoz pontosításhoz (GIGO hatás elkerüléséhez) elengedhetetlen a megfelelő mennyiségű tér- és időbeli adat. Emiatt kutatócsoportunk létrehozott egy monitoringrendszert egy, a Nyugat-Mecsekben található kísérleti kisvízgyűjtőn (Pósa-völgy). A rögzített csapadék és talajnedvességi adatokat, illetve azok eredményeit külön alfejezetekben tárgyalom. Kutatásom egyedisége, újszerűsége abban rejlik, hogy Magyarországon ezidáig nem vizsgáltak még ilyen térbeli (1,7 km<sup>2</sup>-en 11 mérőpont) és időbeli (10 percnkénti felbontásban) csapadék- és talajnedvességi adatokat. Mérőpontonként közel 150.000 rekord (összesen 11×150.000 adat) begyűjtését, elemzését végeztem el.

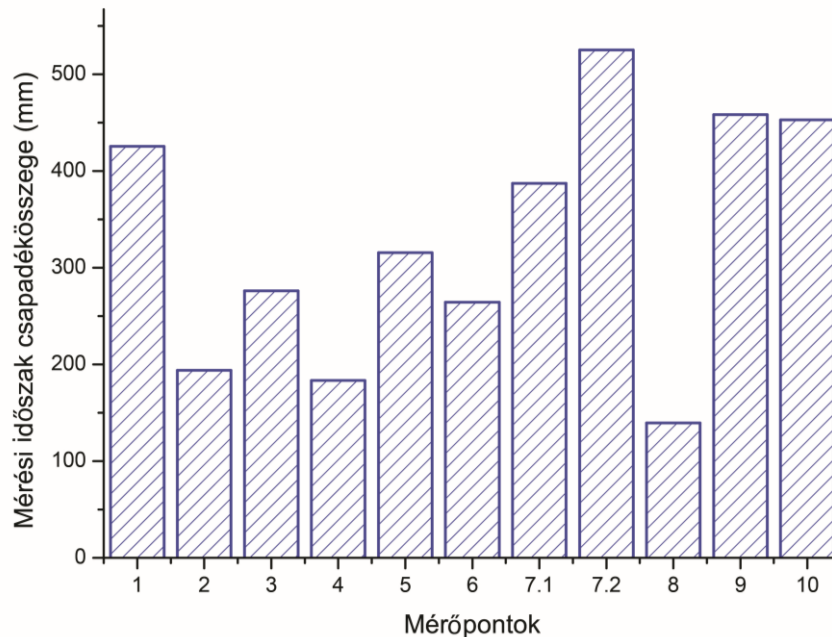
#### 4.1.1. A monitoring rendszer csapadékadatainak jellemzése és értékelése

A gyűjtött adatok alapján, a vizsgálati periódusban, a sokévi átlagnál (706 mm) kevesebb csapadékmennyiség esett a területen. Megállapítható, hogy 2011. évben a havi lebontásban szereplő csapadék maximumok közül, júliusban került rögzítésre a legtöbb csapadék, azonban a többi hónap csapadékösszege alatta marad a sokévi átlagnak (68. ábra). Május, június és augusztus hónapokban közel azonos adatok kerültek rögzítésre (46,0 mm, 48,0 mm, és 45,4 mm).



68. ábra Csapadékadatok havi (átlagos) eloszlása a Pósa-völgyben 2011. március és október között

A vizsgált időszak során mért csapadékösszegeket tekintve jól látható a jelentős térbeli heterogenitás a monitorozott 1,7 km<sup>2</sup>-es nagyságú vízgyűjtőn, igaz itt az intercepció is jelentősen befolyásolhatta a csapadékösszegeket (69. ábra).

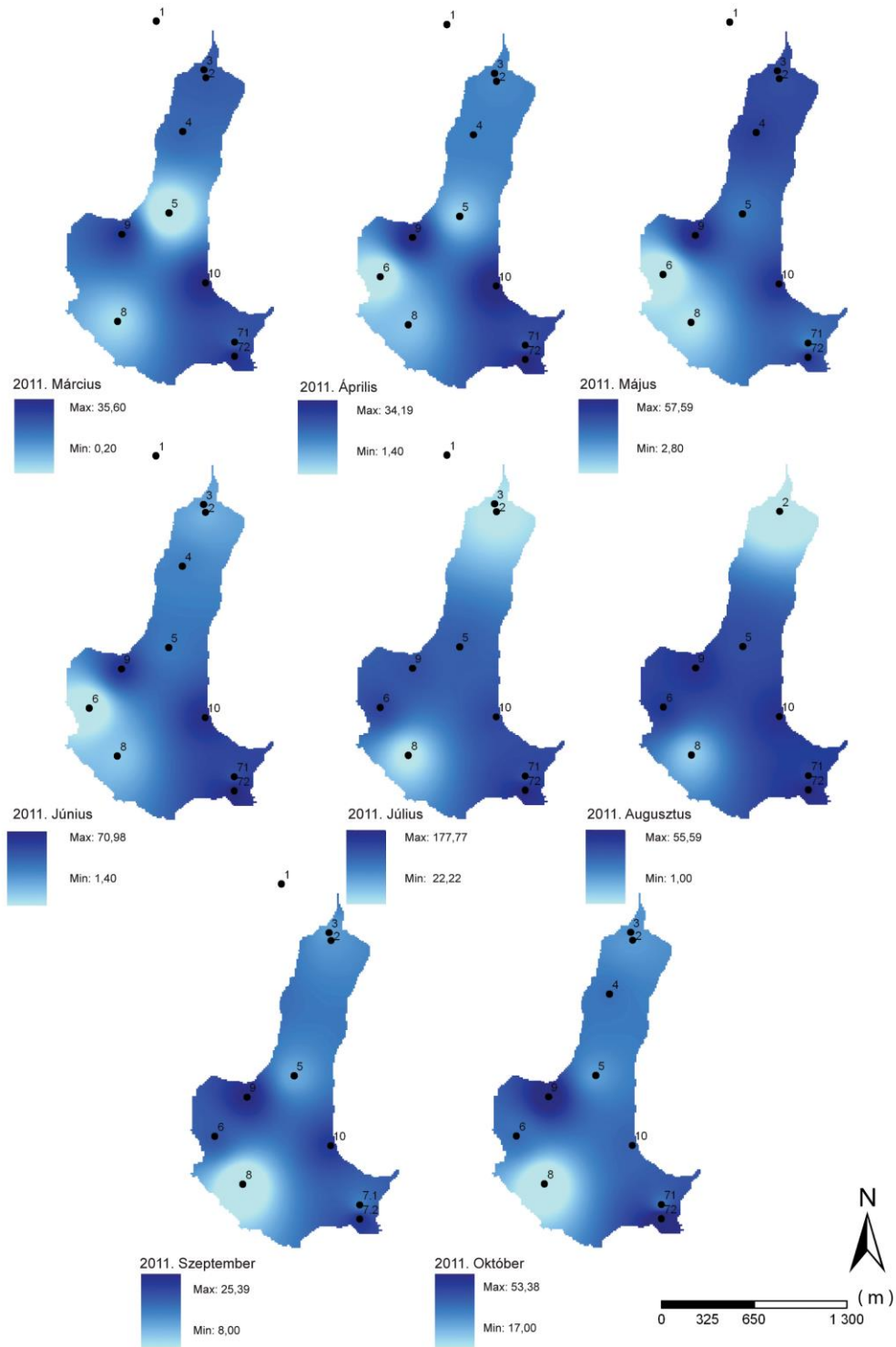


69. ábra A mérőpontok havi csapadékösszegeinek az eloszlása, 2011. évben a Pósa-völgyben

Az 1,7 km<sup>2</sup> nagyságú kisvízgyűjtőn mért csapadékösszegek alapján megállapítható, hogy a 8. mérőponton mértem a legkevesebb (139,6 mm) csapadékot (69. ábra). A legnagyobb mennyiségű csapadék, a nyílt tarvágás közepén, valamint legmagasabban elhelyezkedő (orografikus hatás) elhelyezett 7.2 mérőpont esetében került rögzítésre (525,2 mm).

Az aktuális havi csapadékadatokat területi alapon, a távolsággal fordítottan arányosan interpolált megjelenítését a 70. ábra mutatja, ahol mind a 11 mérőállomás adatait megjelenítettem. A helyi hatások detektálása érdekében csapadékszenzorok eltérő kitettség és borítási viszonyok között voltak telepítve, ilyen módon vizsgáltam a növényzet által visszatartott csapadékösszeget.

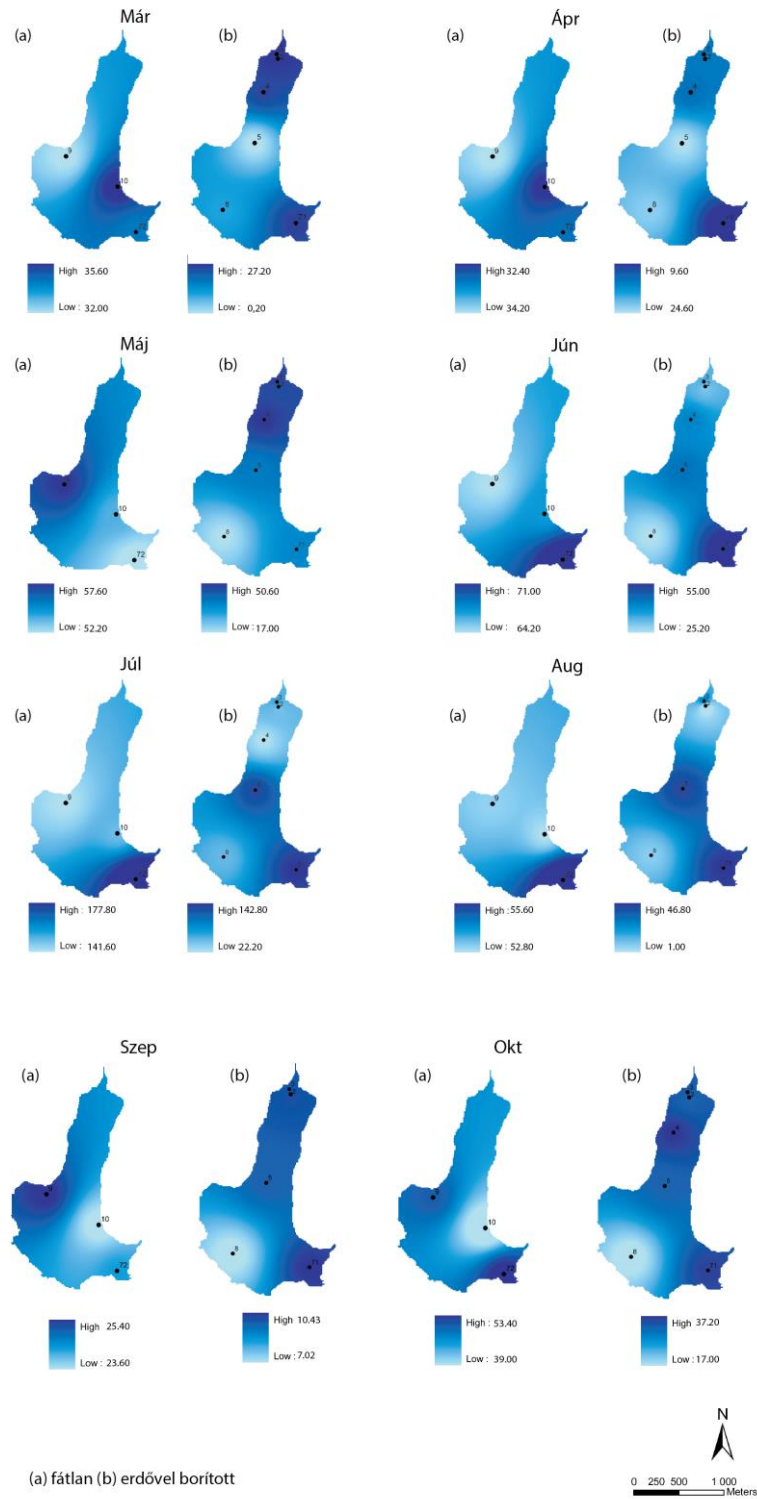




70. ábra Havi csapadékösszegek (mm-ben) a Pósa-völgyben 2011. március és október között

A csapadékösszegek ábra párjainak (ahol a párok az erdővel borított és fátlan mérőpontok interpolációjával készültek) GIS alapú elemzése alapján látszik, hogy az aktuális hónapban mekkora eltéréseket tapasztaltunk az egyes fátlan (a) és erdővel borított

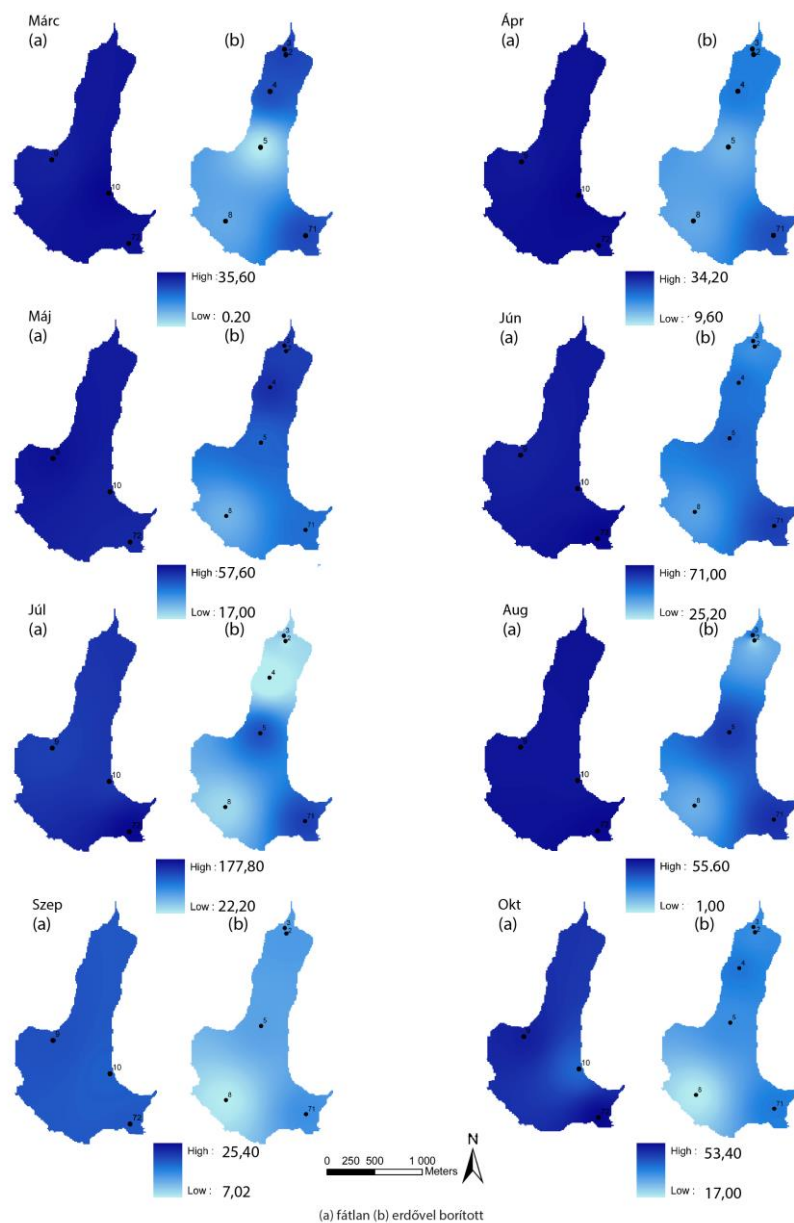
mérőpontok között a Pósa-völgy területén. A létrehozott interpolált csapadéktérképek (71. ábra), alapján elmondható, hogy a vártnak megfelelően minden esetben, a fátlan területekre kihelyezett csapadékregisztrálók mérték a magasabb havi csapadékösszegeket.



71. ábra A fátlan és az erdővel borított területek havi csapadékösszege (mm). Ez a térképsorozat csak a területi eltéréseket mutatja be a havi csapadékösszegek esetében a Pósa-völgyben 2011. március és november között

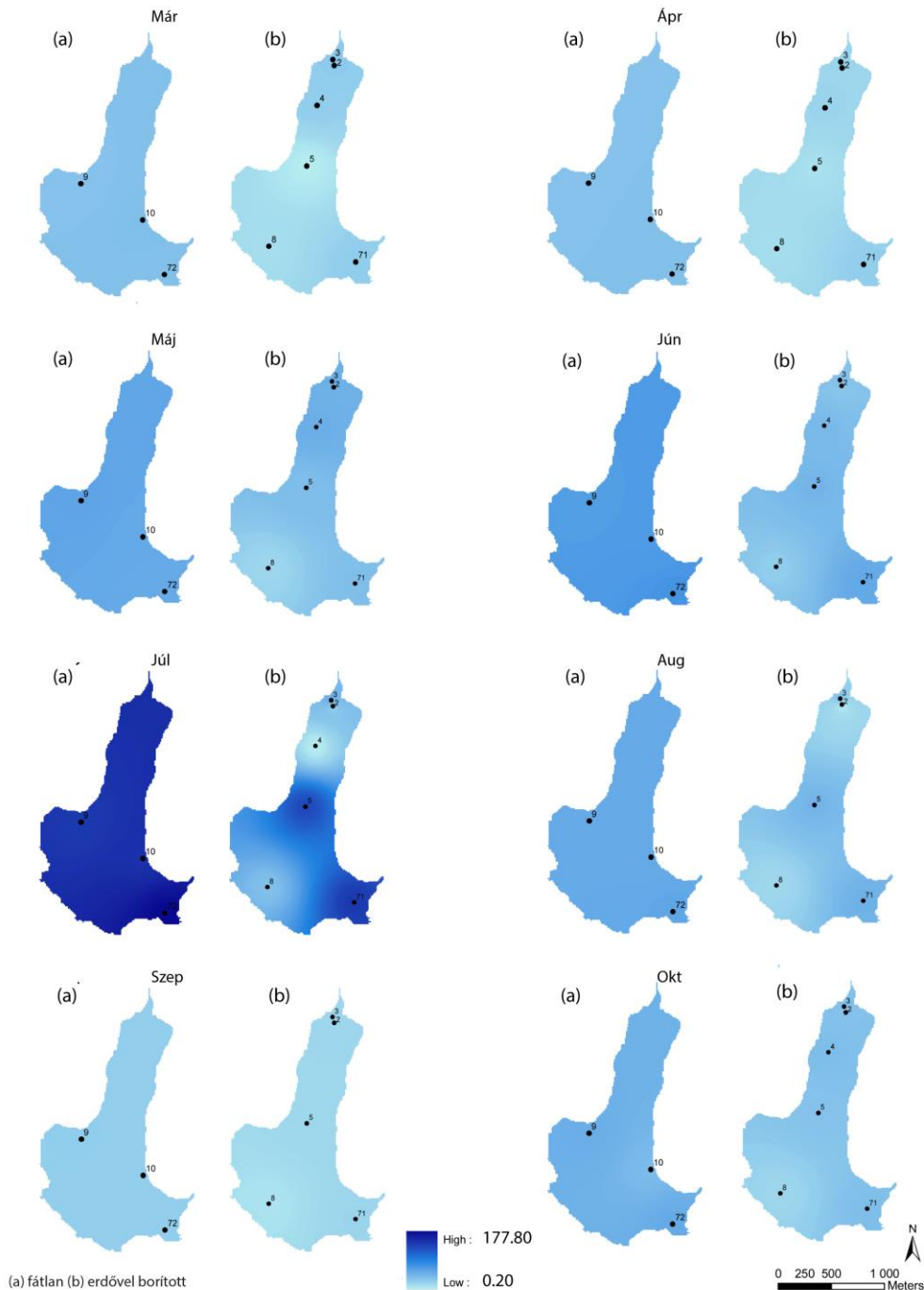
Az átlagos havi csapadékmennyiség csökkenésével (szeptember hónap), a két különféle (a) és (b) mérőpontok közötti különbség csökkent. Az interpolált csapadéktérképeken minden egyes vizsgált hónap aktuális csapadékösszegeit jelenítettem meg.

A fenti adatokat összehasonlítottam úgy is, hogy a fátlan és erdős adatok értékeit a jobb vizualizálhatóság érdekében, azonos csapadékskálát használtam az adott hónapban. Így jobban megállapítható, hogy a havi csapadékösszegek átlaga eltérést mutatott a fátlan (a) és az erdővel borított (b) mérőállomásokon mért adatok között (72. ábra).



72. ábra A fátlan (a) és az erdővel borított (b) területen hullott havi csapadékösszegek (mm) összehasonlítása. Ebben az esetben egy-egy fátlan és erdővel borított állomások adatait tartalmazó térképpár rendelkezik azonos színskálával

Ez az ábra önmagában csak az adott hónapban belüli fátlan és erdős adatok térbeli különbségét mutatja. A csapadékadatok térbeli eloszlásnak térképi megjelenítését egy harmadik típusú megközelítésben is elvégeztem. Ebben az esetben egyetlen csapadékskálát használtam mind az erdővel borított, mind a fátlan mérőhelyek össze hónapra vonatkozó havi csapadékösszegeire (73. ábra).



73. ábra Havi csapadék minimumok és maximumok fátlan (a) és az erdővel borított (b) csapadékadatok (mm) esetében (itt az összes résztérképre egyetlen csapadékskála vonatkozik) Ezen jól látható, hogy a legmagasabb havi csapadékösszeget július hónapban mértem a fátlan mérőpontok adatai alapján

Ekkor a havi csapadékösszegek kerültek megjelenítésre, úgy, hogy a kétszer nyolc térkép esetében, egységesen egy csapadék kategória került megjelenítésre. Ez a térbeli ábrázolás egyértelműen mutatja, hogy hol, melyik területrészen (növényzet által borított, vagy nyílt térrészen) esett a legnagyobb mennyiségű csapadék a teljes mérési időszak során.

A lombkorona fedettség hatásának megállapítására fontos volt az egyes csapadékesemények leválogatása. Ehhez az „Eszközök és módszerek” fejezetében leírtaknak megfelelően válogattam le az összes adatból a csapadékeseményeket. A legkisebb csapadékegység, a csapadékszenzorok felbontásból fakadóan 0,2 mm volt. Legtöbb esetben azonban, érthető módon, egy esemény több 10 perces csapadékösszeget jelentett.

A 11 mérőpont esetében gyűjtött adat, közel 1 650 000 adatsort jelentett, ezek közül összesen 1022 darab csapadékesemény került leválogatásra (11. táblázat). A legtöbb eseményt az 5. mérőponton (146 darab) és a legkevesebbet pedig a legszárazabb, 4. mérőponton (39 darab) regisztrálta a mérőműszer. A csapadékesemények összehasonlító, bővebb elemzésére, illetve a 2 mm feletti események összehasonlítására az egyes mérőpontok (fátlan és erdős) összehasonlítására az Intercepció mértékének számítása című fejezetben térek ki.

11. táblázat A csapadékesemények mennyiségi eloszlása a lehullott csapadékösszegek alapján a mérőpontok között 2011. évben a Pósa-völgyben

Mérőpont	2-nél kisebb	2-3 között	3-4 között	4-5 között	5-10 között	10-nél nagyobb	$\Sigma$ db
1.	37	11	12	5	6	10	<b>81</b>
2.	41	6	4	2	4	6	<b>63</b>
3.	98	10	3	2	8	3	<b>124</b>
4.	23	6	3	1	3	3	<b>39</b>
5.	117	9	5	6	6	3	<b>146</b>
6.	39	5	3	2	6	5	<b>60</b>
7.1	54	5	5	8	14	5	<b>91</b>
7.2	70	11	7	9	17	13	<b>127</b>
8.	30	5	2	4	2	1	<b>44</b>
9.	80	11	10	8	10	8	<b>127</b>
10.	74	8	9	11	13	5	<b>120</b>
<b><math>\Sigma</math> db</b>	<b>663</b>	<b>87</b>	<b>63</b>	<b>58</b>	<b>89</b>	<b>62</b>	<b>1022</b>

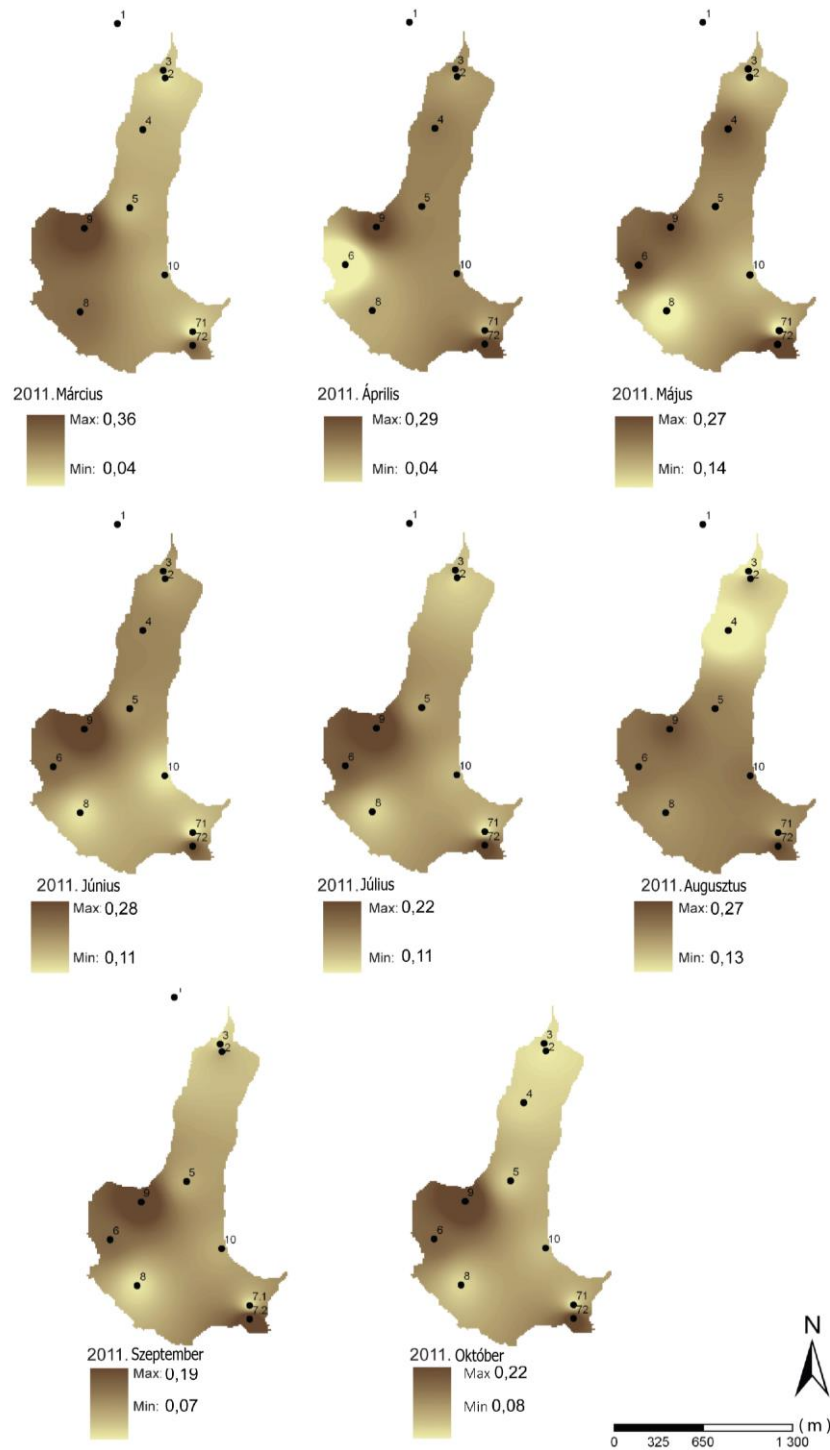
A 12. táblázat adatai alapján jól látható, hogy az erdős területen rögzített, majd leválogatott csapadékesemények összege jelentősen eltér a teljes időszakra mért csapadékösszegetől. Mivel a csapadékesemények definiálásával a 2 mm-es küszöbértéket vettem figyelembe (a 2 mm-nél kisebbekkel nem foglalkoztam) így ez azt is jelenti, hogy a vizsgált évben jellemzőek voltak a kisebb, 2 mm alatti csapadékesemények, mivel azok a leveleken tározódtak, nem hullottak át és nem is kerültek detektálásra a csapadékmérő edényben.

12. táblázat A leválogatott csapadékesemények (minimálisan 2 mm) összefoglaló táblázata a mérőpontok szerint

Mérőpontok	$\Sigma$ Csapadék (mm)	$\Sigma$ Csapadék Lev. (mm)	$\Delta$ Csap ( $Cs_{summa} - Cs_{Lev}$ ) (mm)	$\Sigma$ esemény (db)
1.	425,40	299,60	125,80	81
2.	194,00	154,60	39,40	63
3.	276,20	198,00	78,20	124
4.	183,50	107,60	75,90	39
5.	315,60	237,00	78,60	146
6.	264,20	190,20	74,00	60
7.1	387,20	287,20	100,00	91
7.2	525,20	465,60	59,60	127
8.	139,60	82,80	56,80	44
9.	458,20	340,40	117,80	127
10.	453,00	338,00	115,00	120

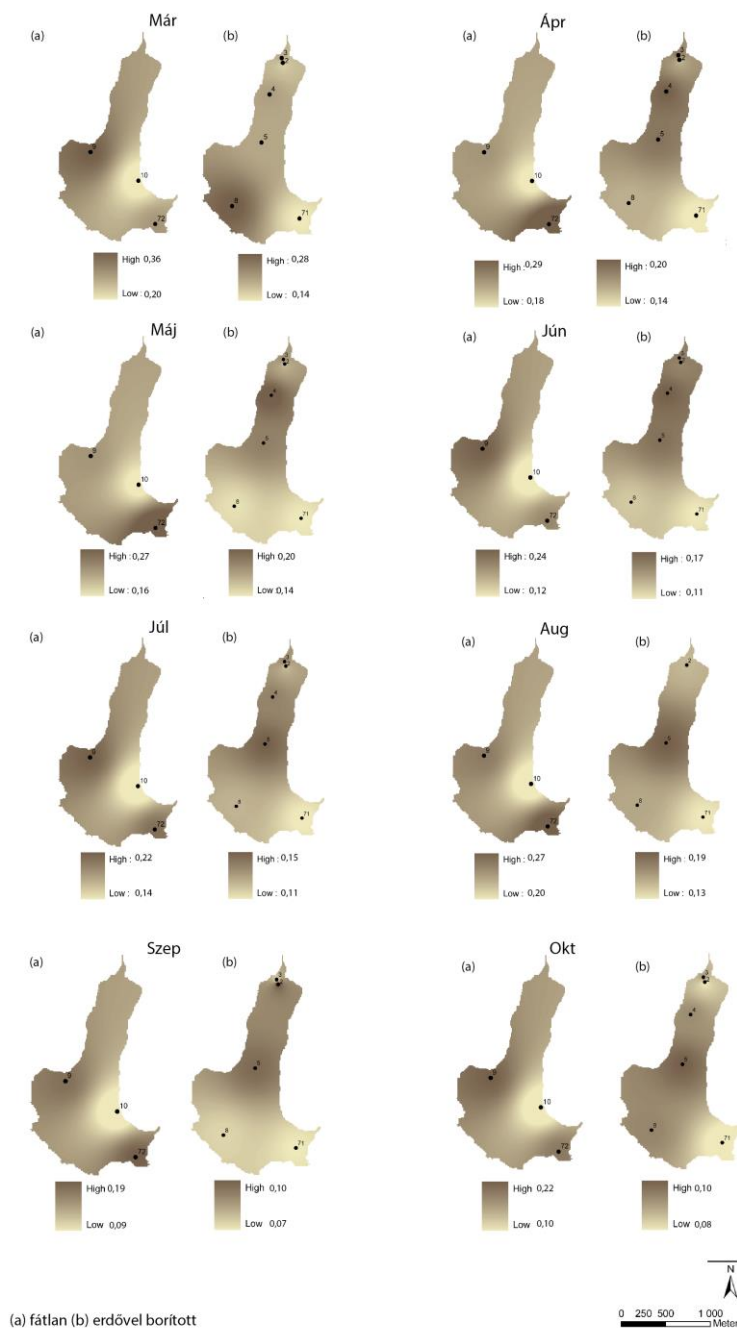
#### 4.1.2. A Pósa-völgyben rögzített talajnedvességi adatok értékelés

A talajnedvesség adatok vízgyűjtőn belüli térbeli eloszlásának vizsgálatához, elvégeztem a mért adatok távolsággal fordítottan arányos interpolációját (74. ábra). Az adatok térbeli ábrázolását ugyanazzal a három módszerrel végeztem el, mint a csapadékadatok térképi megjelenítésekor (részletesen feltüntetve az előző fejezetben).



74. ábra Havi átlagos talajnedvességi adatok a Pósa-völgyben 2011. márciustól-októberig

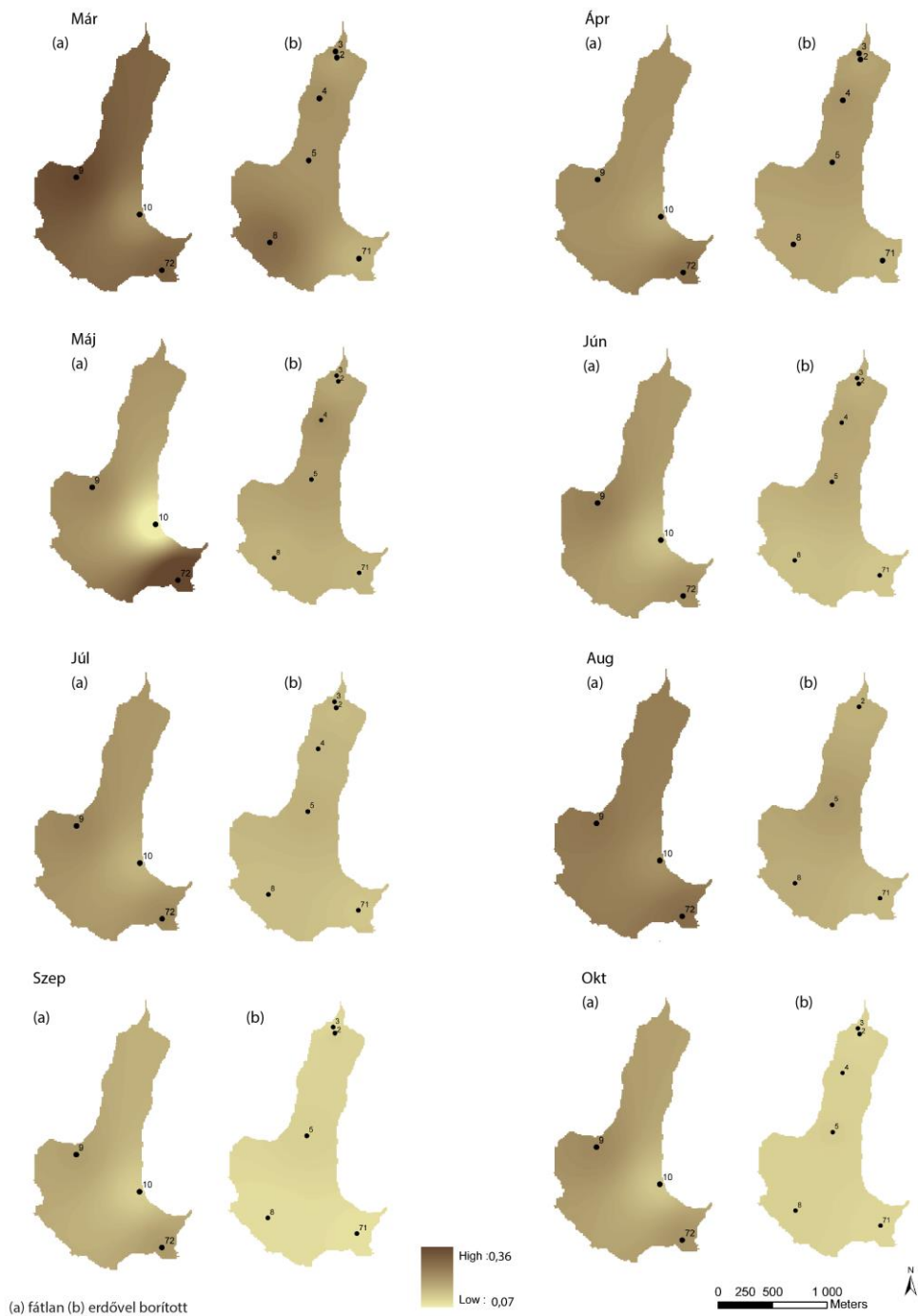
A talajnedvesség időbeli eloszlása vizsgált évben kvázi mediterrán jellegű volt (USDA klasszifikációban *xeric*), azaz július hónapban volt legalacsonyabb a talajban tárolt (20 cm mélységben) nedvesség mennyisége, ezt követően augusztus hónapban már elkezdett növekedni a jelentősebb augusztusi csapadékoknak köszönhetően. A maximális területi átlagokat márciusban, a legalacsonyabbat szeptemberben regisztráltam. Megállapítható, hogy amennyiben külön interpoláltam az erővel borított és fátlan mérőállomások adatait, úgy március hónapban volt a legnedvesebb a talaj 20 cm mélységben a fátlan területeken (75. ábra).



75. ábra A fátlan (a) és az erdővel borított (b) mérőpontok adatai alapján interpolált havi átlagos talajnedvesség értékek a Pósa-völgyben 2011-ben

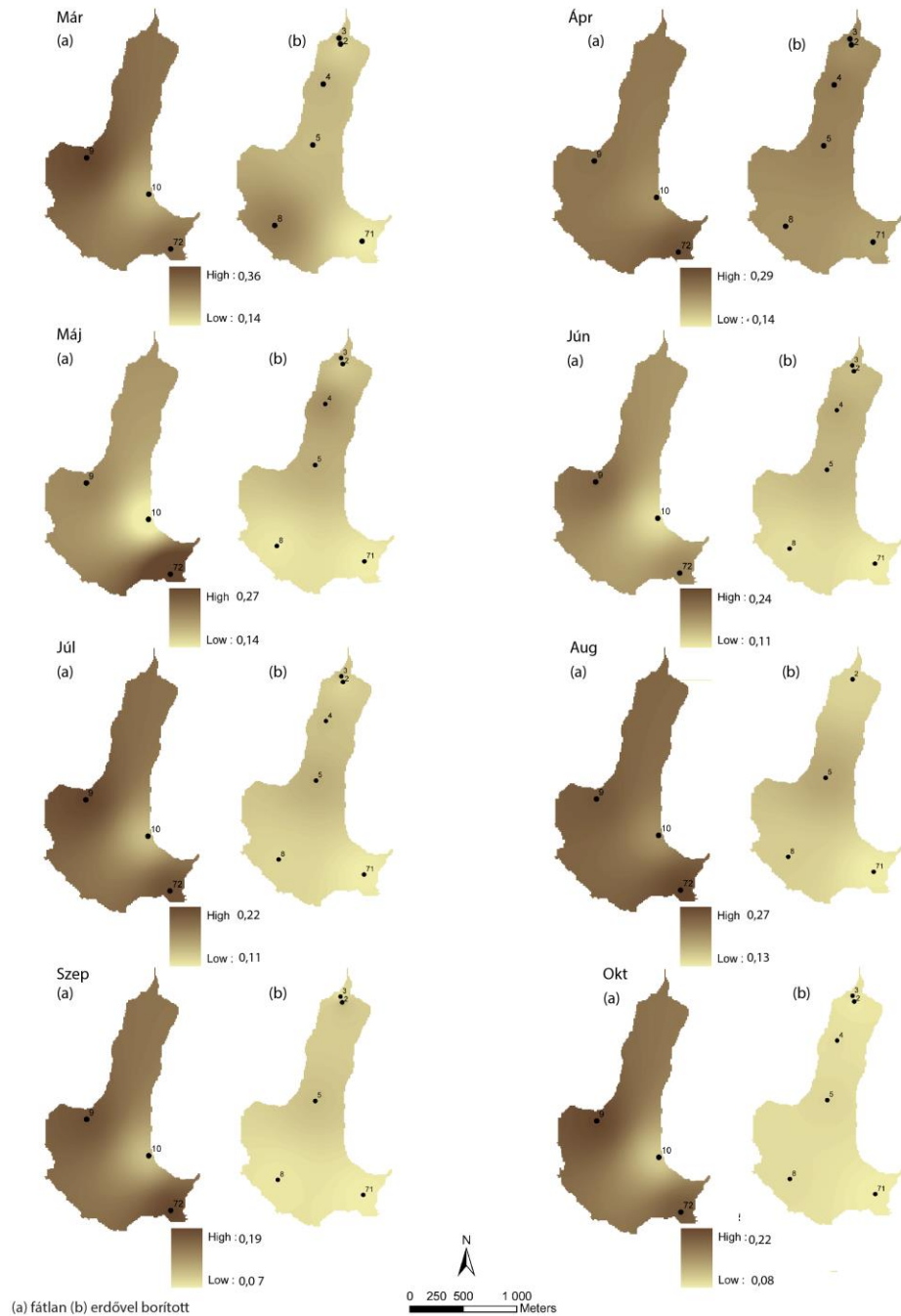


Amennyiben külön-külön interpoláltam az erdővel borított és fátlan mérőállomások havi átlagos talajnedvesség adatait, akkor minden esetben a fátlan területeken volt nagyobb az átlagos talajnedvesség érték (76. ábra). Ez némileg meglepő eredmény, mivel a párolgás jelentősebb a fátlan területeken, azonban az erdős területek jelentősebb transpirációja is jelentősen csökkentheti a talaj nedvességtartalmát.



76. ábra Fátlan (a) és az erdővel borított (b) területen rögzített térfogati alapú talajnedvesség tartalom értékek eloszlása 2011. március és október között

Az átlagértékekhez hasonlóan, a talajnedvesség szélsőértékek (minimumok és maximumok) is magasabbak voltak a fátlan területeken, mint az erdővel borított területeken. A pontszerű adatok interpolációja alapján megállapítható, hogy mind a fátlan (a), mind az erdős (b) a talajnedvesség adatok jelentős térbeli szórást, térbeli heterogenitást mutatnak minden vizsgált hónap során (79. ábra).

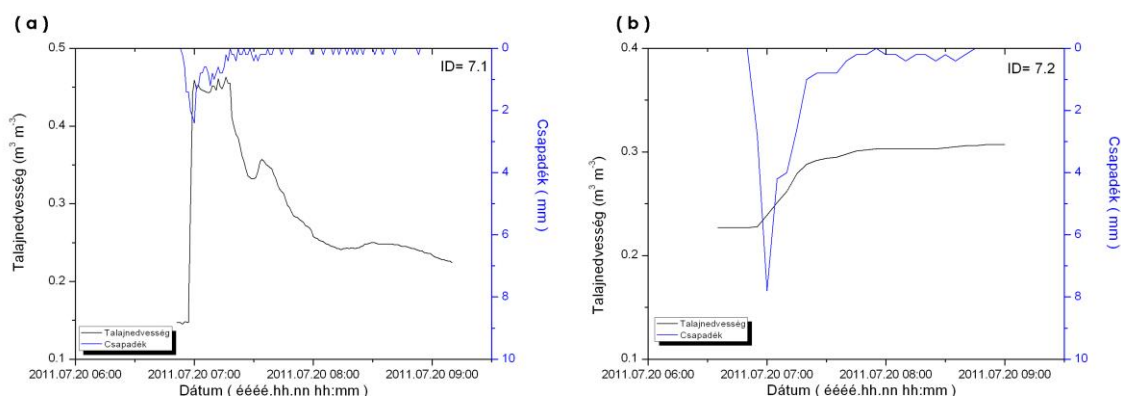


77. ábra Fátlan (a) és az erdővel borított (b) területen rögzített térfogati alapú talajnedvesség tartalom értékek eloszlása 2011. március és október között

Az inhomogenitás a tagolt domborzatnak és a felszínhasználat mozaikosságának tudható be; ez a megállapítás, azaz a talajnedvesség nagy térbeli különbségei, jó összhangban vannak a korábbi ilyen jellegű vizsgálatok eredményeivel (SVETLITCHNYI et al. 2003, COSH et al. 2004, 2006, HEATHMAN et al. 2012, BROCCA et al. 2007, 2013).

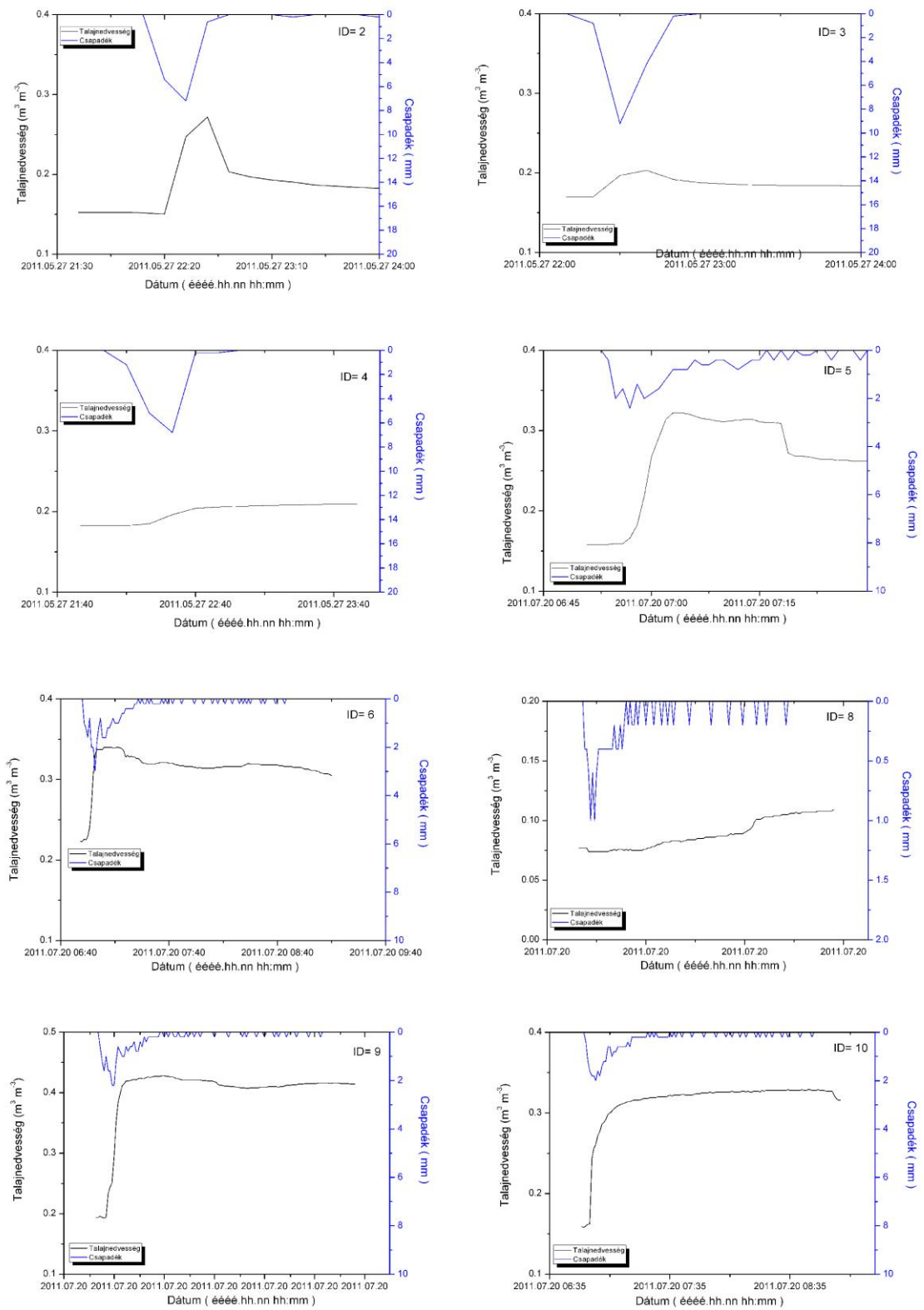
### 4.1.3. Csapadék hatása a talajnedvességre

A csapadékesemények vizsgálatokor azokat válogattam le, ahol egyidejűleg kerültek rögzítésre talajnedvesség és csapadék adatok is. Azért telepítettem ki két mérőpontot egymáshoz nagyon közel (10 méter), hogy egyéb környezeti változó tekintetében közel megegyező biotóp legyen, illetve, csak a mérőállomás felett elhelyezkedő növényzet hatását vizsgáljam. A csapadékesemény hatására a talajnedvességben bekövetkező változásokat, illetve a változások időbeli lefutását (78. ábra). A 7.1 (erdővel borított) területen, csapadékesemény elején a csapadék teljes mennyisége fennmaradt a lombozaton, majd azt telítve elkezdett beszivárogni a talajba, ahol hirtelen emelkedni kezdett a talajnedvesség értéke. Ezzel szemben a (b) ábrán ez az átnedvesedési (beszivárgási) folyamat sokkal egyenletesebben zajlott (78. ábra).



78. ábra Erdővel borított (7.1) és fátlan (7.2) mérőpontokon rögzített 1 perces csapadékkintenzitás és a talajnedvesség adatok kapcsolata, a Pósa-völgyben, 2011. június. 20-i csapadékesemény alkalmával

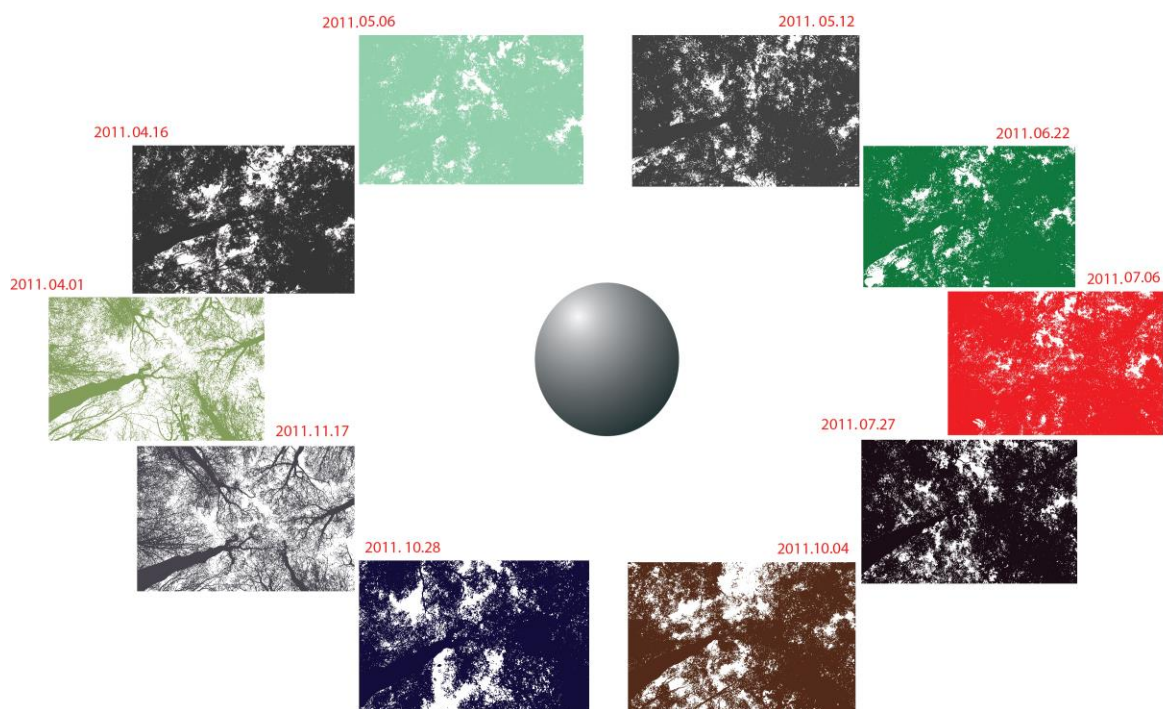
Hasonlóképpen elvégeztem ezt a leválogatást a csapadék és talajnedvességi értékekre mindegyik mérőállomás esetében (79. ábra).



79. ábra Mérőpontokon rögzített 1 perces csapadékmennyiség és a talajnedvesség adatok kapcsolata, a Pósa-völgyben, (jobb felső sarokban látható a mérőpont azonosítója)

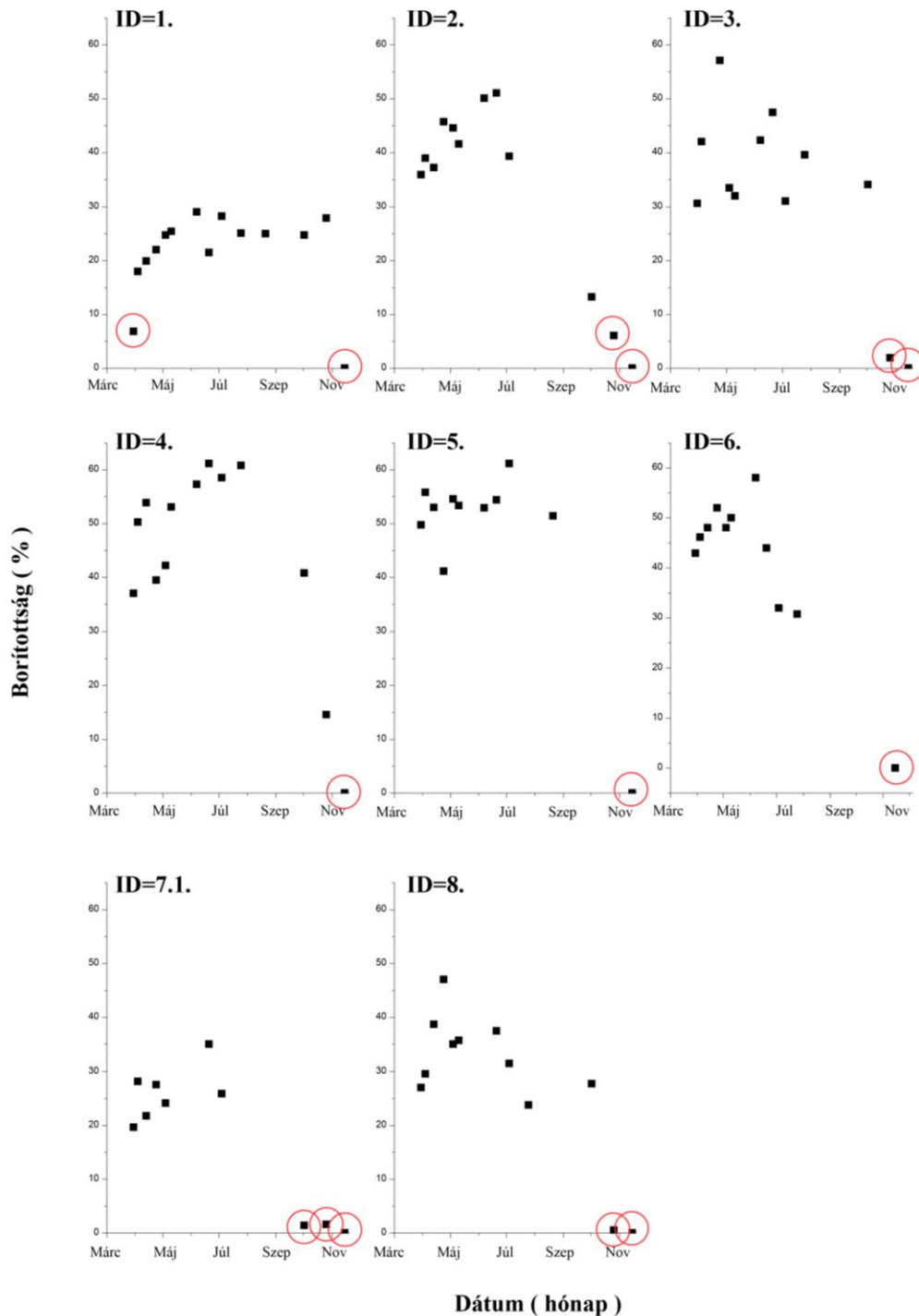
## 4.2. A felszínborítás időbeli lefutásának vizsgálata a Pósa-völgy vízgyűjtőjében

Az Eszközök és módszerek fejezetben leírtaknak megfelelően, a közel harminc terepen töltött napom alkalmával rögzítésre került a csapadékmérő felett elhelyezkedő aktuális lombkorona borítás. A vártnak megfelelően a kezdeti állapotból viszonylagosan gyorsan lombosodásnak indult a fás társulás. A területen átlagosan 27,01%-os kezdeti értékről indulva, a maximális értéket (57,00 %) már április 26-án elérte a lombkorona (80. ábra).



80. ábra A borítottság éves menete a 8. mérőpontra telepített csapadékmérő felett

Minden egyes fás területen elhelyezett mérőpont esetében elvégeztem és megjelenítettem a csapadékmérő edény feletti lombkorona borítást, amelyet grafikusan és összefoglalóan, táblázatos formában is megjelentettem (81. ábra és a 13 táblázat).



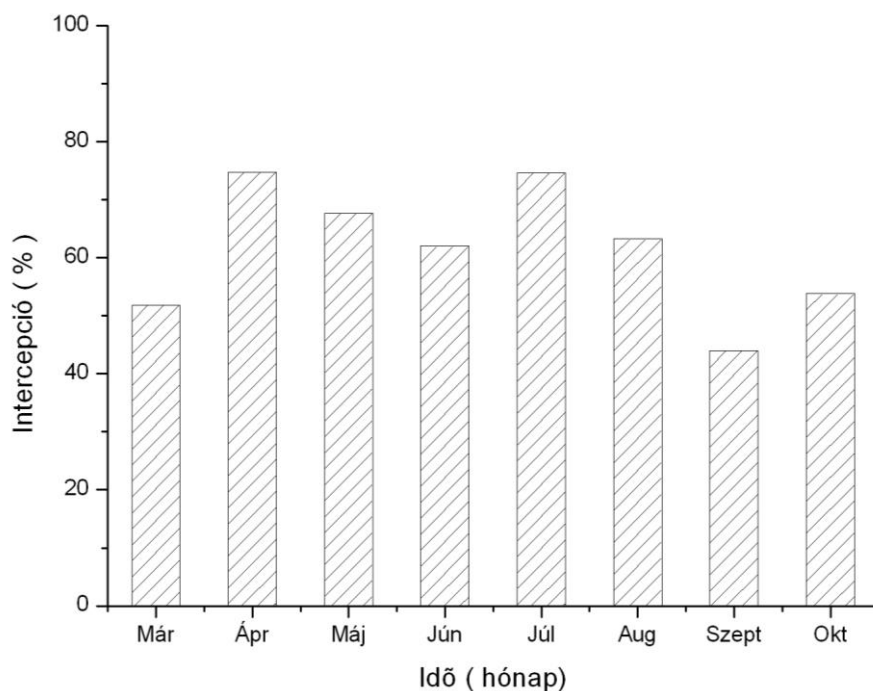
81. ábra A borítottság éves különbségei mérőpontonként. A végső újraosztályozási eredményekből néhány irreálisan alacsony értéket (piros karikával jelölve) nem vettem figyelembe a mérőpontok összefoglalásánál (12. táblázat).

13. táblázat Borítottság adatok összefoglalása a 2011. évre a Pósa-völgyben

Mérőpont	Min ( % )	Dátum <sub>Min</sub> (hh.nn.)	Max ( % )	Dátum <sub>Max</sub> (hh.nn.)
1.	17,92	ápr.06.	28,98	jún.09.
2.	13,20	okt.04.	51,05	jún.22.
3.	30,61	ápr.01.	57,10	ápr.26.
4.	37,07	ápr.01.	57,25	jún.09.
5.	41,15	ápr.01.	61,15	júl.06.
6.	30,79	júl.27.	58,00	jún.09.
7.1	19,65	ápr.01.	35,00	jún.22.
8.	23,75	júl.27.	47,00	ápr.26.

### 4.3. A lombkorona intercepció nagyságának számítása

A lombkoronára intercepció százalékban kifejezett nagyságát határoztam meg a Pósa-völgyben található bükkös-gyertyános-csertölgyes társulásban (82. ábra), a 2011. évben mért adatok alapján. A talajra leérkező csapadék becsléséhez vizsgáltam, hogy az intercepció milyen mértékben függött a csapadékesemény kumulatív csapadékösszegétől is. Megállapítható, hogy az intercepció maximális értékét április és július hónapokban érte el, azaz ekkor volt a legnagyobb a növényzeten visszatartott csapadékmennyiség. Adataim alapján az április hónapra számított érték nagyobb, mint a májusi és júniusi. Ez azzal magyarázható, hogy május és július hónapokban, nagyobb intenzitású, kis mennyiségű csapadékesemények voltak, amelyek egyszerűen áthullottak a lombkoronán, valamint további ok lehetett a csapadék térbeli heterogenitása is a vízgyűjtőn belül. Főként ősszel, szeptemberben rögzített adatoknak azonban jelentősen kisebb a szórása. A fátlan és az erdővel borított összes csapadék átlagok alapján elmondható, hogy 214 mm csapadék tározódott éves szinten a leveleken. Ez az érték meghaladja FÜHRER (1992) által mért értéket.



82. ábra Az intercepció százalékban kifejezett értékének éves lefutása, a vizsgált időintervallumban, 2011. március és október hónapok között, a Pósa-völgyben

A modellek pontosabb parametrizációjának érdekében vizsgáltam az intercepció időbeli változását is. Ennek érdekében válogattam le a 2 mm-t meghaladó csapadékösszegeket, eseményenként. Összefoglalóan a 14. táblázat tartalmazza, ezek mennyiségi eloszlását.

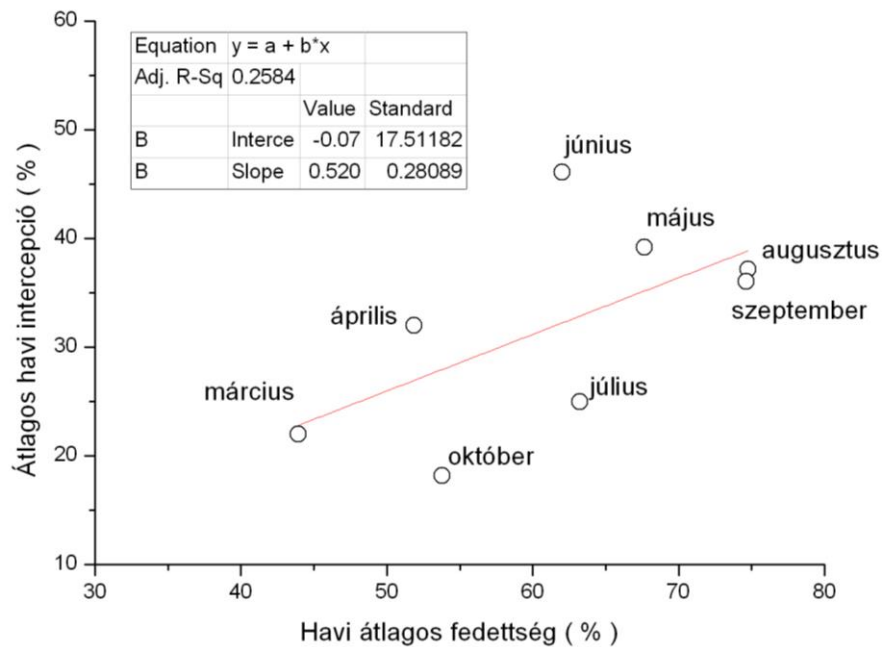
14. táblázat 2 mm-t meghaladó havi csapadékösszegek (mérőpontok átlaga) megoszlása a fátlan és erdővel borított mérőpontok között a Pósa-völgyben, 2011-ig évben gyűjtött adatok alapján

	Fátlan		Erdő	
	Σ Csap. (mm)	Szórás	Σ Csap. (mm)	Szórás
Március	18,50	7,99	5,50	1,81
Április	21,80	1,51	13,00	4,41
Május	38,90	0,22	23,50	9,32
Június	56,30	20,85	25,90	9,37
Július	107,30	33,27	51,60	33,98
Augusztus	27,00	11,64	17,60	2,98
Szeptember	17,50	3,87	4,40	1,02
Október	35,20	13,40	17,40	7,57

Vizsgálataim során választ kerestem arra is, hogy a lombkorona változása milyen hatással van a havi intercepció területi átlagára. Így a foto-vizualizációs elemzések fedettség értékeit összehasonlítottam a havi átlagos intercepció értékekkel (83. ábra). A két változó között nem tapasztaltam összefüggést ( $r^2 = 0,2584$ ). Ez alapvetően a három előbb említett

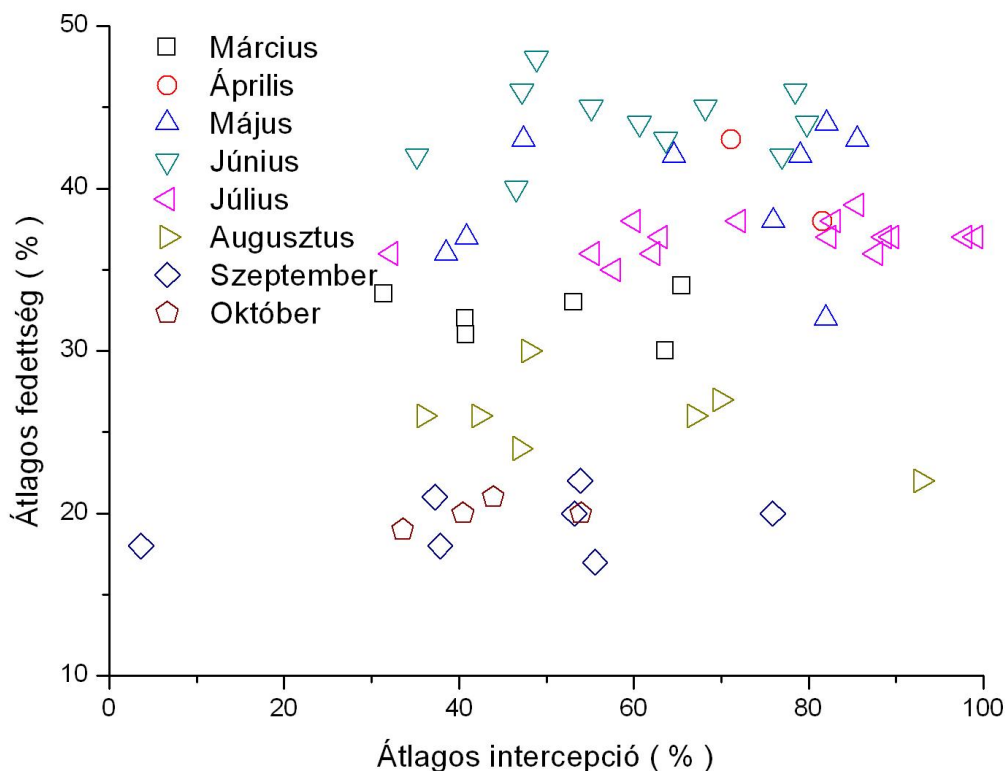


tényező hatásának tulajdonítható. A leválogatott adatokat (14. táblázat) tartalmazó grafikon alapján megállapítható, a 2 mm-t meghaladó csapadékesemények és a fedettség közötti összefüggés. Azért választottam a 2 mm-es küszöbértéket, mivel korábbi kutatásaim alapján (BALATONYI et al. 2012b), ez az a mennyiség, amelyik biztosan fennmarad a lombkoronán.



83. ábra A havi átlagos fedettség és az átlagos havi intercepció (havi és területi átlag) közötti összefüggés 2011 március és október között a Pósa-völgyben

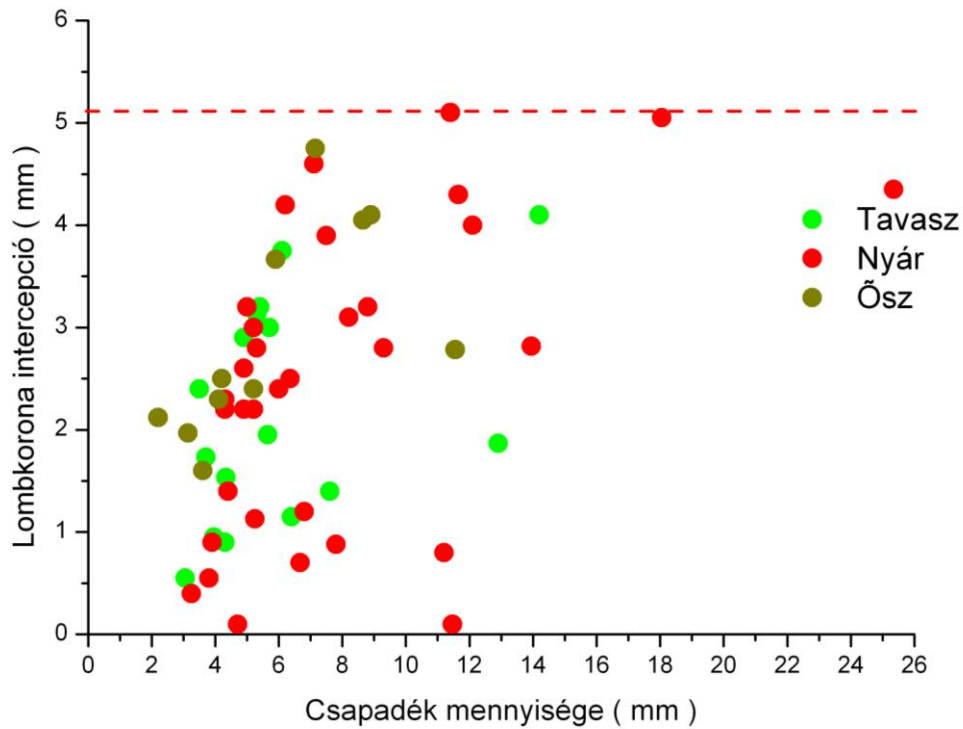
Az eddigi irodalmi adatok általában csak statikusan határozták meg az intercepció mértékét, s nem vették figyelembe annak időbeli, szezonális változását. A másik probléma itt a fedettségi értékek hiánya a csapadékesemények időpontjára, mivel nem mindig esett egybe a csapadékesemény és a fényképfelvétel készítés időpontja. Így a fényképfelvételek közötti fedettséget a határoló értékek időpontja alapján interpoláltam. Így a grafikon már árnyaltabb képet mutatott és elkülöníthetőek voltak az egyes hónapoknak (lombkorona fedettségnek) megfelelő csoportok. Azaz így már a valósághoz közelebb álló eredményeket kaphatunk a csapadék-lefolyás modellek alkalmazásával. Jól látható, hogy az adott hónapban, illetve évszakosan a különféle mérőpontok eredményei egy csoportban helyezkednek el. Június hónapban találhatóak a maximális értékek, a minimális értékeket a szeptember és október hónap adatai mutatják (84. ábra).



84. ábra A havi átlagos fedettség és az átlagos havi intercepció (havi és területi átlag) közötti összefüggés 2011 március és október között mérőpontokét (11 db) és a 2 mm-t meghaladó csapadékeseményeként a Pósa-völgyben

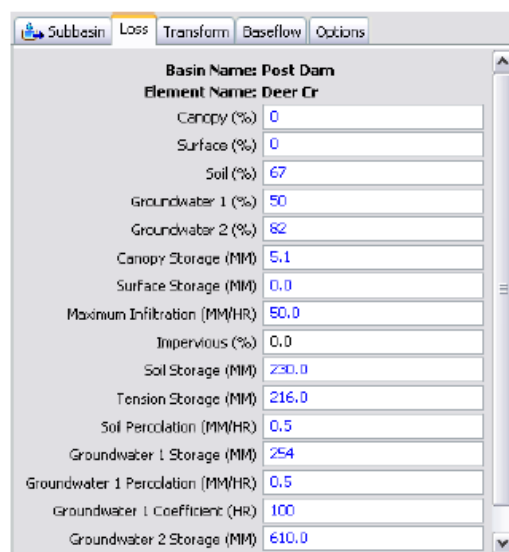
Szintén megvizsgáltam a lombkoronán fennmaradt csapadékmennyiségeket évszakos (tavaszi, nyári és téli) bontásban. Ennek az volt az értelme, hogy a százalékos arány (általában ezt adták meg az irodalmakban) kifejezőbb, ha hosszabb időtartamok alatt vizsgáljuk a lombzaton fennmaradt csapadékmennyiséget, például éves időtartam vagy tenyészidőszak alatt. A mm-ben megadott mennyiség, egy-egy csapadékesemény jellemzésénél használatos, ami villámárvízi modellezéseknél, amikor egy eseményt vizsgálunk, lehet praktikus. Ilyenkor megállapítható az, hogy hány mm az a csapadékmennyiség, amelyik nem jut el a talajszintre.

A magas intercepció víz mennyiség oka lehet az is, hogy nagyon sűrű lombzat van a területen, illetve a csapadékesemények csapadékösszege, valamint az intenzitás is alacsony volt. Az évszakos különbségeket bemutató ábra alapján szintén megállapítható, hogy főként a tavaszi, de a nyári adatok is nagy mértékben szórnak, még az 1,7 km<sup>2</sup> nagyságú területen belül is. A lombkorona méréseink alapján maximálisan mintegy 5 mm csapadékot képes tárolni a vizsgált területen a saját méréseim alapján (85. ábra). Ilyen mértékű összefüggés alapján már viszonylag jól becsülhető a fedettségi százalék és a lombkoronaszint tetejére hulló csapadékmennyiség ismeretében a talajra hulló csapadékmennyiség, valamint a lombkoronában visszatartott vízmennyiség.



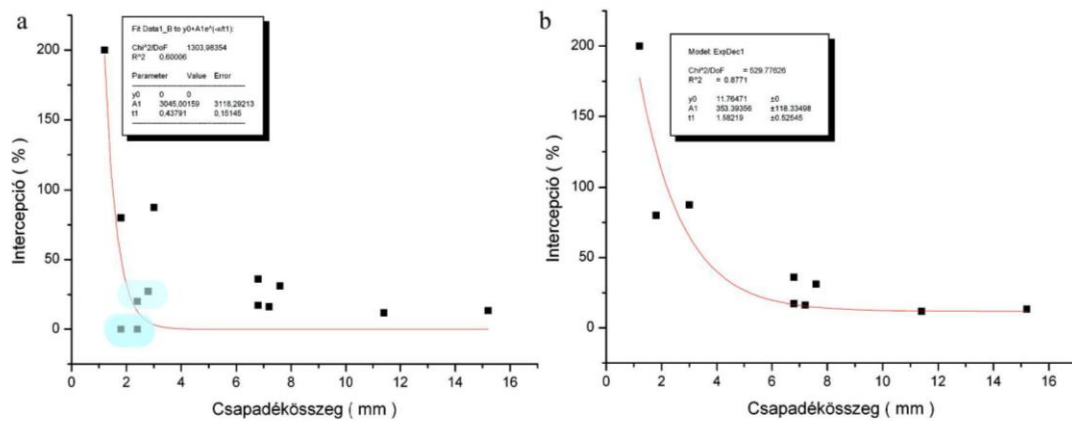
85. ábra Intercepció maximális szélső felső peremfeltételének a meghatározása

Amikor a lombkorona által visszatartott csapadékmennyiséget vizsgáltam csapadék eseményenként, akkor azt találtam a vizsgált állományban a Pósa-völgy területén, hogy a maximálisan visszatartott csapadék mennyisége csapadékeseményeként 5 mm. Más szóval, ez az alkalmazható érték pl. a HEC-HMS csapadék-lefolyás modellben (86. ábra), a Pósa-völgy területén található társulás, illetve az ahhoz hasonló Közép-Európai bükkös-gyertyános társulások esetében is.



86. ábra A „Canopy (%)” veszteségi paraméterek (*loss method*) szerkesztő ablaka a HEC-HMS hidrológiai modellben

Az intercepció arányát a csapadékesemény összege is befolyásolta, amint azt már több más szerző is leírta általános megfigyelésük alapján (pl. FÜHRER 1992, ROWE 1983), valamint az én megfigyeléseim is azt igazolták, hogy kisebb mennyiségű csapadék sokkal nagyobb százalékban marad fent lombkoronán. Ennek vizsgálatához az egymáshoz közel található, mintegy 50 méter légvonalbeli távolságban elhelyezkedő 7.1-es (erdővel borított) és 7.2-es (fátlan) mérőállomás adatait hasonlítottam össze (87. ábra). Amikor 13 esemény alapján ábrázoltam az intercepció hányadot a csapadékösszeg függvényében, akkor a két adatsor közötti összefüggés korrelációs együtthatója ( $r^2$ ) 0,6006-nak adódott. Amikor azonban négy lombfakadás előtti adatot kivettem az elemzett adatsorból, akkor kilenc adat alapján a korrelációs együttható értéke  $r^2 = 0,8771$ -re nőtt (87. ábra/b). Az összefüggést nagymértékben befolyásolta az a tény is, hogy 4 csapadékesemény a lombzat kifejlődése előtt következett be.



87. ábra Az intercepció arányának változása a csapadékeseményenkénti kumulatív csapadékösszeg függvényében a Pósa-völgyben 2011. március 15. és 2011. május 15. között

Ennek az összefüggésnek a gyakorlati haszna abban rejlik, hogy ilyen módon a csapadékösszegeből közvetlenül becsülhető a területre (illetve a Pósa-völgyhöz hasonló társulással borított vízgyűjtők) az intercepció az alábbi összefüggés alapján (12. egyenlet):

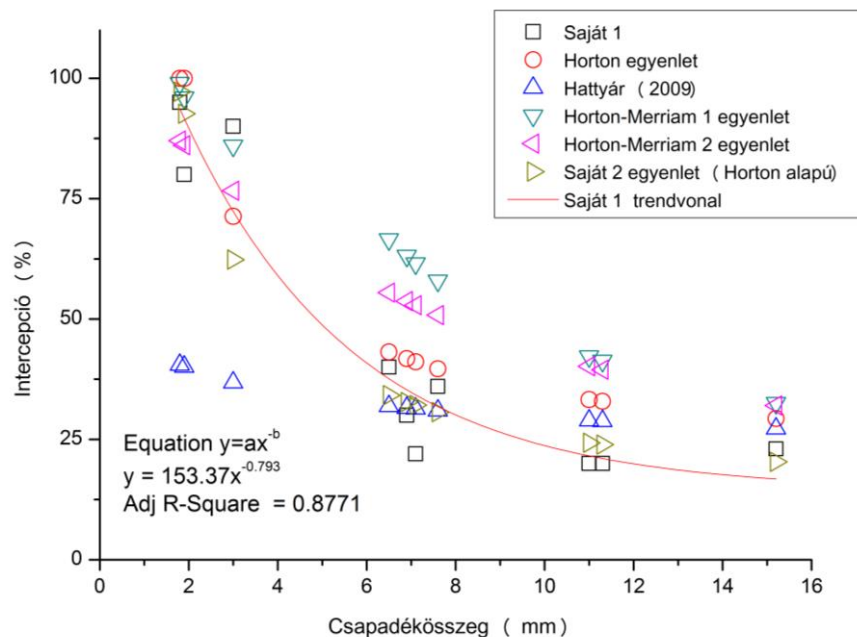
$$I = 153.37 * P^{-0.793} \quad [ 12 ]$$

ahol:

$I$  = az intercepció %-ban kifejezve

$P$  = pedig a csapadékösszeg csapadékeseményenként mm-ben.

A mért adatpontjaink jó összhangban vannak a HORTON (1940) egyenlete alapján és FÜHRER (1992) bükkösben végzett mérései alapján gyártott egyenletek alapján számolt értékekkel (88. ábra). Jelentősebb eltérés csak FÜHRER (1992) egyenlete alapján számolt kis csapadékösszegek esetében tapasztaltunk (adatpontok a grafikon bal alsó részén). Az *online* parametrizáció érdekében, a csapadékösszeg-intercepció (%-ban kifejezve) vízgyűjtő specifikus. Tehát a pontos parametrizáció érdekében megállapítása minden vízgyűjtő esetében szükséges. Megjegyzendő azonban, hogy az egyenletem formailag eltér a hagyományos, bevezetőben tárgyalt egyenletek (pl. Horton) általános formájától, mivel ebben az esetben hatvány összefüggésről van szó.



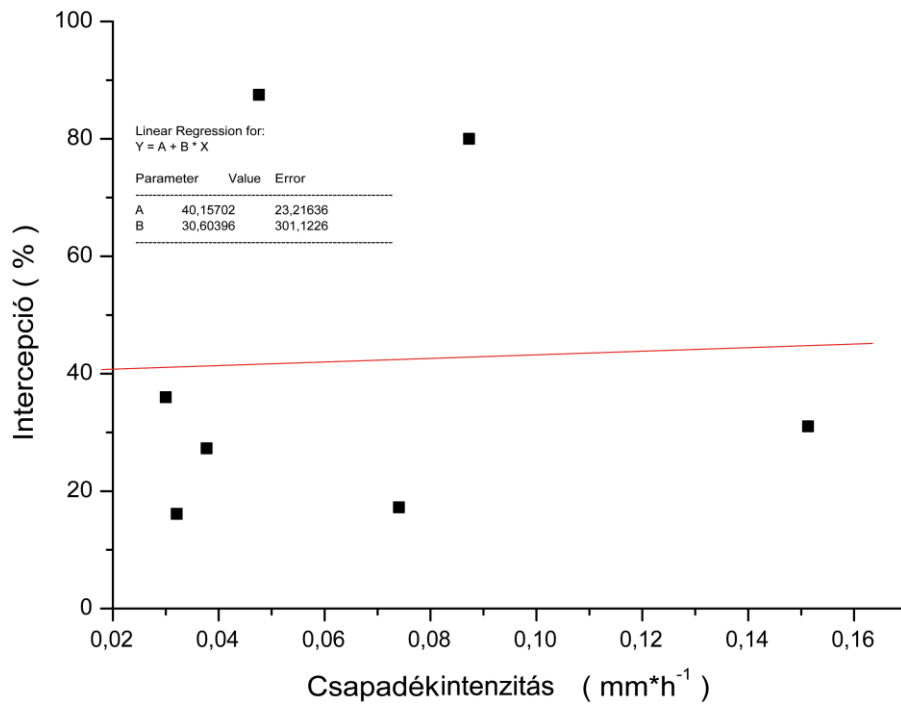
88. ábra A mért csapadékösszegek és a számolt intercepciós értékek közötti összefüggések összehasonlítása korábbi kutatások eredményeivel

A Horton mintájára számolt egyenlet alapján, az egyenletünk az alábbi formára módosul (13. egyenlet):

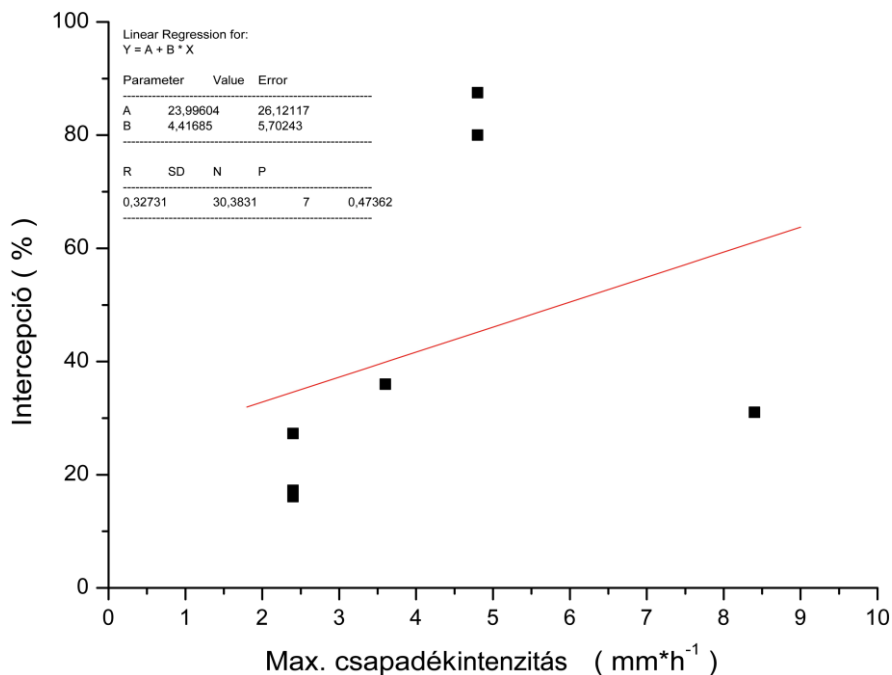
$$I = 0,90 * P^{-1,57} \quad [ 13 ]$$

A mért adatok alapján vizsgáltam az intercepció arányát az (a) átlagos csapadékintenzitás és a (b) maximális intenzitás függvényében is. A csapadék intenzitása ( $\text{mm h}^{-1}$ ) azonban a mérési eredményeink alapján nem mutat korrelációt az intercepcióval ( $r^2 = 0.0454$ ). Ebben az esetben az összefüggés hiánya azzal is magyarázható, hogy a csapadékesemény lehatárolása bár automatizált, ám de mégis önkényes volt. Egy adott csapadékesemény során a maximális csapadékintenzitás meghatározása többé-kevésbé

egyértelmű. Ezt mutatja az is, hogy az intercepció függése jobban korrelált a maximális csapadékintenzitással ( $r^2 = 0.32$ ), ami azért még mindig nem mutat erős összefüggést, mint amikor ugyanezt a változót az átlagos csapadékintenzitás függvényében ábrázoltam. Megjegyezném azonban, hogy mindkét esetben gyenge korrelációt kaptunk a vizsgált változó esetében. Következésképpen az átlagos és a maximális csapadékintenzitás sem használható megfelelő pontossággal az intercepció nagyságának becslésére (89. ábra és a 90. ábra).



89. ábra Az intercepció aránya az átlagos csapadékintenzitás függvényében a Pósa-völgyben 2011. március 15. és 2011. május 15. között



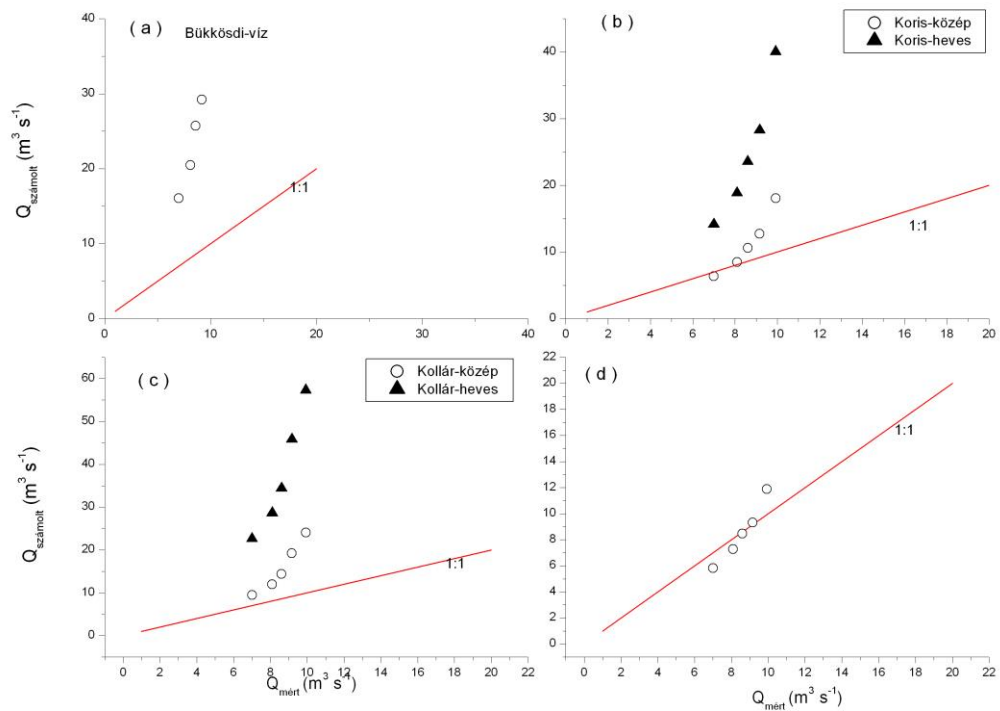
90. ábra Az intercepció aránya a csapadékeseményenkénti maximális csapadékkéntesség függvényében a Pósa-völgyben 2011. március 15. és 2011. május 15. között

#### 4.4. Árvízhozamok előjelezhetősége, egyszerű és komplex numerikus modellek eredményei

Az eszközök és módszerek fejezetnek megfelelően az elért eredményeket részletesen az következő alfejezetekben mutatom be.

##### 4.4.1. Egyszerű árvízhozam számítási modellek

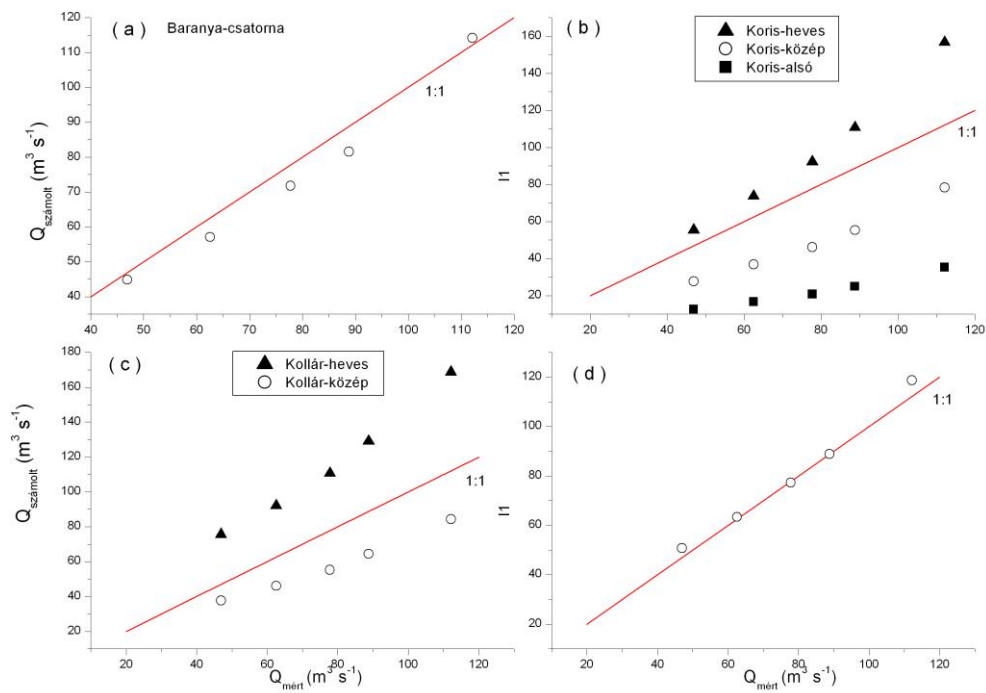
A négy általam alkalmazott módszer eredményét egy ábrán jelenítettem meg, a könnyebb összehasonlíthatóság miatt (91. ábra). Minden egyes grafikon esetében feltüntettem az 1:1 vonalat, mely szemlélteti, hogy a módszer „alá”, vagy „fölé” mér (BALATONYI et al. 2013b). A Bükkösdi-vízfolyás esetében, a mintaterülethez legközelebb eső vízmérce, a Hetvehely település déli végében található, ez sem rendelkezett kellő hosszúságú adatsorral. A Bükkösdi-vízfolyás esetében csak a Szentlőrinc településnél elhelyezett mért vízhozam adatok dolgoztam fel a négy módszerhez (91. ábra). A grafikon alapján jól látható, hogy a négy módszer közül leginkább a Racionális módszer állt legközelebb a mért adatokhoz. A Bükkösdi-víz ezen szelvényétől a vízfolyás már inkább síkvidék jellegű, ami jól kiolvasható az adatok eredményeiből is, azokban az esetekben ahol a módszer megkülönböztet sík, illetve dombvidéki paramétereket, ott jobban illeszkednek a középértékekhez (Koris, Kollár).



91. ábra Mért és számolt vízhozamok közötti összefüggés az 5,10, 20, 33 és 100-éves visszatérési idejű tetőző vízhozamok esetében a Bükkösd-vízfolyásra (Szentlőrinc). A Csermák (a), Koris (b), Kollár (c) és a Racionális (d) empirikus számolási módszerek felhasználásával

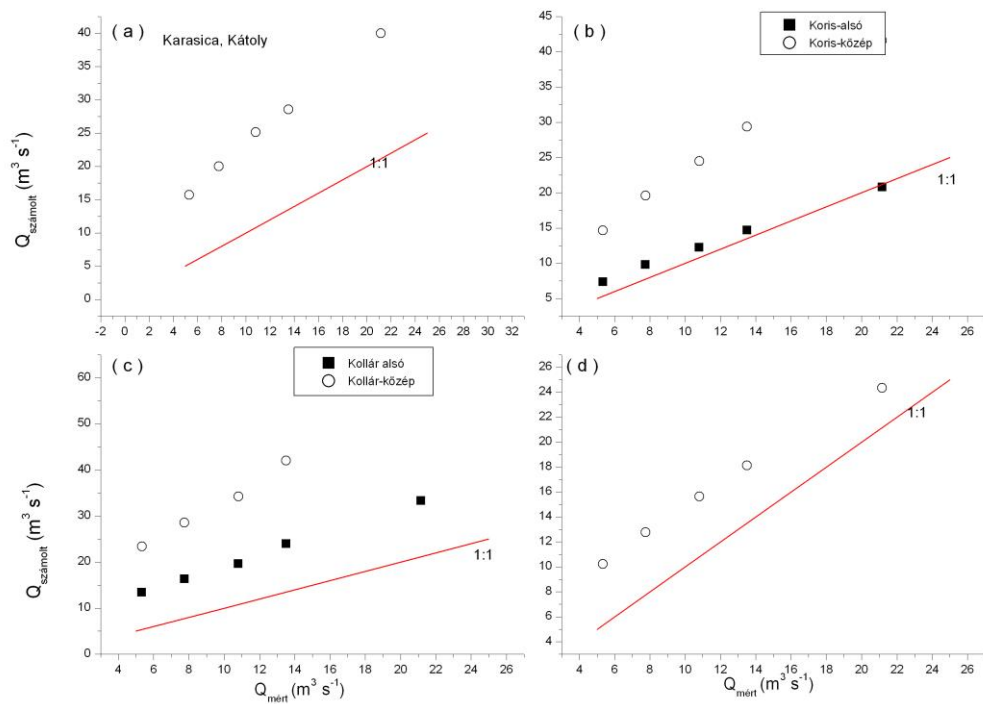
Az egyszerű numerikus modellek alkalmazását az eszközök és módszerekben ismertetett további két veszélyeztetett vízfolyásra is elvégeztem.





92. ábra Mért és számolt vízhozamok közötti összefüggés az 5,10, 20, 33 és 100-éves visszatérési idejű tetőző vízhozamok esetében a Baranya-csatornára (Csikóstöttős). A Csermák (a), Koris (b), Kollár (c) és a Racionális (d) empirikus számolási módszerek felhasználásával

Ugyanezen számításokat elvégeztem a Karasica-patak (93. ábra) esetében is. Szintén jobban illeszkedik az 1:1 vonal, az alsó pontokra (Koris, Kollár). A Karasica esetében a Koris-közép módszer eredményei álltak legközelebb a mért adatok értékeihez.



93. ábra Mért és számolt vízhozamok közötti összefüggés az 5,10, 20, 33 és 100-éves visszatérési idejű tetőző vízhozamok esetében a Karasica-patak (Kátoly). A Csermák (a), Koris (b), Kollár (c) és a Racionális (d) empirikus számolási módszerek felhasználásával

A statisztikai elven alapuló módszerek számszerű összefoglalását a vizsgált három vízfolyásra, az 5, 10, 20, 33 és 100 éves visszatérési valószínűségi vízhozamokra, a 15. táblázat tartalmazza.

15. táblázat A statisztikus árvízhozam számítási módszerek számszerű megjelenítése

Vízfolyás neve	$Q_{mért}$ ( $m^3 s^{-1}$ )	$Q_{számolt}$ ( $m^3 s^{-1}$ )						
		Csermák	Koris - közép	Koris - heves	Kollár-közép	Kollár-heves	Racionális	
Bükkösi - víz	7,00	16,08	6,38	14,14	9,49	22,63	5,83	
	8,09	20,46	8,50	18,85	12,01	28,64	7,27	
	8,60	25,72	10,63	23,56	14,41	34,37	8,47	
	9,17	29,23	12,75	28,27	19,22	45,83	9,31	
	9,92	40,92	18,06	40,06	24,02	57,29	11,89	
Baranya-csatorna	46,90	44,87	Koris -alsó	Koris - közép	Koris-heves	Kollár-közép	Kollár-heves	Racionális
	62,51	57,11	12,44	27,66	55,32	37,80	75,60	50,79
	77,75	71,80	16,60	36,88	73,76	46,10	92,20	63,37
	88,79	81,59	20,75	46,10	92,20	55,32	110,64	77,22
	112,11	114,23	24,89	55,32	110,64	64,54	129,08	88,89
			35,27	78,37	156,74	84,36	168,73	118,75
Karasica-patak	5,33	15,71	Koris -alsó	Koris - közép	Kollár-alsó	Kollár-közép	Racionális	
	7,75	20,00	7,34	14,68	13,38	23,41	10,23	
	10,8	25,14	9,79	19,58	16,32	28,56	12,77	
	13,51	28,57	12,24	24,48	19,58	34,27	15,65	
	21,16	39,99	14,69	29,38	23,99	41,98	18,12	
			20,81	41,62	33,29	58,26	24,35	

#### 4.4.2. Az AGWA talajt jellemző értékeinek a parametrizálás

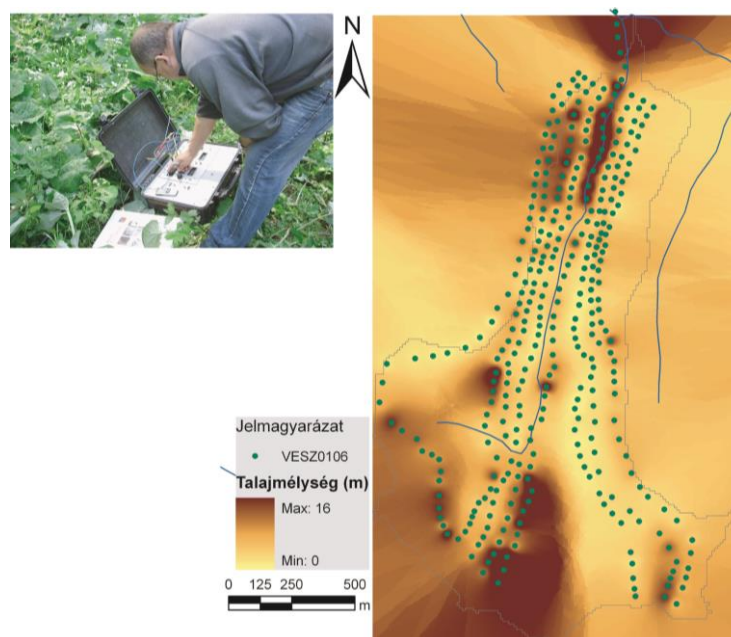
Az eszközök és módszerek fejezetében bemutatottaknak megfelelően a talajra vonatkozóan három beépülő paraméterre végeztem el a vonatkozó pontosításokat (talajvastagság, textúrára és a genetikai talajtípus).

##### 4.4.2.1. A talaj és regolit vastagságának a meghatározása VESZ mérésekkel

A VESZ mérések alapján (94. ábra) talaj és regolit vastagság jelentősen meghaladták az AGROTOPO adatbázisban található termőtalaj vastagságokat. A terepi fúrások minden esetben szilárd alapkőzetig, amennyiben pedig nem volt, úgy a konszolidálatlan üledékek aljzatáig történt. A terepi fúrások és a VESZ mérések segítségével gyűjtött mélységadatok

azonban meglehetősen jó egyezést mutattak. A VESZ mérések eredményeit és értékeit befolyásolja a szemcseeloszlás, a nedvességtartalom, illetve a szervesanyag tartalom is. Ez utóbbi összefüggés vizsgálatához összehasonlító méréseket végeztünk, azonban, legalábbis méréseink alapján, nem találtunk összefüggést a szervesanyag-tartalom és a geoelektromos ellenállások értékei között (96. ábra).

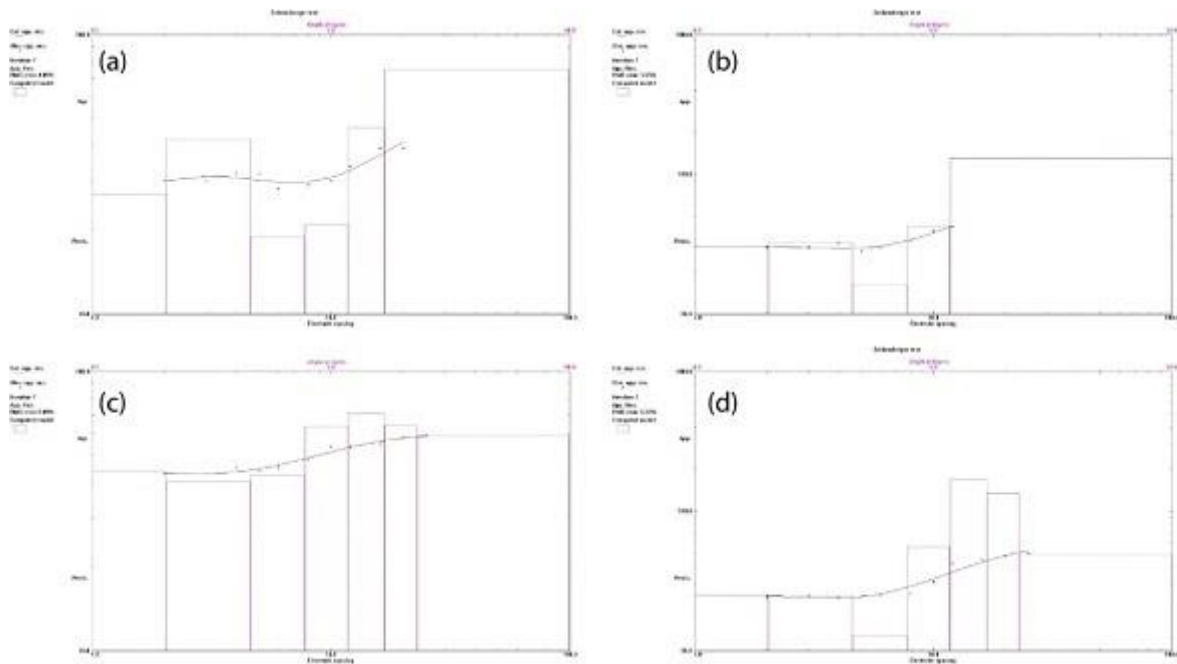
A talajminták átlagos szemcse nagysága az iszap frakcióba tartozik, mintegy 25  $\mu\text{m}$  átlagos szemcse nagysággal. A minták agyagtartalma általában 10% alatti, homoktartalmuk (63  $\mu\text{m}$  feletti szemcsék) aránya pedig 20% alatti.



94. ábra Interpolált talajvastagság térkép, valamint a VESZ mérések helyszínei a Pósa völgyben

A VESZ fúrások alapján (95. ábra) kimutatható a termőtalaj, és a vadózus zóna vastagsága is, melyek a felszín alatti lefolyás és a köztesfolyás következtében hozzájárulhatnak a megnövekedett vízszintekhez az árhullám görbe leszálló ágában. Ez a vastagság tartalmazza a termőréteget és a laza, regolit jellegű üledéket is.

Az AGWA talajvastagsági input paraméterénél a 2,76 méteres értéket használtam, mivel ez az érték nagyobb számú mért érték átlagából származik, mint a fűrt értékek esetében. A VESZ mérések alapján (95. ábra) az átlagos talajmélység (regolit réteggel együtt) 2,76 méternek, a kézi fúrások alapján 2,66 méternek adódott (16. táblázat).



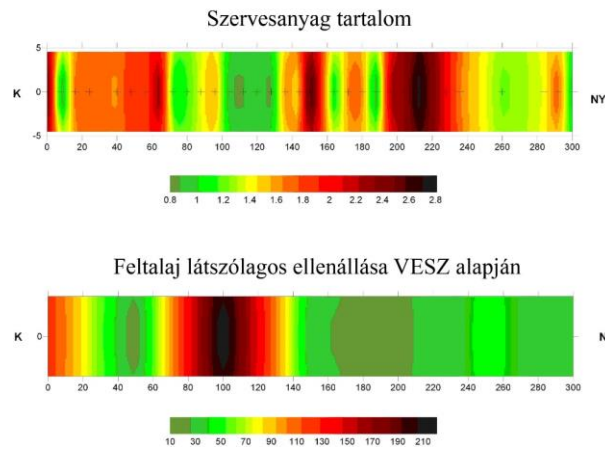
95. ábra Négy VESZ görbe diagramja a Pósa-völgyben elvégzett VESZ mérések közül. Az oszlopszélességekből kivethető, hogy az ellenállás értékek csak diszkrét mélység-intervallumokra határozhatók meg

16. táblázat Geoelektromos ellenállás alapján meghatározott valamint terepi fúrások által megállapított talaj- és laza üledékvastagságok a Pósa-völgyben

Fúrás azonosítója	Fúróluk átmérője (mm)	Fúrások által megállapított talajmélység (m)	VESZ talajmélység (m)
MÉV 5056	n.a.	8,0	n.a.
MÉV 5043	n.a.	9,8	n.a.
MÉV 5026	n.a.	8,9	n.a.
V41/6	125	5,0	4,9
V42/6	125	2,8	3,1
V43/6	125	4,9	5,7
S1/1	60	2,0	2,1
S1/2	60	1,4	1,6
S1/3	60	2,2	2,1
S1/5	60	1,2	1,5
S1/6	125	1,2	1,0
S1/7	125	3,3	2,9
	Átlag:	2,66	2,76

A vízgyűjtő felső, nehezebben megközelíthető meredek völgyvállakkal tagolt magasabban fekvő déli részén ritkábbak voltak a mérések, de még elegendő sűrűségűek a térbeli talajmélység interpolációhoz. A vizsgált mintaterület alsó és felső peremi területei nagyobb talajmélységgel jellemezhetők. A vízgyűjtő ezen részein a lejtőszög értékek

viszonylag kisebbek, azaz az erózió hatására kisebb mértékű volt a talaj és a laza üledék vesztesége.



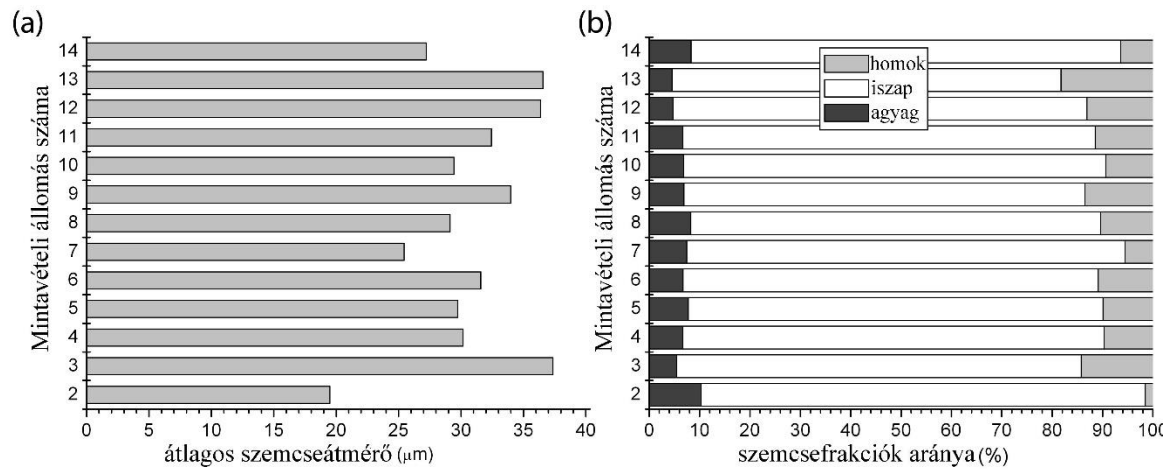
96. ábra A talaj szervesanyagtartalma és a feltalaj látszólagos ellenállása közötti összefüggés a Pósa-völgy déli részén található hossz-szelvényében

#### 4.4.2.2. Szemcseeloszlás meghatározási eredmények, granulometriai vizsgálatok

A talajminták (97. ábra) közepes szemcsenagysága (98. ábra) az iszap frakcióba tartozik, mintegy 25  $\mu\text{m}$  átlagos szemcsenagysággal. A terület talajait az iszapos vályog fizikai talajtípusba soroltam. Ezt bemeneti adatként használtam fel az AGWA modellben, így a program már kezelni tudta a telített vízvezető-képesség ( $K_s$ ) értéket, illetve a Horton-féle maximális és végső beszivárgási sebességeket is.



97. ábra Néhány GeoS Bt. által a Pósa-völgyben mélyített fúrás 20 centiméterenként vett talajmintái. A maximális fúrástalp az itt bemutatott esetekben 2,2 méter volt. (Fotó: Keresztény Balázs)



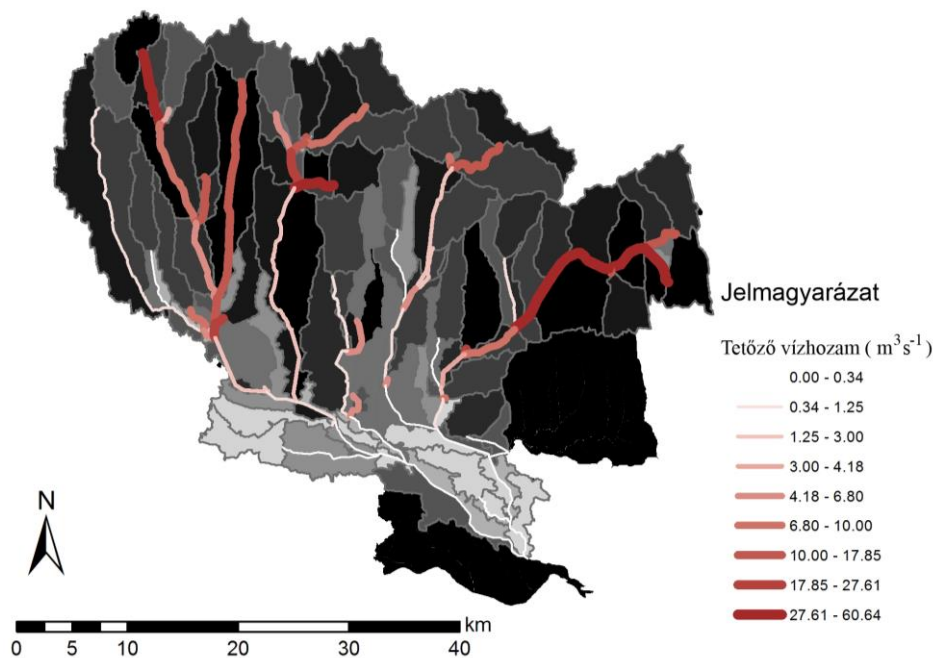
98. ábra (a) Átlagos szemcseátmérő, valamint (b) az agyag, iszap és homok frakció %-os aránya 13, a Pósa-völgyben gyűjtött talajminta esetében

### 4.4.3. AGWA modellfuttatások eredményei

A továbbfejlesztett AGWA programba több, összesen húsz jelentősebb, dél-dunántúli vízfolyás van integrálva. A Bükkösdi-vízfolyáson kívül még további két vízgyűjtőre végeztem el a modellfuttatásokat. Vizsgálataim, illetve modellfuttatásaim a Baranya-csatornára és a Karasica-patakra is kiterjedtek, ezek segítségével továbbfejlesztettem a modell pontosságát.

Mindhárom vízfolyás esetében négy eltérő, de az adott vízfolyásra jellemző 1-20% -os valószínűségű tetőző vízhozam értékre végeztem el a modellfuttatásokat. Mivel a vízfolyások hidrológiai szempontból és méret szerint különbözőek pl.: szelvény méret, kiépítettség), így a tetőző vízhozam (és vízállás) értékek jelentősen eltértek vízfolyásonként, illetve egy adott vízfolyáson belül is. A kezdeti bemeneti talajnedvességi adatokra vonatkozóan (a) igen száraz ( $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), (b) száraz ( $0,2 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), (c) nedves ( $0,3 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) és (d) a közel telített ( $0,4 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) esetekben határoztam meg a tetőző vízhozam értékeket.

A Fekete-víz vízgyűjtőjére rövid idő (6 óra) alatt lehulló nagy mennyiségű csapadék (52,5 mm), de száraz kezdeti állapotú talaj ( $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) esetében, még nem az összes vízgyűjtőn található vízfolyás vezeti le a keletkezett az árhullámot (99. ábra).

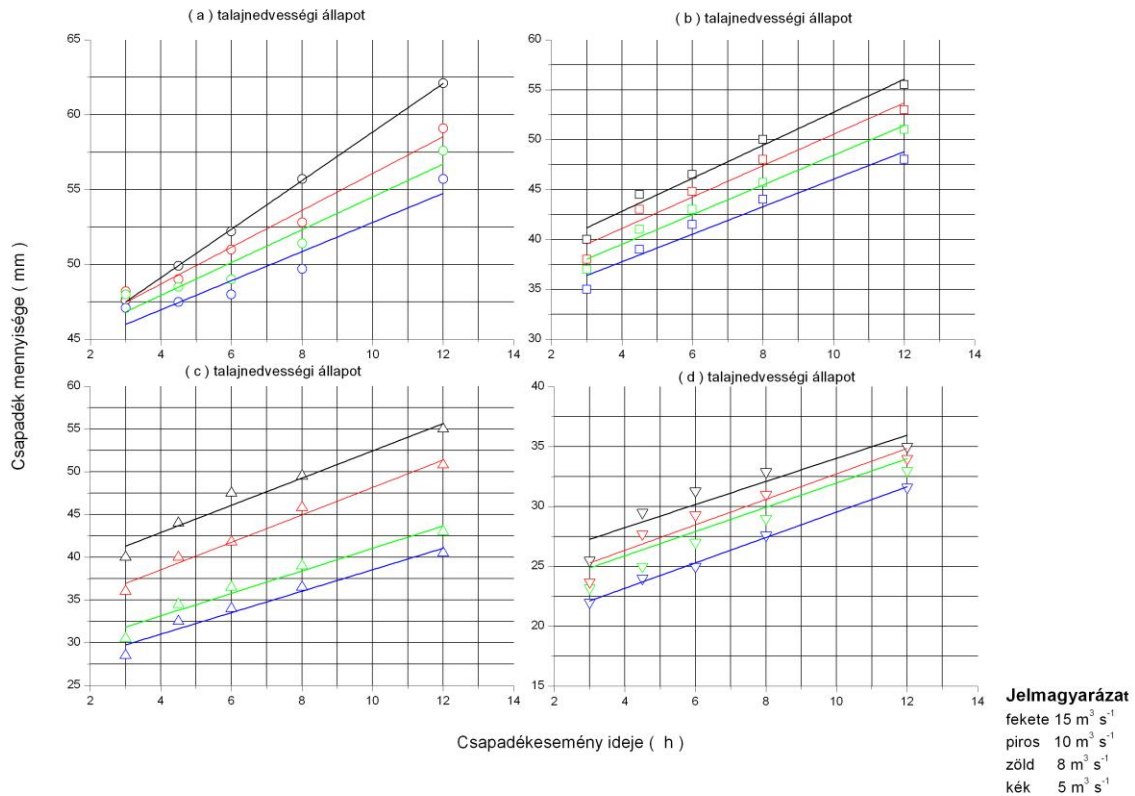


99. ábra Az AGWA modellfuttatás eredménytérképe a Fekete-víz vízgyűjtőjére. Alkalmazott értékek (10 lépés; 52,5 mm, 6 óra,  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ )

A Bükkösdi-vízre modellezett adatok alapján (100. ábra) megállapítható, hogy a parametrizált AGWA modell, a kisebb,  $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  értékű tetőző vízhozam értékek esetében, a

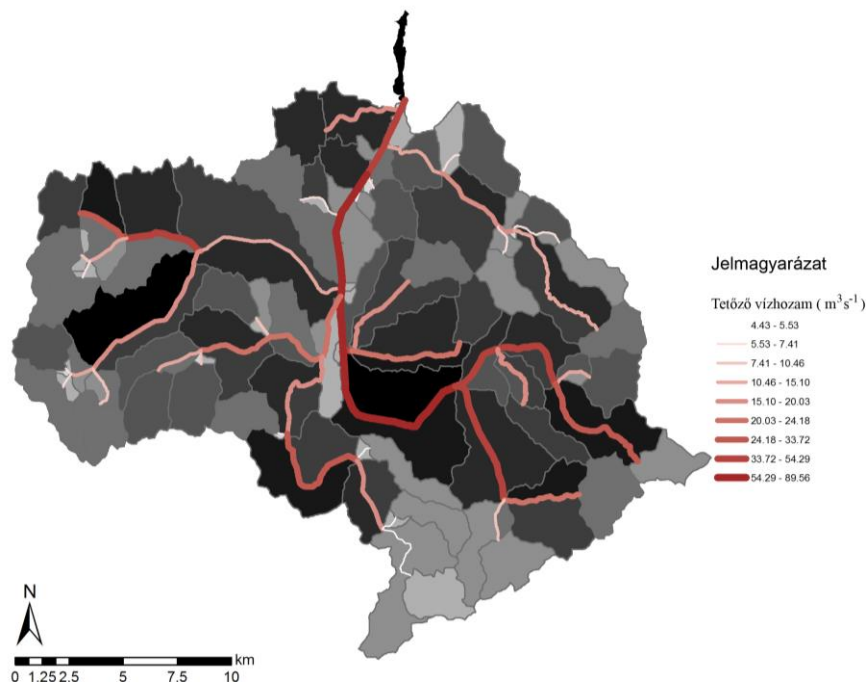


rövidebb csapadékeseményekre fokozottan érzékeny. Rövidebb időintervallumú (3; 4,5 és 6 órás) csapadék események tekintetében, ami megközelítőleg 46 és 50 mm közötti csapadékmennyiséget jelent áll fenn a modell érzékenysége. Általánosságban megállapítható, hogy a növekvő talajnedvességi érték esetén, egyre kevesebb csapadék mennyiség szükséges ugyanazon mennyiségű tetőző vízhozam eléréséhez.



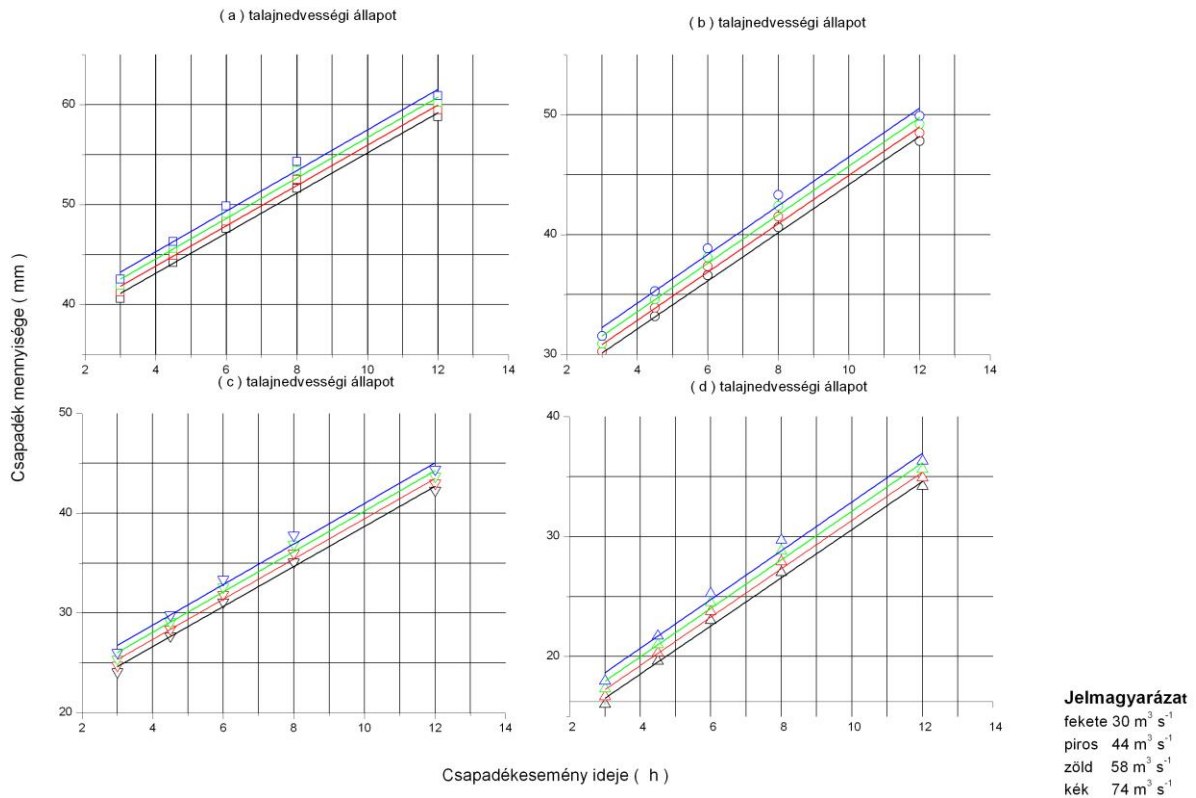
100. ábra Tetőző vízhozam értékek a csapadékösszegek függvényében (nomogram), a leválogatott nagy- és árvízi eseményekre, a Bükkösdi-víz (Hetvehely kifolyási pont)

Az előzőekben említett másik két vízfolyás eltérő nagyságrendű modellezett vízhozam adatokat tartalmaz. A Baranya-csatorna esetében szintén négy-négy nomogramot szerkesztettem a modellezett adatok alapján. A Baranya-csatornán a beállított input paraméterek alapján levonuló árhullám a 101. ábrán látható. Sötétebb fekete színnel jelennek meg a különféle lefolyási egységek, piros színnel pedig a tetőző vízhozam értékek. Természetesen a becsatlakozó vízfolyások is részt vesznek a levezetésben. Több szakaszon visszaduzzasztás is látható.



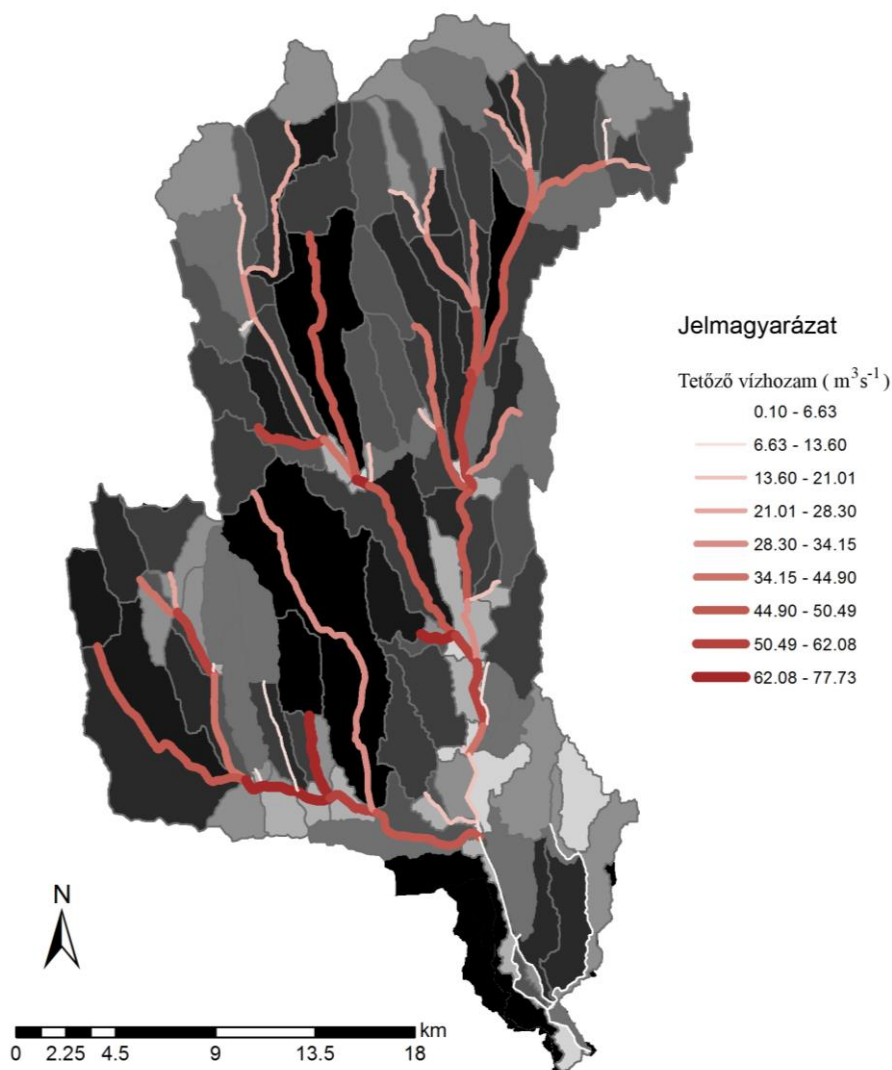
101. ábra A Baranya-csatorna vízgyűjtőjére, AGWA modellfuttatás grafikus eredménye. Alkalmazott értékek (10 lépés; 48,35 mm, 6 óra, és  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  kezdeti talajnedvességi érték)

A Baranya-csatornára (102. ábra) modellezett vízhozam adatok jelentős szórást mutatnak, a 8 óra időtartamú csapadékesemény alkalmával, mint a 3, 4.5, 6, és 12 időtartamú csapadékesemények alkalmával. A legkisebb szórást pedig a rövid intervallumú modellezett események alkalmával kaptam, itt a szórás értéke 0,83-al volt egyenlő. A tetőző vízhozam értékeket létrehozó csapadékmennyiségekre nagyon érzékeny a modell. A  $30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  értékhez 3 órás csapadék időtartam esetén 40,5 mm csapadék szükséges, míg a  $74 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ -es értékhez 43 mm csapadék szükséges, száraz ( $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) talaj esetén. Azonban ugyanekkora csapadékterhelés Csikóstöttősnél, a valaha mért legnagyobb tetőző vízhozam értéket eredményezte.



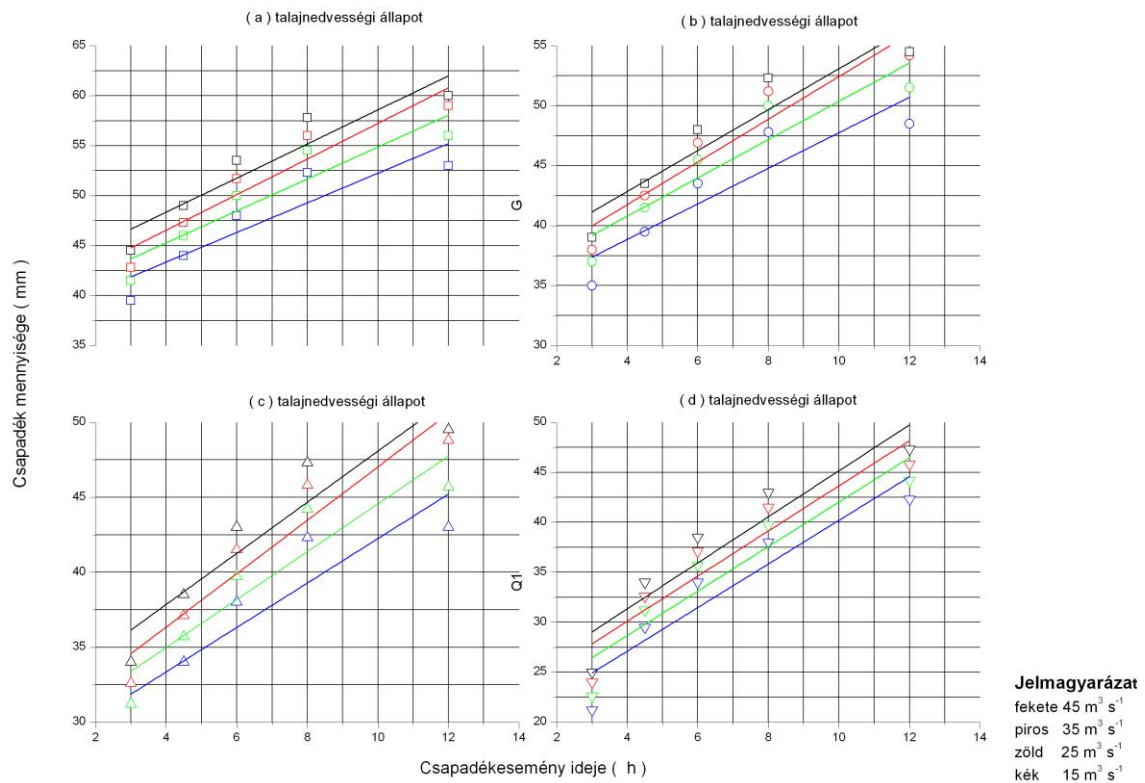
102. ábra Tetőző vízhozam értékek a csapadékösszegek függvényében (nomogram), a leválogatott nagy- és árvízi eseményekre, a Baranya csatornára (Csikóstöttős szelvény)

A Karasica-patak esetében látható, hogy a vízgyűjtő felső részén a vízfolyásokon jóval kisebb vízhozamok jelennek meg a modellben, azonban az alsó szakaszokon, ahol több becsatlakozó oldalág található, a vízhozamok jelentősen megnőnek, akár „*bottle neck*”-ként viselkedve, azaz az árhullámok fő oka itt az árhullámok egymásra torlódása, illetve amplitúdójuk (magasságuk) hirtelen megnövekedése (103. ábra).



103. ábra A Karasica-patak vízgyűjtőjére, AGWA modellfuttatás grafikus eredménye. Alkalmazott értékek (10 lépés; 52,2 mm, 6 óra,  $0.1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ )

A négy tetőző vízhozam adatok mindegyik esetben közel azonos szórással jelennek meg a csapadék-idő adatok. A Karasica-patak esetében a rövidebb időintervallumú csapadékesemények tekintetében sem érzékeny a modell. A Karasica-patak esetében is a modellfuttatásokat a vízfolyásra jellemző tetőző vízhozam értékeknél ( $15, 25, 35, 45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) végeztem el (104 ábra). Az előző ábrákhoz hasonlóan itt is négy kezdeti talajnedvességi állapotra végeztem el a modellfuttatásokat.

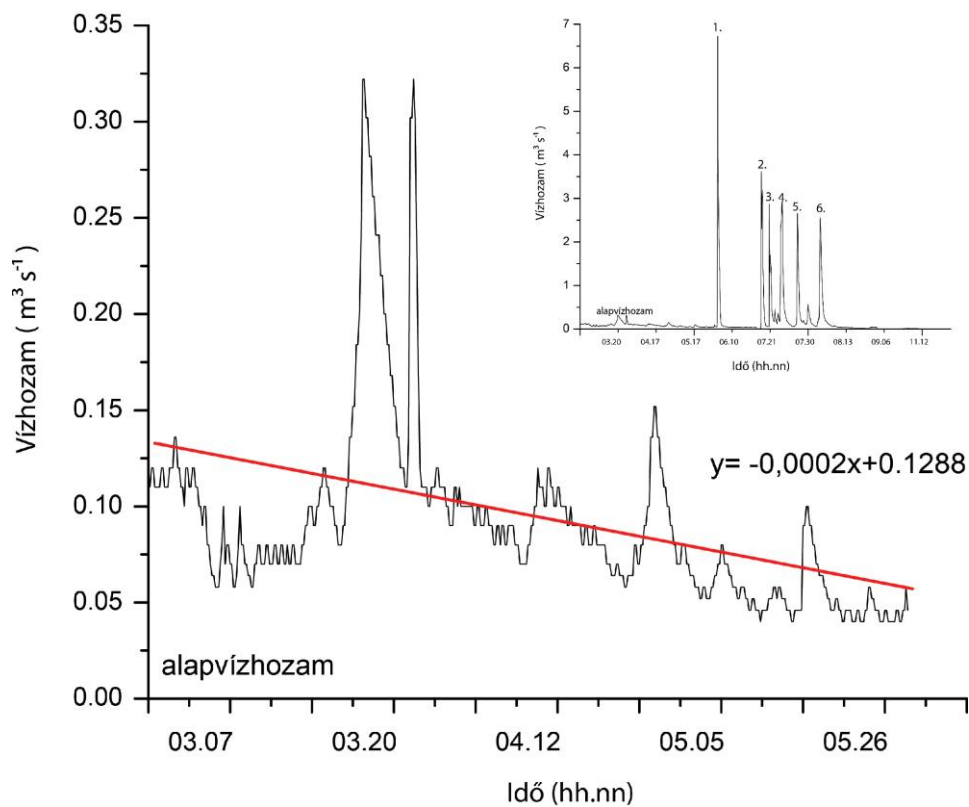


104. ábra Tetőző vízhozam értékek a csapadékösszegek függvényében (nomogram), a leválogatott nagy- és árvízi eseményekre, a Karasica-patak (Kátoly)

A vizsgált három vízgyűjtőre megszerkesztett négy-négy nomogram lényegében hasonló a vízügyeknél használt empirikus (egyszerű matematikai, pl. Koris) nomogramhoz, mivel közös vonás bennük az, hogy vízgyűjtő specifikusak, mindamelllett használatukkal egyszerűen meg lehet becsülni a lehullott csapadék mennyiségének, idejének, valamint a kezdeti talajnedvességi adatok birtokában a tetőző vízhozam értékeket.

A modell pontatlanságát azonban fokozza az, hogy nem lehetséges bemeneti adatként megadni alapvízhozam értéket. Az alapvízhozam meghatározásához a 2011. évre a vizsgált ultrakisméretű vízgyűjtő területen található Hetvehelyi-mellékág (Sás-patak) vízhozam adatsorát használtam fek (105. ábra). A Hetvehelyi-mellékág Hetvehely község nyugati végében becsatlakozik a Bükkösdi-vízfolyásba, ez azonban időnként visszaduzzasztást és pontatlan alapvízhozam értékeket jelent a mellékágon. A 2011-es évben hat jelentősebb árhullám vonult le a mellékág medrében, ebből négy július hónapban. Mivel a modell pontatlanságát az alapvízhozam érték hiánya is okozza, így az egész éves vízhozamból leválogattam a március és május közötti alapvízhozam értékeket (105. ábra). Jól látható az ábra alapján, hogy a mellékág kora tavaszi induló vízhozam értéke, fokozatosan csökkenő tendenciát (a mérési pontokra illesztett egyenes egyenlete:  $y = -0,0002x + 0,1288$ ) mutatott az

első nagy árhullám (június 4.) megjelenéséig. Ez azt bizonyítja, hogy az aktuális vizsgált időszak alapvízhozamat szükséges meghatározni a modellfuttatásokhoz. Következésképpen a pontosabb lefolyás modellezéshez szükséges a továbbiakban az alapvízhozam értékének az integrálása a modellbe. Eredményeim alapján a csapadékadatok mellett, a HEC-HMS és egyéb lefolyási modellhez hasonlóan, az intercepciós veszteséget is figyelembe kellene venni a modellben. Továbbá szintén nagyfokú bizonytalanság ered az egyes vízfolyások vízgyűjtő karakterisztikájából.

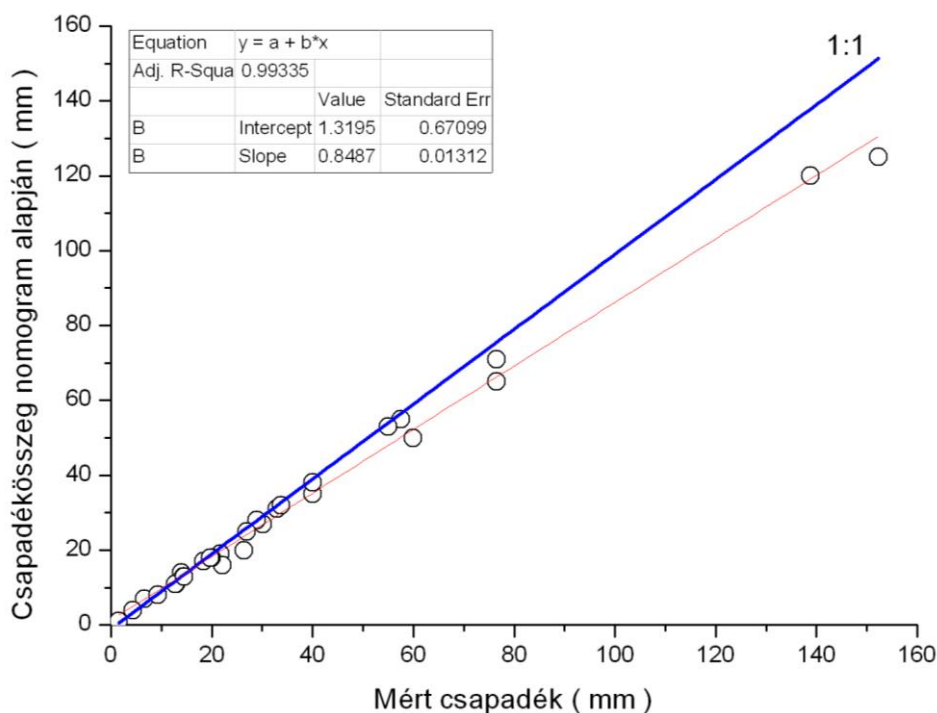


105. ábra A Hetvehelyi mellékág alapvízhozam lefutása 2011 március 1 és május 31. között, illetve a 2011. évre vonatkozó vízhozam adatsor (jobb felső sarokban)

#### 4.5. Vízgyűjtő-specifikus területi csapadék korrekciós faktor megállapítása

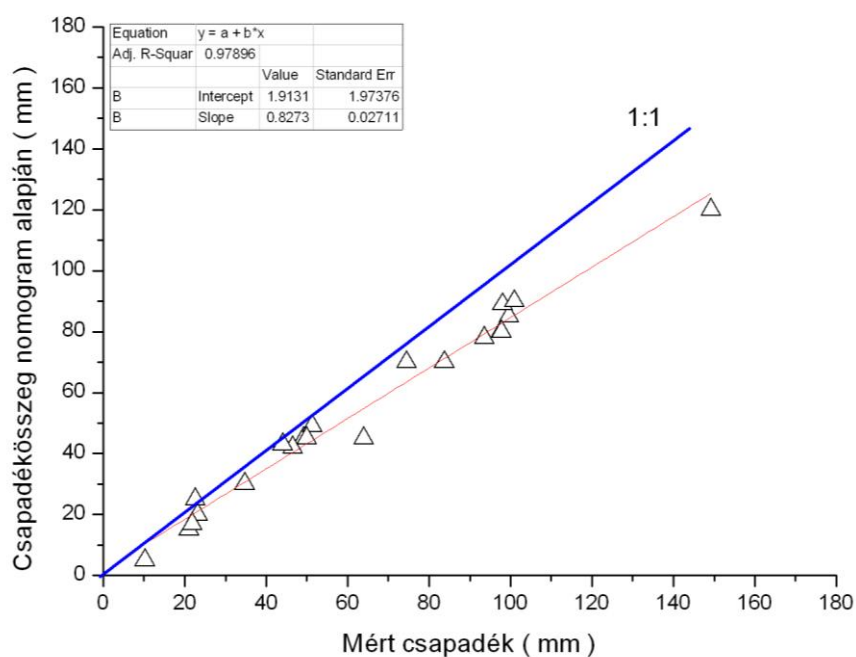
A kívánt tetőző vízhozam eléréséhez szükséges volt megadni a csapadékesemény ideje alatt leesett csapadék mennyiségét. Ehhez a legközelebbi hidrometeorológiai mérőállomás adatsorát, adatsorait használtam fel a modellfuttatások esetében. A Bükkösdi-víz esetében az összehasonlított adatokból jól látszik, hogy kevesebb bemeneti csapadék megadásával is elérhető a kívánt tetőző vízhozam érték (106. ábra).

Az összehasonlított adatok azt mutatják, hogy a program túlbecsüli a vízhozam értékeket. A tetőző vízhozam értékek túlbecsülése adódhat a mért (egy pontban), illetve a vízgyűjtőre esett csapadékmennyiség területi inhomogenitásából.

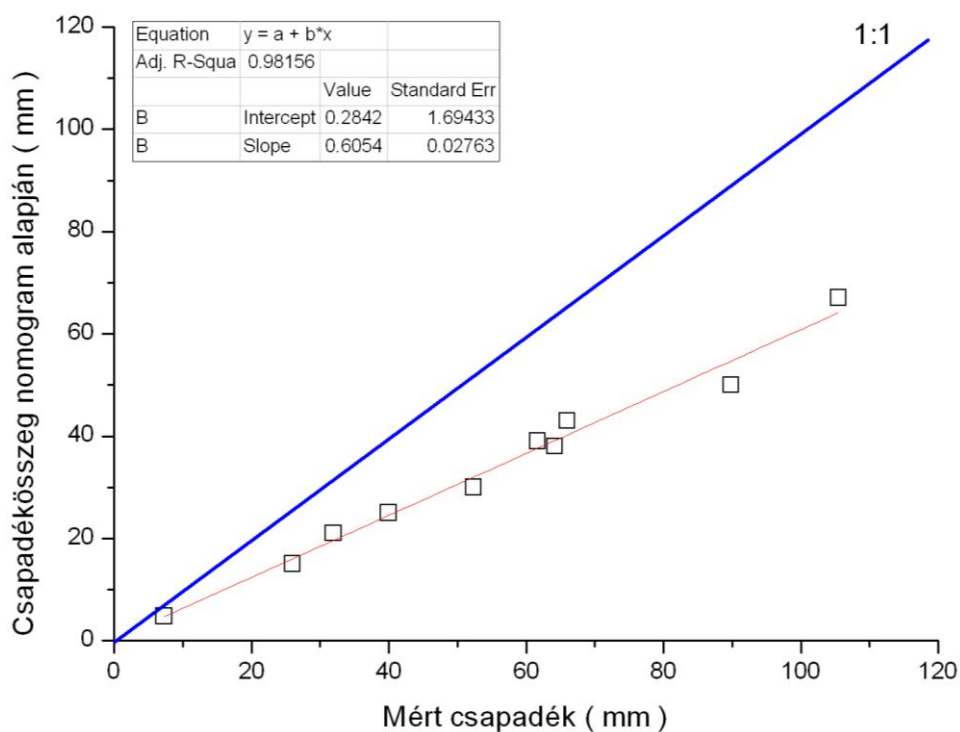


106. ábra Az AGWA lefolyási modell futtatás során megadott input csapadékatatok összehasonlítása a mért csapadékatatokkal (Hetvehely állomás), a Bükkösdi-vízre. kék vonal az 1:1-es vonal, a vizuális összehasonlíthatóság miatt.

Az alkalmazott nomogram abban különbözik a korábbi empirikus egyenletektől, a racionális módszer kivételével, hogy tartalmaz csapadékösszegeket, csapadék időtartamot és következésképpen átlagos csapadékintenzitást, valamint kezdeti talajnedvesség értékeket viszont nem használható bármekkora vízgyűjtő területre, mivel vízgyűjtő specifikus. A Baranya-csatornára (107. ábra) és a Karasica-patakra (108. ábra) vonatkozóan az alábbi két ábra meredeksége alapján határoztam meg a csapadék korrekciós tényezőt.



107. ábra Az AGWA lefolyási modell futtatás során megadott input csapadékatok összehasonlítása a mért csapadékatokkal (Csikóstóttós állomás), a Baranya-csatornára. kék vonal az 1:1-es vonal, a vizuális összehasonlíthatóság miatt.



108. ábra Az AGWA lefolyási modell futtatás során megadott input csapadékatok összehasonlítása a mért csapadékatokkal (Kátoly állomás), a Karasica-patakra. A kék vonal az 1:1-es vonal, a vizuális összehasonlíthatóság miatt.



A modellfuttatás számára szükséges bemeneti csapadékadatra vonatkozóan bevezettem a Bükkösi-vízre, illetve két további Dél-dunántúli, hegy- és dombvidéki vízfolyásokra vonatkozóan (Baranya, Karasica) egy területi szorzót (17. táblázat).

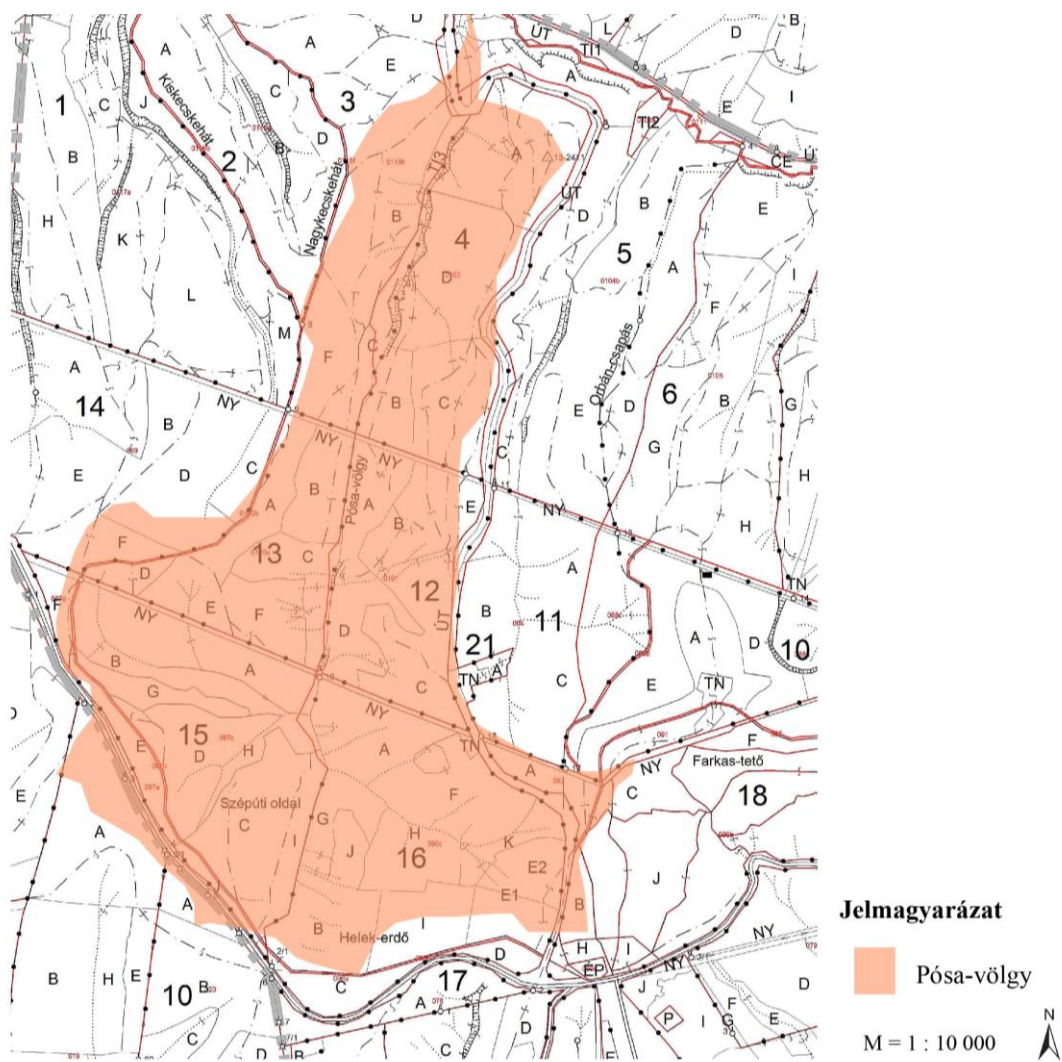
17. táblázat Az AGWA modellfuttatáshoz szükséges területi (csapadék) szorzó

Vízgyűjtő terület	Bükkösi-víz	Baranya-csatorna	Karasica-patak
Területi szorzó	0,84	0,82	0,60
Vízgyűjtő terület nagysága (km <sup>2</sup> )*	102	462	736
Vízgyűjtő terület nagysága (km <sup>2</sup> )**	185	473	705

\* érvényes vízjogi engedély alapján

\*\* DDVIR leválogatás alapján

A mérések, elemzéseim alapján meghatározott területi szorzó egyszerűen használható arra, hogy a terület egy pontjában hullott csapadék, összességében az adott vízgyűjtőn mekkora területi átlagnak felel meg. A csapadékszorzó mellett azonban sok egyéb környezeti változó is befolyásolja a lefolyást, mint pl. a vegetációs borítottság. A NÉBiH (Nemzeti Élelmiszerlánc Biztonsági Hivatal) által felügyelt a Baranya Megyei Erdészeti Igazgatóság rendszeresen készít erdőtagozati leírások tájékoztató információt szolgáltathatnak az intercepció mértékével kapcsolatban (109. ábra). A NÉBiH leírások tartalmazzák a területen található fafajok összességét, s a részletes adatbázis további feldolgozása, modellbe történő integrálása növelheti az előrejelző rendszer pontosságát.



109. ábra A Pósa-völgyre vonatkozó erdészeti egységek megjelenítése (Forrás: NÉBiH) Számokkal az erdőtag azonosítók, a betűkkel pedig az erdőrészlet látható

## 5. Összefoglalás

A 2011. évben kiépítettem a Nyugat-Mecsekben található Pósa-völgyi mintavízgyűjtőben tizenegy darab Decagon gyártmányú mérőállomásból álló monitoring rendszert. A hidrometeorológiai és talajfizikai paramétereket mérő és regisztráló állomások billenőedényes csapadékszenzorokat, talajnedvesség szenzorokat és adatgyűjtőket tartalmaztak. A mérőállomások felett 2-4 hetes intervallumokban lefényképeztem a lombkoronát, majd ArcGIS szoftverkörnyezetben kiszámítottam a lombkorona fedettséget.

A disszertációmban célirányosan lefolyás és mélyebb szintű kisvízgyűjtő elemzésekhez gyűjtöttem adatokat, ezeket homogenizáltam, összesen közel 1.650.000 adatsor (csapadék, talajnedvesség) dolgoztam fel. A gyűjtött csapadék, talajnedvességi és borítottsági információk biztos alapot képeztek a három, lefolyást befolyásoló változó területi és időbeli eloszlásának megismeréséhez a Pósa-völgyi kisvízgyűjtőben. A nagy térbeli sűrűségű adatbázis létrehozása lehetővé tette a Dél-Dunántúlra kifejlesztett ArcGIS szoftverkörnyezet alá beépülő AGWA alapú csapadék-lefolyás modell parametrizálását.

A vízgyűjtő kis mérete ellenére a csapadékösszegek meglehetősen nagy területi különbségeket mutattak, azaz szignifikáns különbségek jelentkeztek az egyes mérőpontokon rögzített adatao között. A jelentős térbeli különbségek részben a csapadékmérő edény feletti eltérő sűrűségű lombozatra, részben orografikus és lokális hatásokra vezethetők vissza.

A doktori disszertációm során kifejlesztett modellbe olyan árvízhozam meghatározási módszer került integrálásra, amely alkalmas a mértékadó árvíz meghatározására a talajnedvesség, csapadékesemény összege és időtartama esetében vízfolyás bármely keresztmetszelyére. Ideális esetben a modellfuttatás a legfrissebb mérési adatokra és adatsorokra támaszkodva, több passzív paraméter figyelembe vétele mellett alkalmas vízhozam és vízállás (ha rendelkezünk  $Q-h$  görbével) relatíve pontos előrejelzésre kisvízfolyásokon. Az elmúlt években számos példáját láhattuk az árvizek okozta gazdasági és környezeti károknak, melyek helyreállítási költségei milliárdokban mérhetőek. A kutatás során olyan, eddig még nem létező részletességű módszer, modell került kidolgozásra, amely képes a mértékadó árvíz gyors meghatározására, ezáltal a gyors beavatkozást, kárelhárítást is lehetővé teszi a fenti kárértékek töredékéért. Kiemelendő, hogy e kutatás, hasonlóan a nyugat-európai és észak-amerikai gyakorlathoz, erősíti az egyetem stratégiai kapcsolatait a különböző intézményekkel, mint például a Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatósággal, Országos Vízügyi Igazgatósággal a környezeti kutatások javítása és alkalmazása érdekében.

A célkitűzésekben megadott pontok alapján a disszertációmban kitűzött és elért eredményeket az alábbi célkitűzésekben meghatározott pontok alapján foglalhatóak össze tételenen:

### ***1. Csapadék és talajnedvességi adatok összefüggés vizsgálata erdővel borított és fátlan mérőpontok esetében***

A vizsgált időszakban a 11 mérőállomáson összesen 1022 darab csapadékesemény került leválogatásra. A legtöbb esemény az 5. mérőponton (146 darab) és a legkevesebb pedig a legszárazabb, 8. mérőponton (44 darab) került feldolgozásra (11. táblázat).

A csapadékmennyiségére vonatkozóan megállapítottam, hogy a legtöbb 2 mm alatti (a csapadékesemény alkalmával esett össz mennyiség) szintén az 5. mérőponton esett, összesen 117 ilyen esemény volt. Az általam választott kategóriák alapján, a legtöbb, 10 mm-t meghaladó csapadékesemény a 7.2 (fátlan) mérőponton, 13 alkalommal került rögzítésre.

Összefoglalóan megállapítottam a rögzített és elemzett talajnedvességi adatok alapján, hogy az erdővel borított területeken, csapadékesemény elején a csapadék teljes mennyisége fennmaradt a lombozaton. Ez a mennyiség, ez a tározási idő az én megközelítésemből időelőnynek számít, illetve a lefolyási modellezésnél negatív előjelként jelenik meg.

A tározási érték, amint meghaladja a vizsgált területen lévő társulásra jellemző 5 mm nagyságú szélső-felső maximális korlátot, úgy elkezdett beszivárogni a talajba, ahol hirtelen emelkedni kezdett a talajnedvesség értéke. Ezzel szemben a fátlan területeken ez az átnedvesedési (beszivárgási) folyamat sokkal egyenletesebben zajlott.

### ***2. A lombkorona fedettség éves lefutásának meghatározása a Pósa-völgy vízgyűjtőjében, valamint az eredmények felhasználhatóságának vizsgálata más hasonló környezeti adottságokkal rendelkező közép-európai kisvízgyűjtőkre***

A terepi méréseim és az elkészített fényképek elemzése alapján megállapítottam, hogy a késő tavaszi, nyári időszakban (április 26 és július 6 között) maximalizálódott minden egyes mérőpont felett a felfogó levélzet mennyisége (13 táblázat). A területen található gyertyános - bükkös-csertölgyes társulásban a borítottság értékei a tavaszi minimum 19,65 %, és őszi minimum érték 13,2 % valamint a maximum érték, 61,15% között változtak. Az eredményeim ismeretében, hasonló társulások esetében alkalmazni lehetet a kapott értékeimet. Az értékek általánosan használhatóak a lefolyási modellek veszteségi bemeneti adatok megadásánál.

### **3. Az intercepció nagyságának meghatározása a Pósa-völgy vízgyűjtőjében, az eredmények összehasonlítása korábbi irodalmi adatokkal**

A monitoringrendszer csapadékmérői váltakozóan lombkoronával borított, illetve fátlan tisztás területeken helyezkedtek el. A két-típusú mérőhely különbségeiből meghatároztam az intercepció mértékét. A lombkoronán fennmaradt átlagos csapadékmennyiség közel 5 mm volt, amely meghaladja a korábbi irodalmakban szereplő átlagos 2-4%-os értéket.

Kutatásaim során kidolgoztam egy módszert, amellyel meghatározható volt a csapadékmérő edény felett elhelyezkedő lombzat borítottságának értéke. A felvett pontok, illetve számított összefüggések alapján meghatározható egy adott időpontban az aktuális borítottság értéke. Disszertációmiban ismertettem a mintaterületen az intercepció maximális felső értékét, amely 5 mm a vizsgált társulás esetében.

A fátlan és erdővel borított összes (2 mm alatti csapadékokkal együtt) csapadék összegek alapján elmondható, hogy 214 mm csapadék tározódott a vizsgált időszakban a lombkoronán. Ez az érték 39.90%-nak felel meg az időszak teljes csapadékösszegéhez képest, így jelentősen meghaladja Führer (1992) által mért 23%-os értéket. Megjegyzendő azonban, hogy FÜHRER (1992) kocsánytalan tölgyre (*Quercus robur*) határozta meg ezt az értéket, míg a Pósa-völgyben a társulás jellemző fafajai a bükk, gyertyán és a csertölgy.

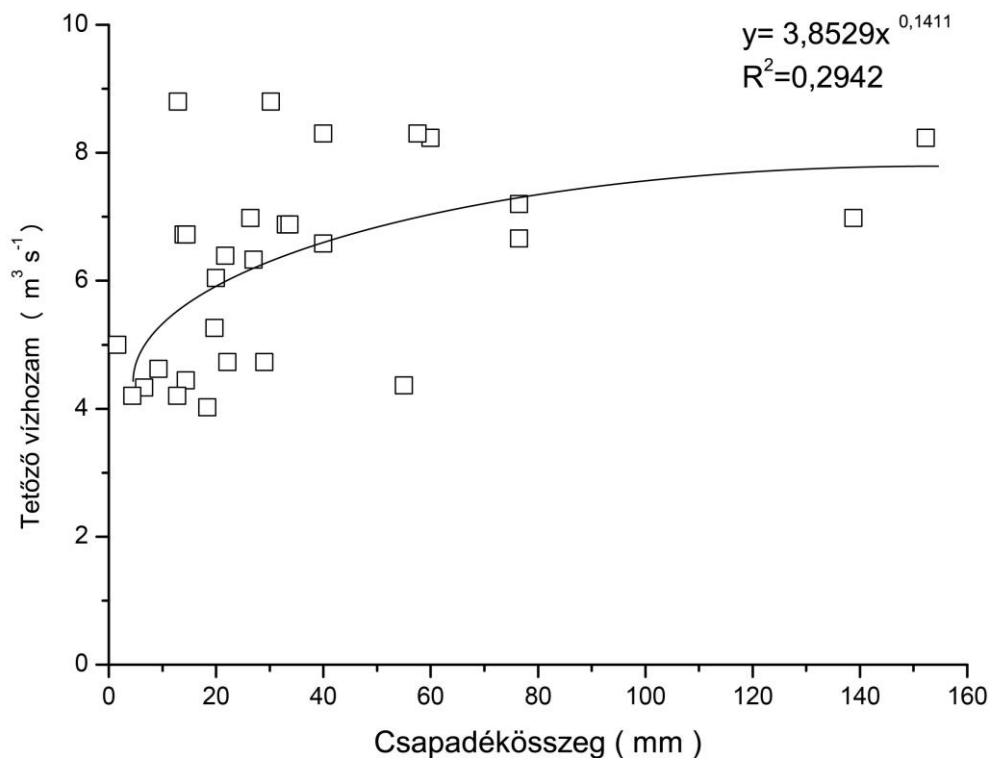
Meghatároztam a dél-dunántúli mintaterületre egy csapadék-intercepció konverziós egyenletet. A generált egyenletem alapján, a csapadékösszegeből közvetlenül becsülhető a területre (illetve a Pósa-völgyhöz hasonló társulással borított vízgyűjtőkre) az intercepció, 13. egyenlet alapján. Az intercepciós egyenletemet visszavezettem, átkonvertáltam, Horton-alapú egyenletre (14. egyenlet) is.

### **4. Szemi-empirikus, vízgyűjtőspecifikus, talajparaméterezettségű monogrammok kialakítása a gyors árvízhozam számítás elősegítéséért.**

A három dél-dunántúli mintavízgyűjtő esetében vizsgáltam a bemeneti adatok (csapadékesemény ideje, csapadék mennyisége, talajnedvesség értéke) alapján indukált tetőző árhullám értékeket. Négy különféle talajnedvességi scenárióra modelleztem a vízgyűjtőre releváns csúcs vízhozam értékeket. Az adott vízgyűjtőre jellemző AGWA alapú nomogram egyedileg jellemző az adott vízfolyásra. A csapadék mennyiségének, vagy az esemény ideje ismeretében a grafikonról leolvasható a tetőző vízhozam értéke.

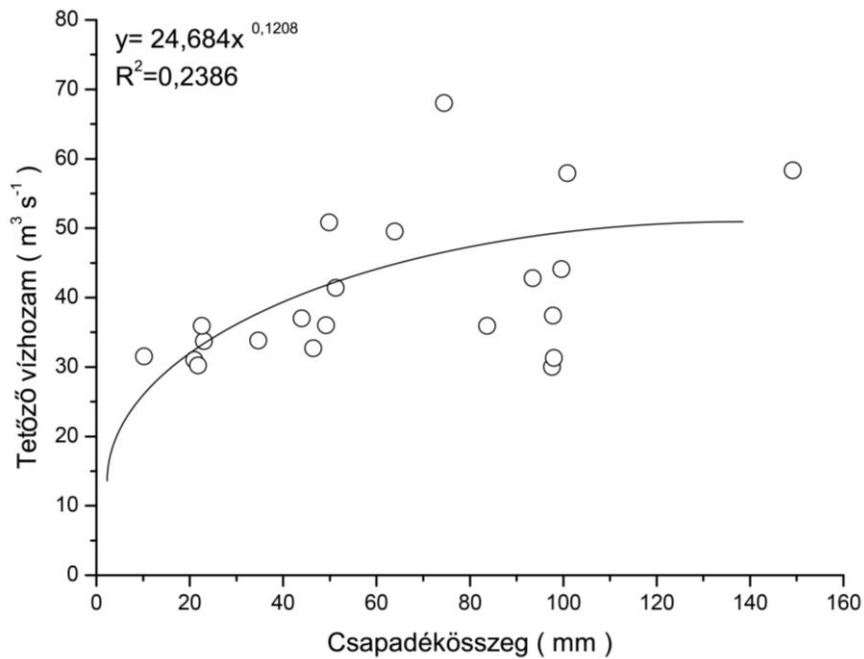
Az elérni kívánt, adott vízfolyásra jellemző vízhozam adat reprodukálásához szükséges volt megadni a csapadék mennyiségét is. A modellezések alkalmával azt tapasztaltam, hogy kisebb mennyiségű csapadék megadása is elégséges volt, ahhoz hogy az adott vízfolyáshoz képest kialakuljon a kívánt vízhozam. Erre vonatkozóan vezettem be egy területi csapadékkorrektív tényezőt (17. táblázat) a vizsgált Bükkösdi-vízre, illetve két további dél-dunántúli, hegy- és dombvidéki vízfolyásokra vonatkozóan (Baranya, Karasica).

A 110. ábrán láthatók a Bükkösdi-víz tetőző vízhozam értékei (M1. táblázat). A Bükkösdi-víz esetében 5, 8, 10 és 15 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> értékre határoztam meg a kiváltó csapadék összegeket és intenzitási értékeket. A nagyságrendileg megegyező csapadékok mégis eltérő vízhozam értékeket indukáltak a mederben, ugyanis egyéb környezeti tényezők is hatással vannak a kialakuló árhullámokra, mint például a talajnedvesség. A csapadék mennyiségét négyféle talajnedvesség állapot esetében vizsgáltam. Minden vízfolyás esetében az alábbi négy talajnedvességi állapothoz (száraz, közepesen nedves, nedves, közel telített) tartozó értékeket használtam a modellben, amelyek a következők: 0,1; 0,2; 0,3 és 0,4 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> értékekre végeztem el.



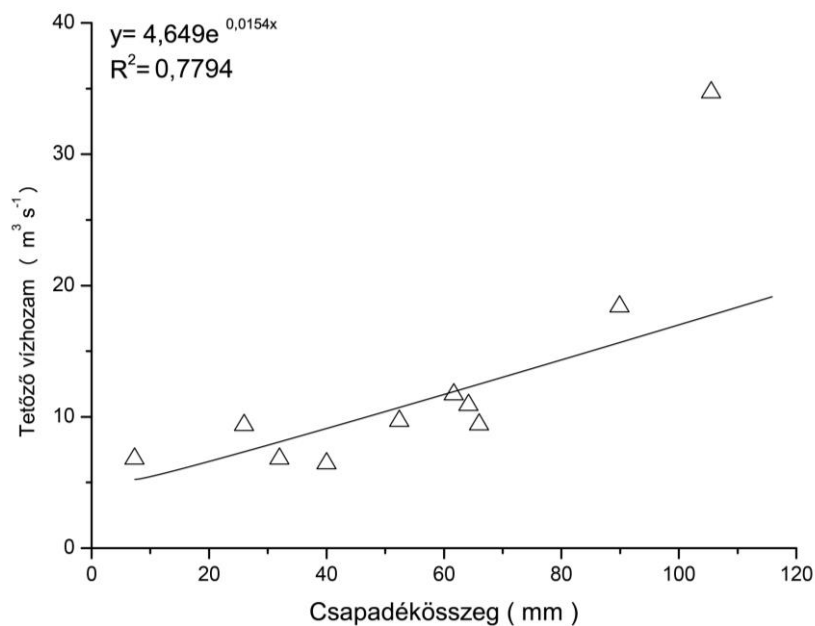
110. ábra A tetőző vízhozam értékek a csapadékösszegek függvényében a Bükkösdi-víz (Hetvehely kifolyási pont) nagy- és árvízi eseményekre

A több tízéves vízhozam adatok ismeretében (M2. táblázat) határoztam meg a vizsgált (70, 60, 44 és 30 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>) tetőző értékeket (111. ábra).



111. ábra A tetőző vízhozam értékek a csapadékösszegek függvényében a leválogatott Csikóstöttös településen nagy- és árvízi eseményekre

A másik vizsgált vízfolyás, a Karasica-patak volt. A Karasica-patak esetében is az ismert tetőző vízhozam értékek (M3. táblázat) ismeretében határoztam (112. ábra) meg a modellezés során a modellezett vízhozam adatokat.



112. ábra A tetőző vízhozam értékek a csapadékösszegek függvényében a Karasica-patak (Villány kifolyási pont) nagy- és árvízi eseményekre

## **6. A munka hasznosíthatósága, illetve a további irányai**

Jelen doktori disszertáció eredményei bizonyosan hasznosulni fognak, mind a tovább fejlesztendő Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság által üzemeltetett DDVIR rendszerben, mind az AGWA lefolyási modell további pontosítása, kiterjesztése során. Mivel minden egyes vízgyűjtő egyedi élettal, egyedi működési sajátosságokkal bír, ezért szükséges a dél-dunántúli egyéb hegy és dombvidéki vízfolyások bevonása a jövőbeli kutatásokba. A kutatások további iránya több szinten definiálható. A Pécsi Tudományegyetem Földrajzi Intézetén belül működő Villámárvízi Kutatócsoport további mérőállomások telepítésével, üzemeltetésével kíván mind térben, mind időben részletesebb képet kapni a csapadékról, talajnedvességről, összegyülekezési időről, lefolyási viszonyokról, nem csak kül-, hanem lakott területeken is. A Kutatócsoport tagjaként, a jövőben fejlesztendő monitoring hálózat fejlesztésében (monitoring eszközök telepítésében, üzemeltetésében) és az adatok analízisében tudnám a disszertációm eredményeit hasznosítani.

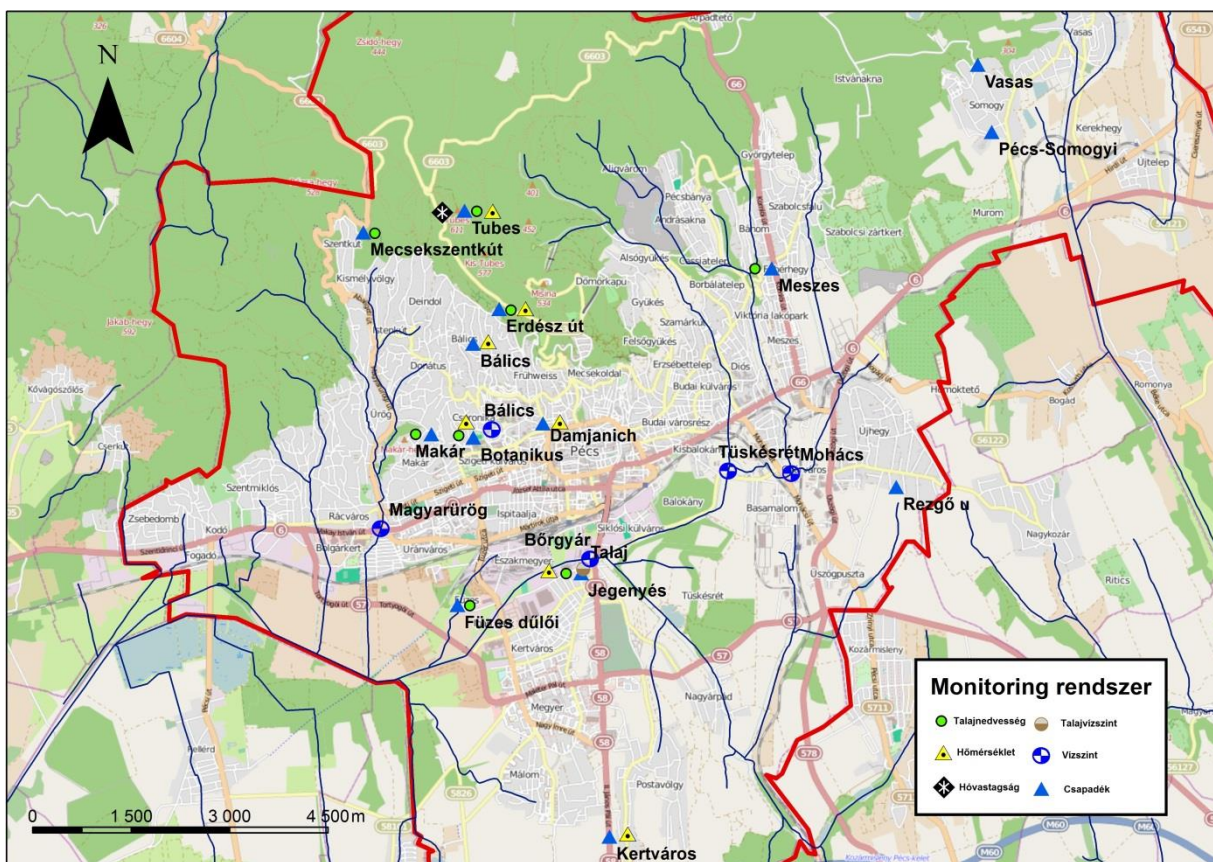
Felhasználva a jelen disszertáció, valamint a kutatócsoport eredményeit, létrehoztunk Pécs területén egy hidrometeorológiai mérőhálózatot. A  $10 \text{ km}^2$  mérőállomás<sup>-1</sup> ( $162 \text{ km}^2 / 14$  állomás) talán a legsűrűbb csapadékmérő hálózatot jelenti hazánkban. A csapadékmérő hálózat mellett kutatócsoportunk kiépített egy öt műszerből álló vízállásmérő hálózatot több, Pécs területén található vízfolyáson is a BÍOKOM városgazdálkodási céggel közösen, valamint több ponton mérünk talajnedvességet és léghőmérsékletet, valamint egy-egy ponton hóvastagságot és talajvíztükör mélységet is (18. táblázat, 113. ábra)



18. táblázat A Pécsi hidrológiai monitoring rendszer mérőhelyei

Helyszín	szenzorok	kihelyezés	Üzemeltető	Tulajdonos	Gyártó	mérési mód
Tubes	csapadék, talajnedvesség, hőmérséklet, hóvastagság	2013 2014	Telenor, Tettye Forrásház, PTE TTK	PTE TTK	Boreas, Decagon	digitális (valós idejű)
Szentkút	csapadék, talajnedvesség	2012 2014	Tettye Forrásház, PTE TTK	PTE TTK	Boreas, Decagon	digitális (valós idejű)
Makár	csapadék, talajnedvesség	2012 2014	Tettye Forrásház, PTE TTK	PTE TTK	Boreas, Decagon	digitális (valós idejű)
Damjanich	csapadék, hőmérséklet	2012 2014	Tettye Forrásház, PTE TTK	PTE TTK	Boreas	digitális (valós idejű)
Meszes	csapadék, talajnedvesség	2012 2014	Tettye Forrásház, PTE TTK	PTE TTK	Boreas, Decagon	digitális (valós idejű)
Somogy	csapadék	2012	Tettye Forrásház, PTE TTK	PTE TTK	Boreas	digitális (valós idejű)
Rezgő	csapadék	2012	Tettye Forrásház, PTE TTK	PTE TTK	Boreas	digitális (valós idejű)
Megyer	csapadék, talajnedvesség	2012 2014	Tettye Forrásház, PTE TTK	PTE TTK	Boreas, Decagon	digitális (valós idejű)
Kertváros	csapadék, hőmérséklet	2012 2014	Tettye Forrásház, PTE TTK	PTE TTK	Boreas	digitális (valós idejű)
Jegenyész	csapadék, talajnedvesség, hőmérséklet, talajvízszint	2012	PTE TTK	PTE TTK	Decagon	digitális, manuális
Erdész	csapadék, talajnedvesség, hőmérséklet,	2012	PTE TTK	PTE TTK	Decagon	digitális, manuális
Bálics	csapadék, hőmérséklet,	2013	PTE TTK	PTE TTK	Decagon	digitális
Vasas	csapadék	2013	PTE TTK	PTE TTK	Decagon	digitális
Botanikus	OMSZ szabvány meteorológiai állomás	2010	PTE TTK	PTE TTK	több gyártól	digitális (valós idejű) , manuális
Páfrány (Magyarürögi)	vízszint mérő	2014	Biokom, PTE TTK	PTE TTK	Dataqua	digitális
Bálics	vízszint mérő	2014	Biokom, PTE TTK	PTE TTK	Dataqua	digitális
Bórgyár	vízszint mérő	2013	Biokom, PTE TTK	PTE TTK	Dataqua	digitális
Tüskésrét	vízszint mérő	2013	Biokom, PTE TTK	PTE TTK	Dataqua	digitális
Mohácsi út	vízszint mérő	2014	Biokom, PTE TTK	PTE TTK	Dataqua	digitális

A nagy műszersűrűség ellenére hálózatunk adatsorai között jelentős eltérések mutatkoznak, és ennek talán az egyik legfőbb indoka a nagy intenzitású csapadékesemények egyre dominánsabb szerepe a havi vagy éves csapadék összegekben. Így a jövőben szükségessé válhat kutatási eredményeink revidiálása és az anyagi lehetőségekhez mérten egy még sűrűbb mérőhálózat létrehozása. Ehhez azonban szükség van egy előzetes távérzékelése módszerekkel történő felmérésre, valamint környezeti monitoring témájú projektek részvételében is. A PTE-n jelenleg futó Smart City projekt, amely lehetőséget teremt egy *online* előrejelzési rendszer kialakításra, azokat a tapasztalatokat használja fel, amelynek során 13 integrált meteorológiai állomás adatai kerülnek feldolgozásra.



113. ábra: Pécsi hidrológiai monitoring rendszer. (Szerkesztette: Ronczyk Levente)

Másfelől, az INARMA projekt folytatásában megcélazzuk egy olyan *online* előrejelző hidrometeorológiai mérőrendszer létrehozását a Dél-Dunántúlon, amely *real-time* adatokat szolgáltat a folyamatosan futó csapadék-lefolyás modellek számára. Kutatási eredményeink más jellegű gyakorlatban is felhasználhatók, mint pl. a Tettye Forrásházzal közösen működtetett monitoringhálózat adatait pl. a szennyvízátemeléseknél (szivattyúzás mértéke) is felhasználják Pécsen.

A fent említetteken kívül minden felhasználó részéről egyre növekvő az igény a hiteles adatokra és információkra, legyen szó vízügyi szakemberekről, katasztrófavédelemről, döntéshozókról vagy a helyi lakosságról. Számos lakossági fórumon, polgármesterekkel történő személyes találkozások alkalmával megbizonyosodtam ezekről az igényekről. Az összegyűjtött igényeket figyelembe véve már több éve tervezés alatt van egy numerikus modelleken és monitoring rendszeren alapuló *real-time* előrejelző rendszer kiépítése a Dél-Dunántúlon. Természetesen az egész terület mérőműszerekkel történő teljes ellátása megfelelő műszersűrűséggel elképzelhetetlen. Így elsősorban, és időben először néhány kitüntetett vízgyűjtő, vízfolyás mélyebb vizsgálatát, illetve ezekre a területekre történő mérőeszköz telepítést tűztük ki célul.

Végezetül, az új, minden eddiginél pontosabb és több változót figyelembe vevő árvízhozam számítási módszer kidolgozása más, ezen a területen zajló kutatás eredményeihez, sikerességéhez is hozzájárul. E kutatási projekt eredményeit kisebb módosításokat követően az ország más területeire, adatok rendelkezésre állása esetén akár külföldi területekre is alkalmazni lehet.

Abban a szerencsés helyzetben vagyok, az Országos Vízügyi Főigazgatóság dolgozójaként, hogy vízügyi ágazati szinten is van esélyem az eddigi kutatásaim továbbfejlesztésében, valamint számos ponton tudok kapcsolódni, a kisvízfolyásokat érintő fejlesztésekhez, projektekhez. A kutatási témámat pedig szeretném kiterjeszteni más magyarországi árvizek és különösen villámárvizek által veszélyeztetett területekre.

## 7. Köszönetnyilvánítás

Először és a legnagyobb köszönetet a témavezetőmnek, Dr. Czigány Szabolcsnak szeretnék mondani, akinél már a diplomadolgozatomat is készítettem. A közel tíz éves ismeretségünk alatt megszámlálhatatlan tudományos munkán kívül sok időt is töltöttünk együtt, ahol szinte mindig előkerült egy kis „szakma”, egy új megközelítési mód, ábrázolás vagy éppen alkalmazhatóság.

Másodsorban szeretnék köszönetet mondani Dr. Pirkhoffer Ervinnek, aki gyakorlatias nézőpontjával és a térinformatikai ismereteimben való elmélyülésben segítette a munkámat.

Egyetemi tanulmányaimat is a Pécsi Tudományegyetem végeztem, a Környezettudományi szakon, így már egyetemi hallgatóként szoros kapcsolatba kerültem a Földrajzi Intézettel és munkatársaival. Az egyetemi éveimből fakadó ismeretségem tovább mélyült, amikor megkezdtem a tanulmányaimat a Doktoriskolában. Doktoranduszként eltöltött éveim alatt több alkalommal is kaptam hasznos ismereteket, amelyeket továbbgondolva építettem be a disszertációmba. A teljesség igénye nélkül emelném ki azokat az oktatókat-kutatókat, akik segítettek a munkámat: Dr. Nagyvárad László, Dr. Gyenizse Péter, Dr. Ronczyk Levente, Dr. Lóczy Dénes és Dr. Dezső József. Ők voltak azok, akiktől bármikor és bármit kérdezhettem, mindig kellő szakmai jártassággal válaszoltak. Dr. Dezső Józsefet külön köszönet is megilleti, a szemcseeloszlási mérésekben való közreműködéséért. Külön köszönet érdemli korábbi doktorandusz kollégámat, Keresztény Balázst is.

Hálás köszönetemet szeretném kifejezni a Földtudományok Doktoriskola vezetőjének, Dr. Dövényi Zoltánnak, aki hasznos tanácsokkal látott el a disszertációm készítése során, valamint lelkiismeretesen és alaposan kijavította a szép számú helyesírási, megfogalmazási és stilisztikai hibáimat.

Köszönet illeti a Pécsi Tudományegyetem Földrajzi Doktoriskola jelenlegi koordinátorát is, Kovács Mónikát, illetve az őt megelőző Szalai Gábort is, a lelkiismeretes munkájukért, segítőkészségükért.

A Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság dolgozóinak, egykori kollégáimnak is köszönöm azt a végtelen sok hidrológiai, meteorológiai adatot, amit a rendelkezésemre bocsátottak. Horváth Gábor osztályvezető urat külön köszönet illeti (Vízrajzi és Adattári Osztály), továbbá az osztályon dolgozó, Pál Irina közreműködését szeretném név szerint megköszönni. Külön köszönet mindennapi munkájuknak, Németh Gábornak, Mosonyi Zoltánnak, Burián Alajos osztályvezető úrnak (Árvízvédelmi és Folyógazdálkodási Osztály)

és Schubert József osztályvezető úrnak (Vízvédelmi és Vízyűjtő-gazdálkodási Osztály), Csima Valériának és Cser Valéria osztályvezető-helyettesnek (Vízrendezési és Öntözési Osztály).

Az Országos Vízügyi Főigazgatóság Árvízvédelmi és Folyógazdálkodási Főosztály munkatársaként pedig további ismeretekkel gazdagodtam országos szinten is. Természetesen nem tudtuk volna önerőből beszerezni a disszertációm alapjait képező mérőeszközöket, szenzorokat (Decagon) és egyéb kiegészítő kutatásokat, ha nincs a Baross pályázat (Baross Gábor pályázat, REG\_DD\_KFI09/PTE\_TM09).

Továbbá, a gyűjtött adatok elemzéséhez szükséges informatikai, programozói fejlesztésekhez a TÁMOP (TÁMOP 4.2.2 C/“SROP-4.2.2.C-11/1/KONV-2012-0005” Jól-lét az információs) pályázat nyújtott segítséget. Ezen fejlesztés keretein belül a kapott eredményeim alapján parametrizálta az Innoteq Kft. az AGWA programot az ArcGIS alá. Köszönet az Innoteq dolgozójának, Fodor Gábornak a program fejlesztése és üzemeltetése során nyújtott közreműködését.

## 8. Irodalomjegyzék

- BABOS, Z. (1960): A Felső-Szinva vízgyűjtőjének vízrajza – Hidrológiai Közlöny 1960. 4.sz., Budapest
- BALATONYI, L., CZIGÁNY, SZ. és PIRKHOFFER, E. (2012a): Ultra-kisméretű vízgyűjtők monitoring alapú árvízi modellezése. Az elmélet és gyakorlat találkozása a térinformatikában III. - Térinformatikai konferencia és szakkiallítás. Konferencia helye, ideje: Debrecen, Magyarország, 2012.05.24-2012.05.25. Debrecen: Debreceni Egyetemi Kiadó, 2012. pp. 43-52. (ISBN:978-963-318-218-5)
- BALATONYI, L., CZIGÁNY, SZ. és PIRKHOFFER, E. (2012b): Impact of canopy cover on hydrometeorological parameters in a flash flood-affected watershed. Konferencia helye, ideje: Rotterdam, Hollandia, 2012.11.19-2012.11.23. London: CRC Press - Taylor and Francis Group, 2012. pp. 191-198. (ISBN:978-0-415-62144-1)
- BALATONYI, L., CZIGÁNY, SZ. és PIRKHOFFER, E. (2013a): Dél-dunántúlon található Bükkösd-víz felső vízgyűjtőjének villámárvízi veszélyeztetettsége. Szlávik Lajos, Kling Zoltán, Szigeti Edit (szerk.) XXXI. Országos Vándorgyűlés: Magyar Hidrológiai Társaság. Konferencia helye, ideje: Gödöllő, Magyarország, 2013.07.03-2013.07.05. Budapest: Magyar Hidrológiai Társaság, 2013. Paper CD. (ISBN:987-963-8172-31-0)
- BALATONYI, L., CZIGÁNY, SZ., PIRKHOFFER, E. és HEGEDÜS, P. (2013b): Árvízhozamszámítási módszerek összehasonlítása egy dunántúli kisvízgyűjtőn. Szlávik Lajos, Kling Zoltán, Szigeti Edit (szerk.) XXXI. Országos Vándorgyűlés: Magyar Hidrológiai Társaság. Konferencia helye, ideje: Gödöllő, Magyarország, 2013.07.03-2013.07.05. Budapest: Magyar Hidrológiai Társaság, 2013. Paper 4. szekció. (ISBN:987-963-8172-31-0)
- BARTHOLY, J., PONGRÁCZ, R. és GELYBÓ, GY. (2007): Regional climate change expected in Hungary for 2071-2100. Applied Ecology and Environmental Research, 5(1): 1-17
- BORBÉLY, S. (1980): Az 1878. évi miskolci „nagy árvíz” okai - Hidrológiai Közlöny 1980. 9.sz., Budapest
- BÖTKÖS, T. (2006): Precipitation trends in Pécs. Pollution and water resources (Columbia University Seminar proceedings), George J. Halasi-Kun editor Volume XXXVI 2004-2006) Sustainable Development in Central Europe Hungarian Academy of Sciences Centre for Regional Studies Transdanubian Research Institute Pécs, Hungary ISBN 963 9052 523
- BROCCA, L., TULLO, T., MELONE, F., MORAMARCO, T. és MORBIDELLI, R. (2012): Catchment scale soil moisture spatial-temporal variability, Journal of Hydrology, 422-423: 63-75.
- BROCCA, L., MORBIDELLI, R., MORAMARCO, T. és MELONE, F. (2007): Soil moisture spatial variability in experimental areas of central Italy. Journal of Hydrology, 333: 356-373.
- BROCCA, L., MORAMARCO, T., MELONE, F. és WAGNER, W. (2013): A new method for rainfall estimation through soil moisture observations.

- BUDAI, T. és KONRÁD, GY. (2011): Magyarország földtana, a Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Karának jegyzete, 2011
- BUZÁS, I. szerk. (1993): Talaj- és agrokémiai vizsgálati módszerkönyv 1. INDA 4231 Kiadó Budapest, 357p.
- CARPENTER, T.M., SPERFSLAGE, J.A., GEORGAKOS, K.P., SWEENEY, T. és FREAD, D.L. (1999): National threshold runoff estimation utilizing GIS is support of operational flash flood warning systems. *Journal of Hydrology*, 224:21-44.
- COBBY, D., FALCONER, R., FORBES, G., SMYTH, P., WIDGERY, N., ASTLE, G., DENT, J. és GOLDING, B. (2008): Potential warning services for groundwater and pluvial flooding. - In: Samuels, P., Huntington, S., Allsop, W. és Harrop, J. (szerk.): *Flood Risk Management: Research and Practice*. Taylor és Francis Group, London, ISBN 978-0-415-48507-4, pp. 1273-1280.
- COSH, M.H., JACKSON, T.J., BINDLISH, R. és PRUEGGER, J.H. (2004): Watershed scale temporal and spatial stability of soil moisture and its role in validating satellite estimates. *Remote Sensing of Environment*, 92:427-435.
- COSH, M.H., JACKSON, T.J., STARKS, P. és HEATHMAN, G. (2006): Temporal stability of surface soil moisture in the Little Washita River watershed and its applications in satellite soil moisture product validation. *Journal of Hydrology*, 323:168-177.
- CSERMÁK, B. (1985): Hegy és dombvidéki vízrendezés hidrológiai kérdései. *Vízügyi Műszaki Gazdasági Tájékoztató* 157. szám, *Vízügyi Dokumentációs Szolgáltató Leányvállalat* nyomdája, Budapest
- CZIGÁNY, SZ., PIRKHOFFER, E. és GERESDI, I. (2010): Impact of extreme rainfall and soil moisture on flash flood generation. *Időjárás*, 114: 79-100.
- CZIGÁNY, SZ. és PIRKHOFFER, E. (2013): Hidrológiai modellek tesztelése, kalibrálása és validálása. In.: Szatmári J. (szerk.): *Modellek a geoinformatikában*. [http://www.geo.u-szeged.hu/~joe/pub/Tamop/Jegyzet/Modellek\\_%20a\\_geoinformatikaban\\_tananyag.html](http://www.geo.u-szeged.hu/~joe/pub/Tamop/Jegyzet/Modellek_%20a_geoinformatikaban_tananyag.html) (utolsó letöltés: 2013.07.16.) Egyetemi jegyzet, SZTE, Szeged
- DAVIDSON, J.P., REED, W.E. és DAVID, P.M. (2002): *Exploring Earth II*. Kiadás Prentice Hall Upper Saddle River, NJ (Amerikai Egyesült államok)
- DELFS, I. (1955): Die Niederschlagzurckhaltung im Walde /Interzeption/. *Mitteilungen des Arbeitskreises "Wald und Wasser"*, Nr.2. Koblenz: 54p
- DINGMAN, S. L. (2001): *Physical Hydrology* (2nd edition), Prentice Hall, 646p
- DIRECTIV (2007)/60/EC of The European Parliament and of The Council of 23 October 2007 on assessment and management of flood risks
- DÖVÉNYI, Z. (szerk.) (2010): Magyarország kistájainak katasztere. MTA Földrajztudományi Kutatóintézet, Budapest, pp. 488-530.

- EC, JRC, ESDAC (2005): Soil Atlas of Europe. Az oldal forrása: <http://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/soil-atlas-europe>
- EEA, JRC és WHO (2008): Impacts of Europe's changing climate – 2008 indicator-based assessment, European Environment Agency, Copenhagen, 2008. ISBN 978-92-9167-372-8, DOI 10.2800/48117
- ESZÉKY, O. (1987): A Bükkösdi-víz felső vízgyűjtőjén tervezhető árvízcsúcs csökkentő tározók hidrológiai tanulmányterve. (Hydrological analysis of the proposed flood mitigation pool in the upper-catchment of the Bükkösdi-víz) – Kézirat, Pécs
- ESZÉKY, O. (1992): A Bükkösdi-víz vízhozamnyilvántartó állomásainak felülvizsgálata. (Overview of the stream gages in the watershed of the Bükkösdi-víz)– Kézirat, Pécs
- FAO (2015): World reference base for soil resources 2014 International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps, Update 2015 World Soil Resources Reports, ISSN 0532-0488. Az oldal forrása: <http://www.fao.org/3/a-i3794e.pdf>
- FÜHRER, E. (1981): Az erdők szerepe a hóolvadás és a vízfolyás késleltetésében. Erdő és Víz, VEAB kiadvány, Veszprém. 63-74
- FÜHRER, E. (1992): Intercepció meghatározása bükk, kocsánytalan tölgy és lucfenyő erdőben. Vízügyi közlemények, LXXIV. (3. füzet): pp. 281-294.
- FÜHRER, E. (1994): Csapadékmérések bükkös-, kocsánytalan tölgyes és lucfenyves ökoszisztémában. Erdészeti Kutatások, 84: 11-35
- GÁCSI, ZS. (2000): A talajvízszint észlelés, mint hagyományos, s a vízforgalmi modellezés, mint új módszer alföldi erdeink vízháztartásának vizsgálatában, Doktori értekezés, NyME, Sopron.
- GÁLOS, B., LORENCZ, PH. és JACOB, D. (2007): Will dry events occur more often in Hungary in the future? Environmental Research Letters 2, 034006 (9pp) DOI: 10.1088/1748-9326/2/3/034006
- GASH, J. H. C. és MORTON, A. J. (1978): An application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford Forest, *Journal of Hydrology*, 38: pp. 49-58.
- GASH, J. H. C., WRIGHT, I. R. és LLOYD, C. R. (1980): Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain, *J. Hydrol.*, 48, 89–105, 1980. Johnson
- GAUME, E., BAIN, V., BERNARDARA, P., NEWINGER, O., BARBUC, M., BATEMAN, A., BLÁŠKOVIČOVÁ, L., BLÖSCHL, G., BORGA, M., DUMITRESCU, A., DALIAKOPOULOS, I., GARCIA, J., IRIMESCU, A., KOHNOVA, S., KOUTROULIS A., MARCHI, L., MATREATA, S., MEDINA, V., PRECISO, E., SEMPERE-TORRES, D., STANCALIE, G., SZOLGAY, J. TSANIS, I., VELASCO, D. és VIGLIONE, A. (2009): A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*, 367: 70-78.
- GEORGAKAKOS, K.P. (2006): Analytical results for operational flash flood guidance. *Bulletin American Meteorological Society*, 317:81-103



- GEORGAKAKOS, K.P. (1986): On the design of national, real-time warning systems with capability for site specific flash flood forecasts. *Bulletin American Meteorological Society*, 67: 1233–1239.
- GEORGAKAKOS, K.P. (1987): Real-time flash flood prediction. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 92, No. D8, 9615-9629.
- GEORGAKAKOS, K.P. (2002): Hydrometeorological models for real time rainfall–flow forecasting. In(eds.): Singh V.P.–D. Frevert: *Mathematical models of small watershed hydrology–applications* p. 509-655. ISBN 1-887201-35-1
- GEORGAKAKOS, K.P. (2006). Analytical results for operational flash flood guidance. *Bulletin American Meteorological Society* 317, 81-103.
- GEORGAKAKOS, K.P. és HUDLOW, M.D. (1984). Quantitative precipitation forecast techniques for use in hydrologic forecasting. *Bulletin American Meteorological Society*, Vol. 65, 1186-1200.
- GERESDI, I. (1999): Zivatarok előrejelzése és radarképek automatikus feldolgozása. (Nowcasting of thunderstorms and automated analysis of radar images) – Országos Meteorológiai Szolgálat, Nowcasting Project, Project Report, pp. 1-7.
- GRIBOVSZKI, Z.; KALICZ, P. és KUCSARA, M. (2012): *Víztan*. Kézirat, Sopron, Oktatási segédlet. 112
- GRUNTFEST, E. (1977): What People Did during the Big Thompson Flood. – Working Paper No. 32, Natural Hazards Research–applications Information Center, Boulder, CO.
- GRUNTFEST, E. (1987): What We Have Learned since the Big Thompson Flood. - Proceedings of the Tenth Anniversary Conference, 17-19 July 1986, Special Publication NO. 16. Natural Hazards Research–applications Information Center, Boulder, CO.
- GRUNTFEST, E. és RIPPS, A. (2000): Flash floods: Warning, mitigation, efforts and prospects. In: Parker, D.J. (szerk.): *Floods*. Vol. 1. Routledge, London, pp. 377-390.
- GYENIZSE, P. és VASS, P. (1998): A természeti környezet szerepe a Nyugat-Mecsek településeinek kialakulásában és fejlődésében. *Földr. Ért.* XLVII. évf. 2. füzet, pp. 131-148.
- GYENIZSE, P., (2009): Geoinformatikai vizsgálatok Pécssett. Pécs településfejlődésére ható természeti és társadalmi hatások vizsgálata geoinformatikai módszerekkel (esettanulmány). *Geographia Pannonica Nova* sorozat, Pécsi Tudományegyetem Földrajzi Intézet, Pécs, 109 p.
- HAJNAL, G. és KORIS, K. (2014): *Hidrológia I. Fizikai Hidrológia*. BME VVT, Budapest, első kiadás.

- HEAL, K., V., STIDSON, R., T., DICKEY, C., A., CAPE, J., N. és HEAL, M., R. (2004): New data for water losses from mature Sitka spruce plantations in temperate upland catchments, *Hydrological Sciences*, 49 (3) June, pp. 477-493.
- HEATHMAN, G.C., COSH, M.H., MERWADE, V. és HAN, E. (2012): Multi-scale temporal stability analysis of surface and subsurface within the Upper Cedar Creek Watershed, Indiana. *Catena*, 95:91-103.
- HERBST, M., ROBERTS, J.M., ROSIER, P.T.W., TAYLOR, M.E. és GOWING, D.J. (2007) Edge effects and forest water use: a field study in a mixed deciduous woodland. *For Ecol Manag* 250:176–186
- HEWLETT, J. D. (1982): *Principles of forest hydrology*, The University of Georgia Press, Athens.
- HOITSY, P. (1878): Beszámoló az 1878.VIII. 31-i miskolci árvízi elöntésről, (Vasárnapi Újság. 1878/38.szám.)
- HORTON, R. E. (1919): Rainfall interception. *Monthly Weather Review*, 47: pp. 603-623.
- HORVÁTH, Á. (2005): A 2005. április 18.-i mátrakeresztesi árvíz meteorológiai háttere (The meteorological background of the April 18, 2005 flood in Mátrakeresztes. – *Léggör* 50: 6-9.
- HUTCHINGS, N.J., MILNE, R. és CROWTHER, J.M. (1988): Canopy storage capacity and its vertical distribution in a Sitka spruce canopy. *Journal of Hydrology*. 104, 161-171.
- IPCC (2007): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC*. (S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller, szerk.) Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, UK és New York, NY. 1996.
- IPCC (2011): *Summary for Policymakers. In: Intergovernmental Panel on Climate Change Special Report on Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation* [Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 30p.
- JUSTYÁK, J. (1989): Tölgyerdő és szőlőültetvény csapadékintercepciójának vizsgálata. *Léggör*, (34. évf.) 2. sz. pp. 9-13.
- JÁRÓ, Z. (1980): Intercepció a Gödöllői kultúrerdei ökoszisztémában. *Erdészeti Kutatások*, 73. pp. 7-17.
- KEIM, D.A., MANSMANN, F. és SCHNEIDEWIND, J. és ZIEGLER, H. (2006): Visual Data Analysis, *Proceedings of Information Visualization (IV 2006)*, IEEE, p. 9-16.

- KERLE, N. és ALKEMA, D. (2012): Multiscale flood risk assessment in urban areas – a geoinformatics approach. In.: Richter, M., Weiland, U. (szerk.): Applied Urban Ecology: A Global Framework. Wiley-Blackwell, Chichester, UK, pp. 93-105.
- KLAASSEN, W., BOSVELD, F. és de WATER E. (1998): Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception, *Journal of Hydrology* 212–213 (1998) 36–50
- KOLOSZÁR, J. (1980): Természetes erdei ökoszisztémák és a csapadék. in. Erdő és víz, Munkaértekezlet, EFE, Sopron.
- KONRÁD, GY., SEBE, K., HALÁZS, A. ÉS HALMAI, Á. (2010) A Délkelet-Dunántúl földtani fejlődéstörténete – recens analógiák, *Földrajzi Közleményekben* (2010. 134. 3. pp. 251-265.)
- KONTUR, I., KORIS, K. és WINTER, J. (2001): Hidrológiai számítások. Linograf Kft. Gödöllő.
- KORIS, K. (2014): Hidrológia jegyzet II. BME Építőmérnöki Kar, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, egyetemi jegyzet (57-79. oldal)
- KUCSARA, M. és VIG, P. (1995): Egy bükkös vízháztartása. In.: Berényi Dénes Professor születésének 95. évfordulója tiszteletére rendezett tudományos emlékülés előadásai, Debrecen.
- KUCSARA, M. (1996): Csapadék és lefolyás erdészeti kisvízgyűjtőn. Doktori értekezés, Sopron.
- KUCSARA, M. (1998): Az erdő csapadékviszonyainak vizsgálata, *Vízügyi Közlemények*, 3. füzet: 456-475
- LEE, R. (1980): *Forest Hydrology*. Columbia University Press, New York.
- LINK, E.T., UNSWORTH, M. és MARKS, D. (2004): The dynamics of rainfall interception by a seasonal temperate rainforest. *Agric. For. Met.*, 124:171-191.
- LINSLEY, R. K., KOHLER, M. A. és PAULHUS, J. L. (1949): *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Co., New York, 689. p.
- LOVÁSZ, GY. és WEIN, GY. (1974): Délkelet-Dunántúl geológiája és felszínfejlődése. Baranya Megyei Levéltár, Pécs, 225 p.
- MAGYAR, E. (2013): Szélsőséges Hidrometeorológia események vizsgálata a települési vízgazdálkodás szempontjából Pécs példáján (szakdolgozat PTE).
- MAJOR, P. (1993): A Nagy-Alföld talajvízháztartása, *Hidrológia Közöny*, 73 (1): 40–43.
- MAJOR, P. (2002): Síkvidéki erdők hatása a vízháztartásra, *Hidrológiai Közöny*, 82 (6): 319–323
- MANNINGER, M. (2007): Erdő és elfolyás, vízhozammérések a Mátrában, *Erdő és Klíma V.*: 341-349

- MARCHI, L., BORGA, M., PRECISO, E. és GAUME, E. (2010): Characterization of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management. *Journal of Hydrology*, 394:118-133.
- MERRIAM, R. A.(1960): "A note on the interception loss equation." *J. Geophys. Res.*, 65(11): 3850-3851.
- MÓRICZ, N., GÁLOS, B. és GRIBOVSKI Z. (2009): Az erdők mérési és modellezési lehetőségei. *Hidrológiai Közlöny*, 89. évf. 4. sz. pp. 35-46.
- PIRKHOFFER, E., CZIGÁNY, S. és GERESDI, I. (2008): Rapid screening of flash flood impacted areas in Hungary. In.: Montani, A., Alberoni, P.P., Rossa, A., Rotach, M.W., Buzzi, A., Davolio, S. (szerk.): *Proceedings of the Joint MAP D-PHASE Scientific Meeting – COST 731 mid-term seminar*. Bologna, pp. 139-145.
- PIRKHOFFER, E., CZIGÁNY, S. & GERESDI, I. (2009): Impact of rainfall pattern on the occurrence of flash floods in Hungary. *Z. Geomorph. N.F.*, 53:139-157.
- PRICE, E. G. és MOSES, C. (2003): Measurement and modelling of growing-season canopy water fluxes in a mature mixed deciduous forest stand, southern Ontario, Canada, *Agricultural and Forest Meteorology* 119 (2003) 69–85
- RÉTHLY, A. (1998): *Időjárási események és elemi csapások Magyarországon 1801-1900-ig.* - Országos Meteorológiai Szolgálat; Budapest, 1998
- RONCZYK, L. és CZIGÁNY, SZ. (2013): Urban geomorphological process in Pécs, Southwest-Hungary, Triggered by Extreme Weather in May and June 2010. In.: Lóczy D. (szerk.): *Geomorphological impacts of extreme weather: Case studies from Central and Eastern Europe*. Springer, Netherlands, pp. 347-360.
- RONCZYK, L., CZIGÁNY, SZ., BALATONYI, L. és KRISTON, A. (2012): Effects of excess urban runoff on waste water flow in Pécs, Hungary. *Riscuri și Catastrofe*, 11:144-159.
- ROSENQVIST, L., HANSEN, K., VESTERDAL, L. és VAN DER SALM, C.(2010): Water balance in afforestation chronosequences of common oak and Norway spruce on former arable land in Denmark and southern Sweden, *Agricultural and Forest Meteorology* 150 (2010) 196–207
- ROWE, L. K.(1989): Rainfall interception by an evergreen beech forest Nelson, New Zealand, *J. Hydrol.*, 66, 143–158, 1983.Nizinski and Saugier.
- ROWE, L.K. (1983): Rainfall interception by an evergreen beech forest, Nelson, New Zealand. *Journal of Hydrology*, 66: pp. 143-158. 116
- RUTTER, A. J., KERSHWW, K. A., ROBINS, P. C. és MORTON, A. J.(1971): A predictive model of rainfall interception in forests 1, derivation of the model from observations in a stand of Coriscan pine, *Agric. Meteorol.*, 9, 367–384.

- RUTTER, A.J., MORTON, A.J. és ROBINS, P.C. (1975): A predictive model of rainfall interception in forests II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands, *Journal of Applied Ecology*, 12: 367-380
- SCHMITTNER, K.E. és GIRESSE, P. (1996): Modelling–application of the geomorphic–environmental controls on flash flood flow. *Geomorphology*, 16:337-347.
- SENSEI, S., BOULGEAULT, P., CHEZE, J. L., COSENTINO, P. és THEPENIER, R.-K. (1996): „The Vaison-La-Romaine flash Flood: mesoscale analysis–predictability issues,” *Weather–Forecasting* 11, 4: 417-442.
- SHARIF, H.O., YATES, D., ROBERTS, R. és MUELLER, C. (2005): The Use of an automated nowcasting system to forecast flash floods in an urban watershed *Journal of Hydrometeorology*, 7: 190-202.
- SHUTTLEWORTH, W. J. (2012): *Terrestrial Hydrometeorology*, 1st ed., Wiley-Blackwell, West Sussex.
- SILVA, I. C. – OKUMURA, T. (1996): Troughfall, stemflow and interception loss in a mixed white oak forest. *Journal of Forest Research*, vol. 1. Nr. 3. pp. 123-129.
- SIMONFFY., Z. (1978): Intercepció vizsgálatok. Helyzetfelmérő tanulmány, VITUKI, Bp. No.7631(1)21
- ŠIMŮNEK, J. és GENUCHTEN, M.N.T.V. (2008): Modeling Nonequilibrium Flow and Transport Processes Using HYDRUS. 7. kiadás, No. 2, May 2008, [www.vadosezonejournal.org](http://www.vadosezonejournal.org)
- SITKEY, J. (1989): A szárazkeszői kocsánytalan tölgygel borított kisvízgyűjtő vízforgalma. *Erdészeti Kutatások*, 80-81: 276
- STAELENS, J., SCHRIJVER, A. D., VERHEYEN, K. és VERHOEST, N. E. C. (2008): Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology *Hydrological Processes*, vol. 22, Issue 1: pp. 33-45
- STELCZER, K. (2000): A vízkészlet-gazdálkodás hidrológiai alapjai. Elte Eötvös Kiadó, Budapest, 411 p.
- STORCK, P., LETTENMAIER, D. P. és BOLTON, S. M. (2002): Measurement of snow interception and canopy effects on snow accumulation and melt in a mountainous maritime climate, Oregon, United States. *Water Resources Research*, vol. 38. No. 11, 1223.
- SVETLITCHNYI, A.A., PLOTNITSKIY, S.V. és STEPOVAYA, O.Y. (2003): Spatial distribution of soil moisture content within catchments and its modelling on the basis of topographic data. *Journal of Hydrology*, 277: 50-60.
- SZÁSZ, G., T és TÖKEI, L. (1997): *Meteorológia, mezőgazdáknek, kertészeknek, erdészeknek*, Mezőgazda Kiadó, Budapest, 722p.

- SZILÁGYI, J. (1954): Az Átal-ér és a Váli-víz rendkívüli árvize 1953. június 9.-én. (Extreme flooding of the Átal-ér and the Váli víz on June 9, 1953). *Vizügyi Közlemények*, 36: 169-176.
- SZLÁVIK, L. és KLING, Z. (2007): Nagycsapadékok és helyi vízkárelhárítási események előfordulása hazánkban. (Occurrence of intense rainfall and hydrologic events in Hungary), MHT Országos Vándorgyűlés kiadványa, Budapest.
- THOMSON, D.J. (1997): Dependence of the global temperatures on atmospheric CO<sub>2</sub> and solar irradiance. Mathematics of Communications Research Department, Bell Laboratories, Murray Hill, NJ 07974. National Academy of Sciences 0027-8424/97/948370-8\$2.00/0
- TROMP-VAN MEERVELD, H.J. és MCDONNELL, J.J. (2006): On the interrelations between topography, soil depth, soil moisture, transpiration rates and species distribution at the hillslope scale. *Advances in Water Resources*, 29: 293-310.
- ÚJLAKI HANGOK, (2011. június): Kiadja az Újlaki Sarlós Boldogasszony Plébánia, 1023 Budapest, Bécsi út 32. Feleős szerkesztő: Dr. Beran Ferenc plébános, [www.ujlakitemplom.hu/pdf/201106-pdf](http://www.ujlakitemplom.hu/pdf/201106-pdf)
- ÚJVÁRI, F. (1980): A szárazkeszői és kishánai kísérleti vízgyűjtőterületek folyamatos vizsgálata, feldolgozása és értékelése. *VITUKI Közlemények* 28. Mezőgazdasági Vízgazdálkodási Kutatások Magyarországon, 50 p.
- VASS, P. (1997): Árvizek a Bükkösdi-patak felső szakaszán. in: Tésits, R. és Tóth J. (eds.): *Földrajzi tanulmányok a pécsi doktoriskolából I.* Bornus Nyomda, Pécs. P.261-285.
- VIG, P. (2000): Egy bükkös állomány vízháztartását befolyásoló tényezők évközi változásai, *Erdő és Klíma* III.: 132-141, Debrecen.
- VIG, P. (2002): A klimatikus változások hatásai egy középkorú bükkös vízháztartására. Doktori (PhD) értekezés, Debreceni Egyetem.
- VMS 113-1979: Hegy- és dombvidéki vízrendezés- Vízfolyásrendezés
- VMS 200/1 (1977A): Az esőből keletkező árhullámok jellemzőinek meghatározása. Általános ismertetés. OVH Budapest
- VMS 200/1-1977: Esőből keletkező árhullámok jellemzőinek meghatározása- Általános ismertetés
- VMS 200/2-1977: Az esőből keletkező árhullámok jellemzőinek meghatározása- A tetőző vízhozam becslése árvízi tényező alapján.
- VMS 200/3-1978: Az esőből keletkező árhullámok jellemzőinek meghatározása- A tetőző vízhozam számítása összegyűlekezési idő alapján.
- VMS 201/1-1977: Rövid idejű (10-180 perces) csapadékok meghatározása

YANG, B. és LI, M-H.B. (2011): Assessing planning approaches by watershed streamflow modeling: Case study of The Woodlands; Texas. *Landscape and Urban Planning* 99. 9–22

ZENG, N., SHUTTLEWORTH, J. W. és GASH, J. H. C. (2000): Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part I. Point analysis *Journal of Hydrology*, 228: pp. 228-241.

## 9. Mellékletek



Az Egyesült Államok ár- és belvízvédelméért szövetségi szinten, az *US Army Corps of Engineers* (USACE) a felelős, amelynek vezetője Thomas P. Bostick altábornagy. 2015. március 5-én abban a megtiszteltetésben részesültem, hogy az Egyesült Államok Szárazföldi Haderő műszaki csapatainak a parancsnokának és az amerikai delegációnak előadást tarthattam, a magyarországi árvízvédelmi rendszerről, illetve az elmúlt években, a kis és nagyvízgyűjtőkön kialakult árvizekről. Az USACE fejlesztette ki a HEC (Hydrologic Engineering Center) programcsaládot. A HEC 1965 óta foglalkozik hidrológiai, hidraulikai, tározó üzemirányítási, statisztikai és ökológiai modellek programozásával, amely programot én is több alkalommal használtam.





M1. táblázat A Bükkösi-víz (Hetvehely) esetében a leválogatott történelmi árvizei

Dátum (éééé.hh.nn hh:mm)	$Q_{\max}$ ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	Csapadékösszeg ( mm )	Mérőállomás helye	Talajnedvesség értéke
2005. 7. 12. 19:00	8,80	30,20	Bükkösd	magas
2010. 6. 1. 13:00	8,30	40,00	Bükkösd	magas
2010. 5. 16. 13:00	8,23	60,00	Bükkösd	magas
2013. 3. 30. 5:00	6,98	26,40	Bükkösd	magas
2000. 4. 5. 16:00	6,88	33,00	Bükkösd	közepes
2011. 6. 4. 15:00	6,72	14,00	Bükkösd	közepes
2010.06.21 23:00	6,39	21,70	Bükkösd	magas
2001.05.07 0:30	6,66	76,50	Bükkösd	közepes
2006.03.10 20:00	4,73	22,10	Bükkösd	közepes
2000. 4. 5. 15:30	6,88	33,70	Bükkösd	n/a
2001. 5. 7. 1:00	7,20	76,50	Bükkösd	n/a
2001. 9. 9. 15:00	4,73	29,00	Bükkösd	n/a
2004. 4. 14. 3:30	6,33	27,00	Bükkösd	n/a
2005. 3. 28. 8:00	4,02	18,40	Hetvehely-10 perces	magas
2005. 7. 2. 0:00	4,33	6,60	Hetvehely-10 perces	alacsony
2005. 7. 12. 19:00	8,80	12,90	Hetvehely-10 perces	közepes
2006. 1. 2. 18:00	4,62	9,30	Hetvehely-10 perces	magas
2006. 3. 10. 22:00	6,04	20,00	Hetvehely-10 perces	magas
2009. 7. 3. 0:00	4,44	14,40	Hetvehely-10 perces	alacsony
2010. 5. 16. 13:00	8,23	152,30	Hetvehely-10 perces	magas
2010. 6. 1. 13:00	8,30	57,57	Hetvehely-10 perces	magas
2010. 6. 2. 0:00	4,20	4,40	Hetvehely-10 perces	közepes
2011. 6. 4. 16:00	4,20	12,80	Hetvehely-10 perces	alacsony
2010. 6. 22. 0:00	6,58	40,00	Hetvehely-10 perces	magas
2011. 6. 4. 14:00	6,72	14,50	Hetvehely-10 perces	közepes
2012. 5. 22. 17:00	4,36	55,00	Hetvehely-10 perces	közepes
2013. 3. 30. 5:00	6,98	138,80	Hetvehely-10 perces	közepes
2013. 4. 2. 23:00	5,00	1,60	Hetvehely-10 perces	közepes
2013. 4. 3. 0:00	5,26	19,70	Hetvehely-10 perces	magas

M2. táblázat A Baranya-csatorna leválogatott történelmi árvizei. Minden esetben a legközelebbi (Csikóstóttós) meteorológiai adatlómás által gyűjtött csapadékadatok kerületek a feltüntetésre

Dátum (éééé.hh.nn hh:mm)	$Q_{\max}$ ( $m^3 s^{-1}$ )	Csapadék ( mm )	Talajnedvesség értéke
1996.9.2. 14:49	44,10	99,60	magas
1998.5.5. 4:57	49,50	63,90	alacsony
1998.8.25.12:51	30,00	97,60	magas
1998.11.15.23:54	33,70	23,10	magas
1999.2.23. 4:00	36,00	49,20	magas
1999.6.18. 6:00	33,80	34,70	magas
1999.6.23. 1:00	68,00	74,50	magas
1999.7.15. 7:00	31,50	10,20	magas
1999.12.4. 23:00	31,00	21,00	magas
2004.4.14. 8:00	41,40	51,30	magas
2004.6.3. 1:00	31,30	98,00	közepes
2005.8.5. 15:00	57,90	100,90	közepes
2006.1.2. 23:00	32,70	46,50	közepes
2006.3.11. 4:00	30,20	21,80	magas
2006.6.3. 5:00	37,00	44,00	n/a*
2010.5.17. 22:00	58,30	149,20	n/a*
2010.6.1. 23:00	42,80	93,50	n/a*
2010.6.22. 3:00	37,40	97,80	n/a*
2010.9.19. 20:00	35,90	83,70	n/a*
2013.3.30. 13:00	50,80	49,90	n/a*

\* nincs adat

M3. táblázat A Karasica-patak leválogatott történelmi árvizei. Minden esetben a legközelebbi (Kátoly) meteorológiai adatlómás által gyűjtött csapadékadatok kerületek a feltüntetésre.

Dátum (éééé.hh.nn hh:mm)	$Q_{\max}$ ( $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$ )	Csapadékösszeg ( mm )	Talajnedvesség értéke
2004.04.17 13:00	6,80	7,30	n/a
2013.04.03 22:00	9,67	52,40	n/a
2004.06.10 11:00	6,80	32,00	n/a
2004.06.03 0:00	9,40	66,00	n/a
2005.08.24 23:00	10,90	64,20	n/a
2010.05.18 20:00	18,40	89,90	n/a
2010.06.04 0:00	34,70	105,50	n/a
2010.06.24 1:00	11,70	61,70	n/a
2013.03.31 22:00	9,37	26,00	n/a
2013.04.08 14:00	6,45	40,00	n/a

\* nincs adat