



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar
Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

CSAPADÉK-LEFOLYÁS MODELLEZÉS A RINYA-PATAK VÍZGYŰJTŐJÉN

TDK Dolgozat

2022

KÉSZÍTETTE:

GAZDA FANNI

II. éves építőmérnök hallgató

KONZULENSEK:

NAGY ESZTER DÓRA

DR. FARKAS DÁVID

NÉGYESI KLAUDIA

DR. FARKAS-KARAY GYÖNGYI

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés	1
2. Célkitűzések	2
3. Irodalmi áttekintés	3
4. A vizsgált vízgyűjtő bemutatása	7
4.1 Helyszíni bejárás	9
5. Rendelkezésre álló adatok	15
6. Módszertan	17
6.1 Helyszíni mérések	17
6.2 Laboratóriumi mérések	20
6.3 Modell bemutatása	23
6.3.1 A veszteség módszerek	24
6.3.2 Felszíni összegyűlekezés számítása	25
6.3.3 Alaphozam	26
6.3.4 Mederbeli lefolyás	26
6.4 Kalibráció	27
6.4.1 Vizsgált események	27
6.4.2 A modell kalibrálása	28
7. Eredmények	29
7.1 Müntz-Lainé készülékkel való mérések	29
7.2 Laboratóriumi áteresztőképességi vizsgálat	31
7.3 Modellezés	32
7.3.1 Green & Ampt módszer	34
7.3.2 Kezdeti és konstans módszer	35
7.3.3 Görbeszám módszer	36
8. Konklúziók	37
9. Összefoglalás	43
Köszönetnyilvánítás	45
Felhasznált irodalom	46

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat A csapadékmérő állomások és az adatok időintervallumai	15
2. táblázat A Rinya vízfolyásain található felszíni állomások és az adatok időintervallumai .	16
3. táblázat Az események kezdő és vég időpontjai	27
4. táblázat A terepi és laboratóriumi mérések eredményei	32
5. táblázat Az események részvízgyűjtőnkénti kalibrálásának eredményei (NSE).....	33
6. táblázat Az NSE minősítések darabszáma a Green & Ampt módszer esetén	34
7. táblázat A Green & Ampt módszer eredményei a teljes vízgyűjtőre (NSE).....	34
8. táblázat A kezdeti és konstans módszer eredményei a teljes vízgyűjtőre (NSE).....	35
9. táblázat A görbeszám módszer eredményei a teljes vízgyűjtőre (NSE)	36
10. táblázat Az események tetőző vízhozamai az egyes részvízgyűjtőkön.....	41

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra A hidrológiai körfolyamat részei egy vízgyűjtő esetén (Hajnal és Koris, 2014)	3
2. ábra A vizsgált vízgyűjtő terület	7
3. ábra A vízgyűjtő agrotopológiai térképei (AGROTOPO)	8
4. ábra A vízgyűjtőre jellemző területhasználat (CORINE)	9
5. ábra A csapadékmérő állomások és a vízmércék helyei	16
6. ábra A mérési helyszínek	17
7. ábra A vízgyűjtőmodell felépítése.....	23
8. ábra A terepi mérésekből származó beszivárgási görbék.....	30
9. ábra A kezdeti vízhozam alá eső árhullámok példái	38
10. ábra A hirtelen elért tetőző vízhozamok vagy kisebb árhullámcsúcsok példái.....	38
11. ábra A második árhullámcsúcsok kialakulásának példái	39
12. ábra A görbeszám módszer esetén az árhullám nem megfelelő alakjának példája.....	39
13. ábra A csapadékadatok nem megfelelő eloszlása.....	42

KÉPJEGYZÉK

1. kép A rinyai 2020-as árvíz által álmósított vasúti híd (forrás: MÁV csoport honlapja)	6
2. kép A rinyai 2020-as árvíz során károsodott közúti híd (forrás: AtádHír)	6
3. kép A Segesdi-Rinya (bal felül 3/1., bal alul 3/2., jobb oldalt 3/3. kép).....	10
4. kép A Babócsai-Rinya felső szakasza	10
5. kép A Babócsai-Rinya felső szakaszán található halastó (1. és 2.) és az Ötvöskónyi és Beleg közti szakasz (3.)	11
6. kép A Nagyatád környéki szakasz eleje	11
7. kép Egy, a szakaszon található zsilip	11
8. kép A zsilip utáni erősen benőtt rész.....	12

9. kép A távolabbi, karbantartott rész	12
10. kép A nagyatádi vízmérce	12
11. kép Egy halastó kivezetése.....	12
12. kép Lössös partfal a vízfolyás mellett.....	12
13. kép Állatok csapásai a rézsűn.....	12
14. kép A Taranyi-Rinya torkolata a Babócsai-Rinyába.....	13
15. kép A háromfai vízmérce előtt található halastó kivezetése	13
16. kép A háromfai vízmérce	13
17. kép A babócsai vízmérce.....	14
18. kép A Lábodi-Rinya	14
19. kép A Lábodi-Rinyán látott zsilip	14
20. kép A GNSS RTK műszerrel való mérés folyamata.....	17
21. kép A Müntz-Lainé-féle beszivárgásmérő készülék	19
22. kép A belső gyűrű felső síkjának ellenőrzése	19
23. kép A talajminták	20
24. kép Változó nyomású laboratóriumi áteresztőképességi vizsgálatához használt készülékek	21
25. kép A tömörítéshez használt eszközök.....	21
26. kép Az áteresztőképességi vizsgálatához használt minták szárítás után.....	22
27. kép A maradék talajminták szárítás után.....	22

1. BEVEZETÉS

A Rinya-patak egy Somogy megyét keresztül szelő vízfolyás, mely számos települést érint, köztük szülővárosomat, Nagyatádot is. A hevesebb esőzések után gyakran megfigyelhető a Rinya vízszintjének jelentős emelkedése, az ártér elöntése. A globális felmelegedés hatására létrejövő szélsőséges események közé tartoznak az egyre gyakoribb villámárvizek a kisvízfolyásokon. Ilyen esemény volt a 2020-as villámárvíz a Rinyán, mely minden korábbi mért vízállást meghaladt. A levonuló árhullám jelentős károkat okozott Nagyatád közlekedési infrastruktúrájában: a 68-as főút közúti hídját elmosta, egy vasúti hidat pedig alámosott. A sérült szakaszon több, mint fél évbe telt a vasúti közlekedés helyreállítása. Ez az esemény motivált arra, hogy többek között árvíz előrejelzésre alkalmas csapadék-lefolyás modellt készítsen a Rinya vízgyűjtőjére. Tudomásom szerint ilyen korábban nem készült a területre. A modell elkészítését a HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System), egy ingyenesen letölthető szoftver segítségével végeztem el, melyet gyakran használnak csapadék-lefolyás modellezésre hazai és nemzetközi viszonylatban is. A szükséges csapadék és vízhozam adatok gyűjtése után a modell készítésekor különböző módszerek választhatók. A modellezés szempontjából különösen fontos a megfelelő veszteség módszer megválasztása, melyből számos opciót kínál a HEC-HMS szoftver. A hazai modellezési gyakorlatban nincs általánosan elfogadott eljárás a veszteség módszer megválasztására, ezért kutatási munkámban ezek közül három, szakirodalmi forrásokban gyakran idézett veszteség módszert hasonlítottam össze alkalmazhatósági szempontból, név szerint a Green & Ampt, kezdeti és konstans és SCS görbeszám módszereket. A modellezéshez szükséges talajfizikai és geometriai paraméterek egy része meghatározható terepi és laboratóriumi mérésekkel, illetve térképes adatbázis alapján. Mivel a mérésekből és adatbázisokból eltérő bemeneti adatokat származtak, így szándékomban állt annak megállapítása, hogy a vízgyűjtőre melyik szolgáltat pontosabb paramétereket. Az összehasonlító vizsgálatok – a veszteség módszerek és a különböző forrásból származó paraméterek esetén is – a hazai lefolyásmodellezési módszertan fejlesztése szempontjából hasznosnak bizonyulhatnak.

2. CÉLKITŰZÉSEK

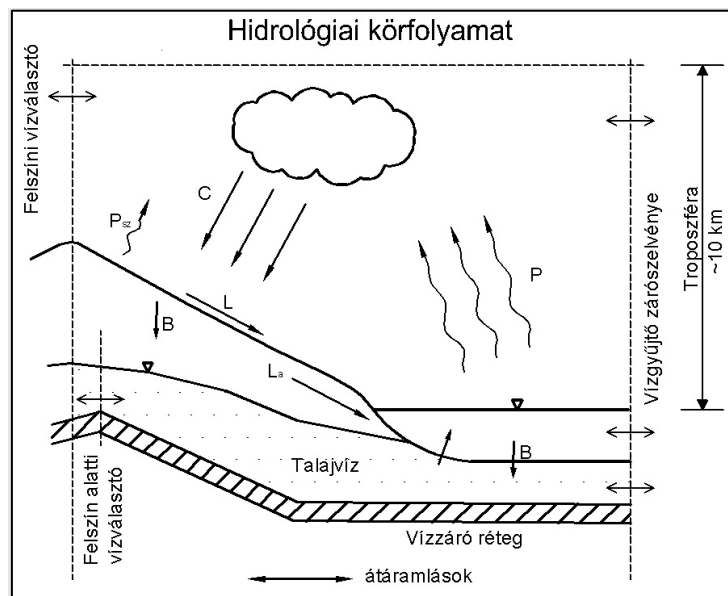
A kutatásom elsődleges célja, hogy a Rinya-patak mentén megelőzhetővé váljanak azok a jelentős károk, melyeket az egyre gyakrabban előforduló villámárvizek okozhatnak. Ennek a hosszútávú célnak az eléréséhez az alábbi vizsgálatok végrehajtását tűztem ki célul:

1. A csapadék-lefolyás modell felépítéséhez szükséges paraméterek meghatározása terepi és laboratóriumi mérések, valamint térképes adatállományok feldolgozása alapján. A terepi mérések előkészítésére helyszíni bejárás szükséges a terület alaposabb megismerése érdekében. A modellfuttatások eredményeiből következtetéseket kívánok levonni a különböző forrásokból származó talajfizikai paraméterek használhatóságáról.
2. A bemenő csapadékadatok használhatóságának vizsgálata. A modellben az Országos Meteorológiai Szolgálat által biztosított adattár 10 perces időbeli felbontású, állomási csapadékidősorait használtam, melyek 2021 óta elérhetők, azonban csapadék-lefolyás modellben való alkalmazásáról, minősítéséről nem található még publikáció.
3. A HEC-HMS szoftverben választható különböző veszteség módszerek (Green & Ampt, kezdeti és konstans, illetve SCS görbeszám) alkalmazhatóságának összehasonlító vizsgálata a Rinya-patak vízgyűjtőjére létrehozott modell kalibrálása alapján a patak teljes vízgyűjtőjére, illetve részvízgyűjtőire egyaránt. Végezetül saját megállapításaimat összehasonlítom a szakirodalomban fellelhető korábbi eredményekkel.

3. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

A Föld éghajlati rendszerét a légkör (atmoszféra), a vízburok (hidroszféra), a szárazföldek (litoszféra), a hó- és jégtakarók (krioszféra) és a biomassza (bioszféra) alkotják. Az éghajlati rendszer pillanatnyi állapota a külső tényezők és a rendszer belső tényezőinek változásának függvénye. Az éghajlati rendszer a nemlineáris rendszerek közé tartozik, vizsgálata általában bonyolult modellekkel történik (Faragó és társai, 1990).

A hidrológia körfolyamat az éghajlati rendszer központi eleme mind helyi, mind globális méreteket tekintve. A lejátszódásához szükséges energiát a napsugárzás biztosítja. A folyamatot egy jól lehatárolt térrészen belül értelmezzük (1. ábra), vízgyűjtő terület esetén a térrészt a vízgyűjtő határai, a troposzféra felső határa és a vízzáró réteg határolják. A hidrológiai körfolyamat főbb részei a vízfelület párolgása, csapadék és lefolyás, de részét képezik beszivárgás, a felszín alatti hozzáfolyás, a szárazföldi területeken végbemenő párolgás és a külső térrészekbe kijutó és onnan bejutó vízmennyiségek is (Hajnal és Koris, 2014). A dolgozatomban a felszíni lefolyás számításával foglalkoztam. A lefolyás a területet elhagyó víz mennyisége, melynek átlagát értelmezhetjük a maximális vízmennyiségként, mely a természetből hasznosítható (Dingman, 2015).



1. ábra A hidrológiai körfolyamat részei egy vízgyűjtő esetén (Hajnal és Koris, 2014)

A csapadékból származó lefolyás meghatározását a technikai fejlődésnek köszönhetően számos modellező szoftverrel is elvégezhetjük. A modellezés egyik gyakorlati haszna, hogy olyan adatok állíthatók elő vele, amelyek a mérési technikák korlátjain kívül esnek. Például sok esetben szükség lenne olyan helyen mért adatokra, ahol nincs vízhozammérő állomás, de az is

előfordul, hogy bár van állomás, az adatok időbeli felbontása nem megfelelő. Egy gyorsan levonuló árvíz esetén sűrűbben mért adatokra lehet szükség. Tehát a modellek térben és időben való extrapolációt tesznek lehetővé. Térbeli extrapoláció, ha egy folyón a vizsgálatnál távolabb lévő folyószakasz viselkedésére lehet következtetni, illetve időbeli, ha például árvíz előrejelzésekhez használjuk. A csapadéklefolyás-modellezés a gyakorlati haszna mellett lehet pusztán kutatási célú, a megbízható adatokkal való összehasonlítás segíthet a modell helyességének vizsgálatában (Beven, 2012).

A lefolyás modellezésének szükségessége manapság gyakran arra vezethető vissza, hogy a csapadékesemények jellege megváltozott, így ezekhez igazodó modellek szükségesek. Huntington (2006) megfigyelései alapján azt a következtetést vonta le, hogy a globális felmelegedés növeli a globális hidrológiai ciklus intenzitását. A felmelegedés növeli a párolgás és a csapadék mennyiségét, ez pedig a trópusi viharok és árvizek gyakoriságát és intenzitását növeli. Erre nem áll rendelkezésre elegendő bizonyíték, mivel a visszatérési idők nagyságrendje jelentős, így a változás csak sok év elteltével figyelhető meg. Ennél fogva szükségessé válik a hidrológiai rendszer változásából fakadó következmények megfigyelése és előrejelzése (Huntington, 2006).

Zema et al. (2016) kutatásuk során a HEC-HMS modell teljesítményét vizsgálták különböző veszteség módszereket (Green & Ampt, kezdeti és konstans, SCS görbeszám) alkalmazva. A lefolyt víztömeg és a tetőző vízhozam becslésének megbízhatóságát vizsgálták a Dél-Olaszországban található Mesima időszakos vízfolyás kifolyási szelvényében. Megfigyeléseik alapján a görbeszám módszerrel jó becsléseket kaptak a lefolyt víztömeg mennyiségére, míg a tetőző vízhozam becslése a kezdeti és konstans módszerrel volt pontosabb. A két utóbbi módszerrel kapott árhullámok alakilag nagyon hasonlóak voltak. A Green & Ampt módszer kevésbé bizonyult megbízhatónak, mindössze a tetőző vízhozam eléréséhez szükséges idő becslése volt megfelelő néhány esetben. A kutatás eredménye közvetlenül nem vonatkoztatható hazai vízgyűjtőkre, hiszen a klimatikus és morfológiai viszonyok igen eltérőek a két területen, ezért hasonló vizsgálat elvégzésére hazai viszonylatban is szükség lenne.

Schoener et al. (2019) a kezdeti víztartalom hatását mérték laboratóriumi és vízgyűjtő léptékben. A Green & Ampt, kezdeti és konstans, illetve görbeszám veszteség módszereket próbálták ki. A veszteség módszerek egyértelműen méretfüggőnek bizonyultak. Az egyszerűbb (egy vagy két paraméteres) veszteség módszerek jobban teljesítettek vízgyűjtő léptékben, mint a komplex (négy paraméteres) módszer. A laboratóriumi lépték esetén ennek ellenkezője

teljesült. Vízigyűjtő léptékben az összes módszer gyengén szerepelt kis árhullámok esetén, míg elfogadható eredményeket adtak a nagy vízhozamú eseményekre.

Kulkarni et al. (2022) kutatásuk során a legjobb veszteség, felszíni összegyűlekezés és mederbeli lefolyás számító módszer-kombinációt keresték az Indiában található Panchganga folyó vízigyűjtőjére készített eseményalapú modelljükhöz. A veszteség módszerek közül a Green & Ampt és SCS görbeszám módszereket vizsgálták. További két-két felszíni összegyűlekezés és mederbeli lefolyás számító módszerrel kombinálva összesen nyolc különböző modellt állítottak elő. A legjobb kombinációnak az SCS görbeszám veszteség módszert, Clark egységárhullámkép felszíni összegyűlekezés módszert és Muskingum-Cunge mederbeli lefolyás módszert találták.

Bezak et al. (2022) kutatásuk során öt veszteség módszer teljesítményét vizsgálták laboratóriumi kísérletekkel kapott adatok alapján. A laboratóriumi kísérleteket földcsuszamlás modellezésére alkalmas kismintamoddellel végezték, melyben homogén talajból különböző lejtésű részüket állítottak elő. Növényborítást nem alkalmaztak. A modell kalibrálása szükségesnek bizonyult. A kalibrált paraméterek eltérőek voltak a kezdetben megadott értékektől, melyeket irodalmi források alapján becsültek. Semelyik módszer nem bizonyult kiemelkedően jónak a többihez képest. Mivel az öt módszer eredményei között nem találtak számottevő különbséget, ezért homogén talajú területek esetén több veszteség módszer alkalmazását, tesztelését ajánlották.

A Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszéken 2012 óta foglalkoznak csapadék-lefolyás modellezéssel, melyhez leggyakrabban a HEC-HMS szoftvert használják. A kutatások gyümölcseként már számos TDK munka született, melyek általában különböző alkalmazhatósági vagy összehasonlító tanulmányokként igyekeznek hozzájárulni a hazai csapadék-lefolyás modellezési gyakorlat fejlesztéséhez (Széles, 2012; Nagy, 2014; Nagy, 2015; Nagy, 2016; Négyesi, 2019; Négyesi, 2020).

Az EU Soil Hydro Grid térképállományt korábban Négyesi (2019, 2020) és Veres (2021) használták modell paraméterezésére. A térképállomány adatai a kalibrált értékektől kis mértékben eltértek. Az adatbázis további vizsgálatra érdemes, értékei elsősorban nagyságrendi becslésre alkalmasak (Négyesi, 2019).

A Müntz-Lainé készülékkel végzett helyszíni mérésekkel támogatott modellezéssel Veres (2021) kezdett el foglalkozni. Nagyságrendi eltérést tapasztalt a mért és a modellben kalibrált értékek (és az EU Soil Hydro Grid értékei) között. Az eltérést mérési hibának tudta be és

javaslatokat tett a mérési eljárás fejlesztésére. A mérési időtartam növelését (minimum egy óra) és az oldalirányú szivárgás minimalizálása céljából a külső henger alaposabb nedvesen tartását javasolta (Veres, 2021).

A különböző csapadékidősorok vizsgálatával Négyesi (2019) foglalkozott TDK kutatása során. Az OMSZ részletes, 10 perces állomási mért idősorai 2021 óta elérhetők. Négyesi (2022) MSc diplomamunkája során használta ezeket az adatokat (a 2019-ben is vizsgált reanalízis idősorok mellett), azonban olyan modell még nem készült, ami kizárólag a részletes OMSZ adatokra hagyatkozik.



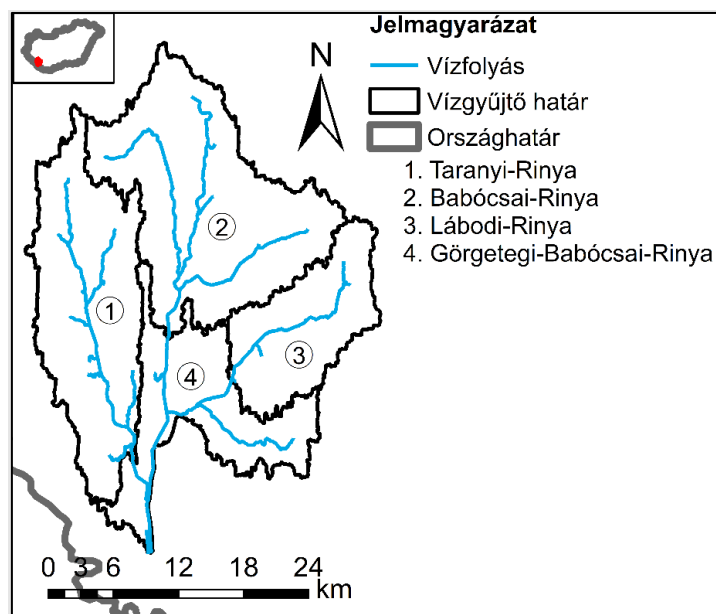
1. kép A rinyai 2020-as árvíz által alámosott vasúti híd (forrás: MÁV csoport honlapja)



2. kép A rinyai 2020-as árvíz során károsodott közúti híd (forrás: AtúdHír)

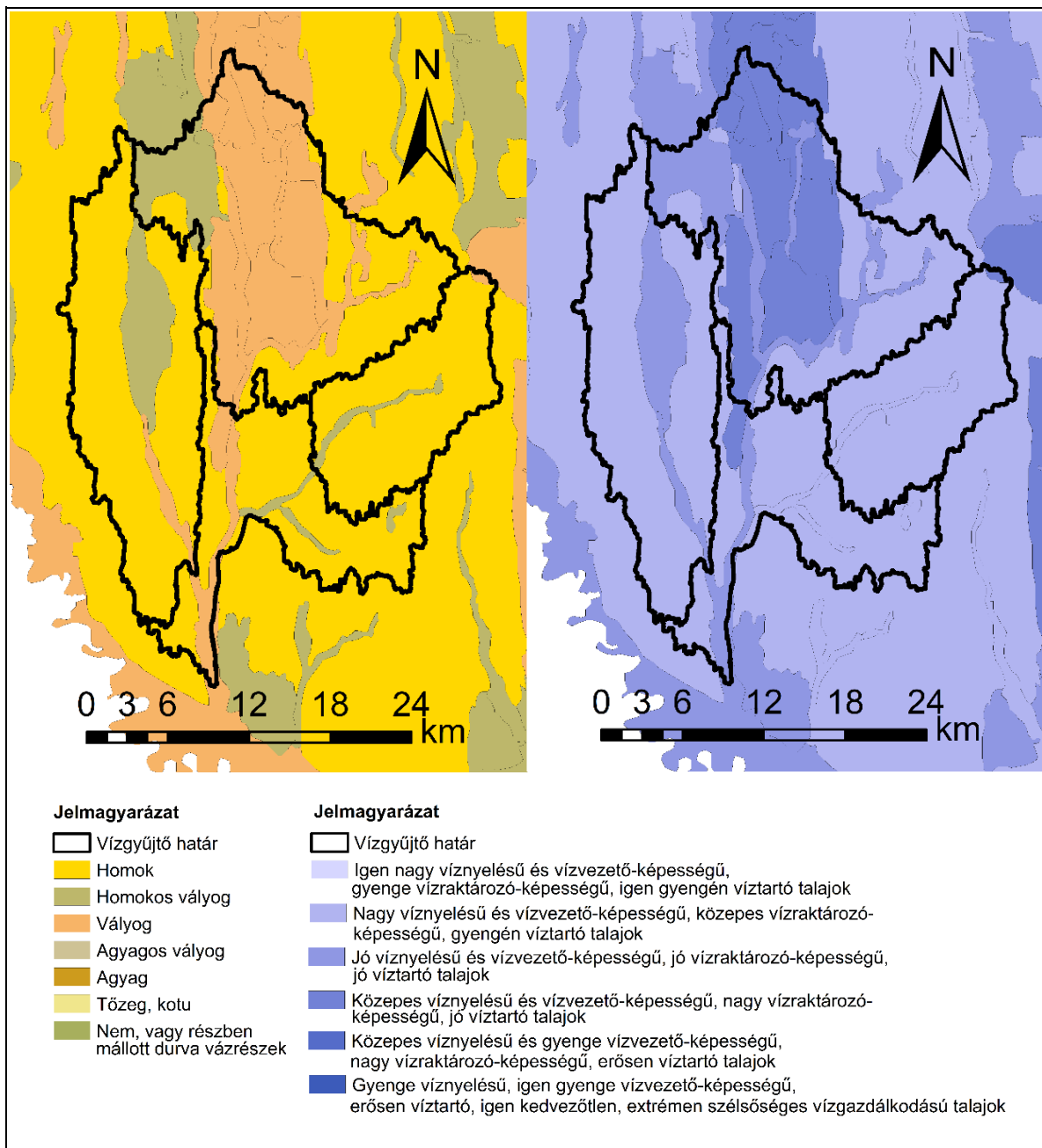
4. A VIZSGÁLT VÍZGYŰJTŐ BEMUTATÁSA

A terület Belső-Somogyban található, a Dráva vízgyűjtőjéhez tartozik. A Rinya vízrendszer (melynek részei a Babócsai-, Görgetegi-, Taranyi-, Lábodi-, Segesdi-, Beleg-Böhönyei- és Szabási-Rinya) területe 905 km², melyen dombvidéki és síkvidéki területek egyaránt jellemzők. Bár sok halastó van a vízgyűjtőn, a vízfolyás viszonylag bővízü, a Babócsai-Rinya éves középvízhozama a babócsai szelvényben 3,57 m³/s. Az éves csapadékmennyiség 600-800 mm. Ennek, az országos átlagnál több csapadéknak köszönhetően a vízjárás kiegyenlítettnek mondható (DDVIZIG, 2016).



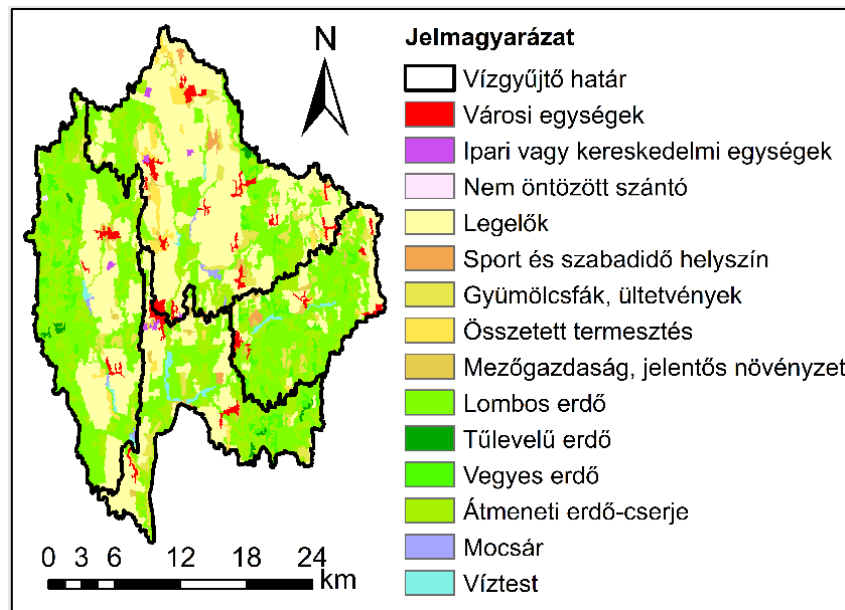
2. ábra A vizsgált vízgyűjtő terület

A terület régen az Ős-Duna medre volt, a medence süllyedése miatt az ekkori időkből lerakódott hordalék, kb. 5-10 m mélységben található meg, a terület e feletti rétege üledékkal feltöltött süllyedék (DDVIZIG, 2016), melynek nagy része homok vagy vályog (ATK TAKI, 2022). A vízgyűjtő talajának fizikai paraméterei a 3. ábrán láthatóak.



3. ábra A vízgyűjtő agrotopológiai térképei (AGROTOPO)

A területen elsősorban kisebb települések találhatók, nincsenek jelentős ipari központok, a leggyakoribb területhasználat az erdőgazdálkodás, de a mezőgazdálkodás, állattartás is jellemző (4. ábra).



4. ábra A vízgyűjtőre jellemző területhasználat (CORINE)

4.1 HELYSZÍNI BEJÁRÁS

A vízgyűjtő területtel egy háromnapos helyszíni bejárás keretein belül ismerkedtem meg. A terepi bejárás során a vízfolyás könnyebben hozzáférhető szakaszain haladtam végig. Itt felmértem a meder állapotát, a műtárgyak helyét, illetve mérésre alkalmas, jellemző szelvényeket kerestem. Ezekre július 2-án, 8-án és 9-én került sor, három részletben.

Az első alkalommal a Babócsai-Rinya felső szakaszát jártam be. Először a Segesdi-Rinya egy szakaszán mentem végig, a 67-es főút közúti hídjától kezdve a túrát. A műtárgy előtt, illetve után a meder erősen növényzettel borított, ez a patak többi részén is megfigyelhető (3/1. kép). A híd utáni szakaszon a mederben alig volt víz, a mederfenék feliszapolódott állapotot mutatott. A nagyvízi meder jól karbantartott, a bejárás előtt nemrég volt kaszálva, ez látható a képeken is. A vízfolyás mentén folyásirányban haladtam tovább. Az újabb közúti híd után a meder hirtelen, de rövid szakaszon kiszélesedett, innentől az erős növényzet és változó domborzati viszonyok miatt nem tudtam tovább haladni (3/2. kép). Az 3/3. képen látható a későbbi szakaszokon is megfigyelt löszös partfal.



3. kép A Segesdi-Rinya (bal felül 3/1., bal alul 3/2., jobb oldalt 3/3. kép)

A Babócsai-Rinya felső szakaszán folytattam a bejárást. Itt a mederben megjelenő erős növényzet mellett az erdős ártér is jellemző (4. kép). A részvízgyűjtőnek ezen a vízfolyásán található egy víztározó (halastó) is, mely egy kisebb (5/1. kép) és egy nagyobb (5/2. kép) medencéből áll. Az Ötvöskónyi és Beleg települések közt megfigyelhető szakasz medre szélesebb, növényborítottsága hasonló. A vízminőségbeli probléma talán ezen a részen a legszembetűnőbb (5/3. kép).



4. kép A Babócsai-Rinya felső szakasza



5. kép A Babócsai-Rinya felső szakaszán található halastó (1. és 2.) és az Ötvöskónyi és Beleg közti szakasz (3.)

A második napon a Babócsai-Rinya Nagyatád környéki szakaszán mentem végig. Erre a jól karbantartott meder és ártér (melyet feltehetőleg rendszeresen kaszálnak) a jellemző (6. kép). A városi területen kívül mindkét parton a kb. 6-10 m széles árteret erdős területek határolják. Ezen a szakaszon több műtárgy is található, köztük egy, a 7. képen látható zsilip. A bejárás ezen szakaszán lévő egyetlen zsilip utáni részen egy kis szakaszon a kisvízi meder erősen benőtt (8. kép), majd ismét jól karbantartott rész következik (9. kép). A 10. képen látható a nagyatádi vízmérce és vízrajzi állomás. A vízfolyás ezen részéről elmondható, hogy növényborítottság szempontjából változatos, mivel a várost érintő, gyakrabban látogatott részek gondozottabbak. A Nagyatád utáni szakaszon több víztározó, halastó kivezetése csatlakozik a patakhoz, egy ilyen látható a 11. képen. Megfigyelhető a löszös partfal (12. kép), helyenként állatok csapásai keresztezik a vízfolyást (13. kép).



6. kép A Nagyatád környéki szakasz eleje



7. kép Egy, a szakaszon található zsilip



8. kép *A zsilip utáni erősen benőtt rész*



9. kép *A távolabbi, karbantartott rész*



10. kép *A nagyatádi vízmérce*



11. kép *Egy halastó kivezetése*



12. kép *Löszös partfal a vízfolyás mellett*



13. kép *Állatok csapásai a rézsűn*

A harmadik alkalommal a háromfai és babócsai szakaszokat néztem meg. A 14. képen a Taranyi-Rinya és a Babócsai-Rinya találkozási pontja látható. Megfigyelhető, hogy a korábbiaknál jóval szélesebb a meder, mivel itt már az összes részvízgyűjtő vízfolyása csatlakozott a főághoz. A Taranyi-Rinyán lévő, Háromfa településhez közeli vízmérce egy víztározó után található (15 és 16. kép). A Babócsai-Rinya Babócsánál található vízmércéje a 17. képen látható. A bejárás idején a nulla osztás a víztükör felett volt. Ennek valószínűleg nem csak az aszály volt az oka, mivel az állomás vízállás adatainak körülbelül a harmada negatív érték.



14. kép A Taranyi-Rinya torkolata a Babócsai-Rinyába



15. kép A háromfai vízmérce előtt található halastó kivezetése



16. kép A háromfai vízmérce



17. kép A babócsai vízmérc

A Lábodi-Rinya nehezen megközelíthető volt, a részvízgyűjtők vízfolyásai közül ez volt a növényzettel legnagyobb mértékben borított, legkevésbé gondozott (18. kép). Ezen a szakaszon is található egy zsilip (19. kép). A Lábodi-Rinyán lévő vízmércét nem volt lehetőségem megnézni, mivel a koordinátákkal megadott pont nem volt megközelíthető.



18. kép A Lábodi-Rinya



19. kép A Lábodi-Rinyán látott zsilip

A helyszíni bejáráson megfigyelt állapotok szerint Henderson (1966) alapján az érdességi együttthatót 0,4 értékre vettem fel. Ez a kanyargó, néhol kiszélesedő és sekély szakaszokat tartalmazó természetes medrű vízfolyásokra jellemző intervallum felső határa. A paramétert a szezonális változások és a becslés esetleges pontatlansága miatt kalibráltam. Mivel a helyszíni bejáráson megállapítottam, hogy a meder szélessége részvízgyűjtőkön belül is változó, a meder szélességére mérések alapján egy-egy átlagos érték lett meghatározva.

5. RENDELKEZÉSRE ÁLLÓ ADATOK

A mért csapadékmagasság [mm] adatsorokat az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) honlapjáról elérhető nyílt adatszerverről (Meteorológia Adattár) töltöttem le. Itt egyperces mérési adatokból számított tízperces csapadékösszegek állnak rendelkezésre, Excel formátumban. A vízgyűjtő területén, illetve annak közelében a Babócsa, Csurgó, Homokszentgyörgy és Nemeskisfalud állomások találhatók. Az állomásokon mért adatok kezdete és vége az 1. táblázatban olvasható. Az adatokat MATLAB programban dolgoztam fel, alakítottam át megfelelő formátumúra. Kiemelném, hogy a tanszéki kutatások során ez az első alkalom, hogy az OMSZ adattár 10 perces állomási idősor adatait csapadék-lefolyás modellezésre használják és vizsgálják. Így elsősorban az adatok közvetlen modellezésre való alkalmazását szeretném tesztelni, melyet már a 2. fejezetben is említettem. A csapadékidősorok részletes elemzése, korrekciója, területi átlagolása javíthatná a modellezéssel kapott eredményeket, azonban a kutatás motivációja ettől eltérő.

1. táblázat A csapadékmérő állomások és az adatok időintervallumai

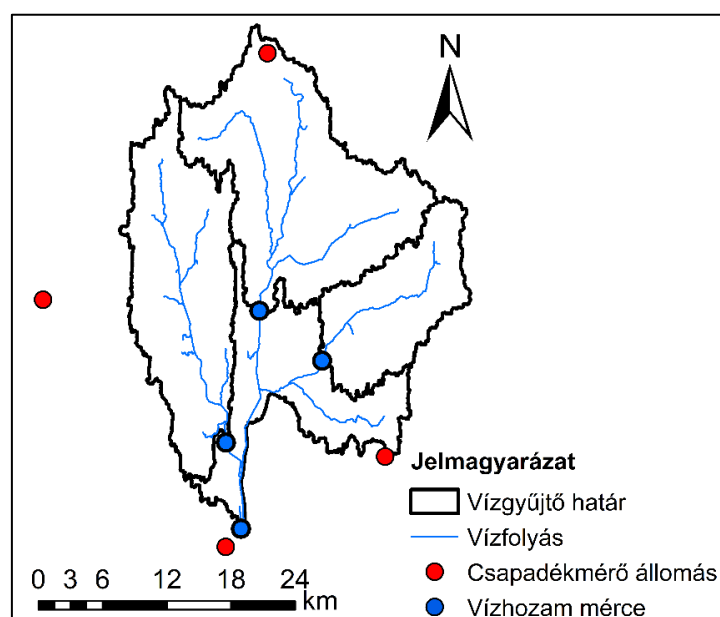
Állomás	Állomásszám	Idősor kezdete	Idősor vége
Babócsa	28609	2014.06.26	2021.12.31.
Csurgó	28104	2014.06.04	2021.12.31.
Homokszentgyörgy	28700	2002.01.01	2021.12.31.
Nemeskisfalud	27615	2002.01.01	2021.12.31.

A vízhozam [m^3/s] adatsorokat a Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság felszíni állomásain mért adatokból állítottam elő, szintén Excel formátumból. A Babócsa, Háromfa, Lábod és Nagyatád állomások találhatók a vízgyűjtő vízfolyásain. A mért adatok kezdő és vég időpontjai a 2. táblázatban olvashatóak. A mért adatok napi gyakorisága változó volt, a vizsgált időszak elején napi 6-7 db, majd idővel egyre több, a legújabb időszakra már néhány óránkénti adatokat szolgáltatottak. Az adatfeldolgozást a csapadékadatokhoz hasonlóan végeztem el, azzal a különbséggel, hogy itt a 10 perces időfelbontásra való áttérés érdekében két ismert vízhozam között lineáris interpolációval generáltam adatokat a köztes időszekekre. A Lábodi-Rinyán lévő vízmérce adatsorában 2017.08.05 00:00 és 2017.10.06 12:00 között, illetve 2019.12.31 16:00 és 2021.01.01 00:00 között, a Taranyi-Rinyán lévő vízmérce adatsorában 2020.08.25 07:00 és 2021.01.01 00:00 között nem állt rendelkezésre adat.

2. táblázat A Rinya vízfolyásain található felszíni állomások és az adatok időintervallumai

Állomás	Idősor kezdete	Idősor vége
Babócsa, Babócsai-Rinya	1961. 01. 01	2021.12.31
Háromfa, Taranyi-Rinya	1989.01.09	2021.12.31
Lábod, Lábodi-Rinya	2012.01.01	2021.06.30
Nagyatád, Babócsai-Rinya	1987.01.01	2021.12.31

A csapadékmérő állomások és a vízmércék elhelyezkedése az 5. ábrán látható.



5. ábra A csapadékmérő állomások és a vízmércék helyei

A területhasználat eloszlását a CORINE Land Cover adatbázis alapján állapítottuk meg (4. ábra). Ezt a területhasználati adatbázist műholdas adatok alapján állítják elő európai szinten és általában hat évente frissítik. A legutóbbi, 2018-as változatot használtuk a kutatásunk során (CORINE Land Cover). A szivárgási tényezőt adatbázis alapján is meghatároztuk, az EU Soil Hydro Grid letölthető térképállományait használva, amely szintén egy ingyenesen elérhető adatbázis (MTA ATK TAKI, 2022). A vízgyűjtő lehatárolást az ArcGIS térinfomatikai szoftvert használva végeztük el a szabadon hozzáférhető EU-DEM raszter terepmodellt használva (Nagy, 2015).

6. MÓDSZERTAN

A modell előállításához szükséges paramétereket terepi és laboratóriumi mérésekkel határoztam meg, ezeket mutatom be a következő két fejezetben. Ezt követően a használt szoftvert és a készített modellt, a modell felépítését és a kalibráció folyamatát ismertetem.

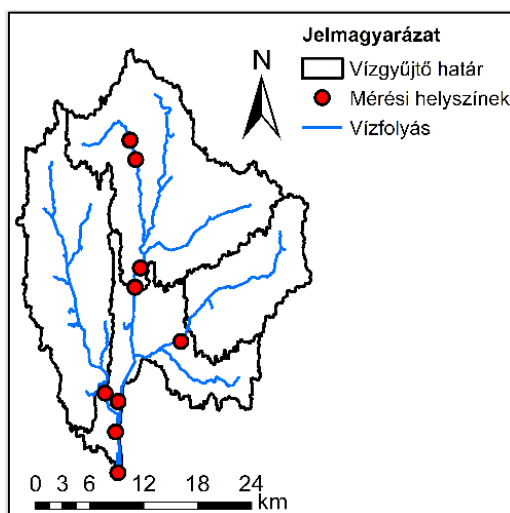
6.1 HELYSZÍNI MÉRÉSEK

A helyszíni mérésekre júliusban és augusztusban került sor. A Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék által biztosított GNSS RTK (Global Navigation Satellite System Real-Time Kinematic) és Müntz-Lainé beszivárgásmérő készülékekkel (Müntz et al., 1905) mértük a mederszelvények méreteit és a talaj paramétereit (szivárgási tényező, beszivárgás intenzitása).

A keresztaszelvény méretek méréseinek helyszínei a 6. ábrán találhatók, a mérés folyamata az 20. képen látható. A választott keresztaszelvényekben a vízmélységet, a víztükör szélességét, a rézsűhosszt, a hidak nyílásméretét és szerkezetének alsó síkját mértük meg.



20. kép A GNSS RTK műszerrel való mérés folyamata



6. ábra A mérési helyszínek

A Müntz-Lainé készülékkel való méréseket kétféle talajú (erdőtalan és pár éve ugar szántó, vályogos talaj) területen végeztük el, három-három helyen, a hibás adatok kiszűrésének érdekében. Az egy-egy talajféleségen végzett mérések egymáshoz közel, 3-5 méterre helyezkedtek el.

A készülék egy belső 10,5 cm átmérőjű és egy külső kb. 65 cm átmérőjű gyűrűből áll (21. kép). A belső gyűrűt 10-15 cm mélyre, a külső gyűrűt 1-5 cm mélyre leverjük úgy, hogy a belső henger éle vízszintes legyen (22. kép). A belső gyűrűre egy Eszéky Ottó-féle úszószelepes adagolót helyezünk, a gyűrű oldalához erősítve. Az úszószelepes adagoló egy mérőhengerrel van összekötve egy szivornya által. A mérőhenger vízzel való feltöltése után elindul a víz áramlása a rendszerben, a mérőhengerből távozó víz a talajba beszivárgó vizet pótolja. A menzúrában lévő vízszintet 5 percenként olvassuk le (Majer, 2019; Johnson, 1963). A külső hengerben állandó vízszintet tartunk (h_{kint}). A mérések során $h_{kint} = 0$ vízszintet tartottam, ezt úgy értem el, hogy az 5 perces (Δt) időintervallumokon belül kétszer, kb. két és fél percenként pótoltam a két gyűrű közt beszivárgó vizet. Egyes esetekben szükséges volt a menzúra utántöltése. A leolvasott vízszintek közti különbségekből (az esetleges utántöltést is figyelembe véve) kiszámolható a beszivárgó vízmennyiség (ΔV). Ezt az eltelt idővel elosztva kapjuk a beszivárgás intenzitását [m^3/s]. Egy mérést addig folytattam, amíg a három egymás utáni beszivárgási intenzitás közel azonosra nem adódott. E három érték átlagából ($\bar{v}$) lehetett számítani a fajlagos beszivárgási intenzitást (v_f) [m/s] a keresztmetszeti területet ($A = \frac{d^2\pi}{4}$) ismerve. A belső henger felső élétől a vízszint távolságát megmértük (h_1), így a belső henger teljes hosszát ($h_0 = 26$ cm) és a befogott rész hosszát (h_{bef}) ismerve a hidraulikus gradiens is számítható volt. Az állandósult fajlagos beszivárgási intenzitást a hidraulikus gradienssel elosztva kapjuk a szivárgási tényezőt.

A számítás lépései képletekkel:

$$\bar{v} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad [1]$$

$$v_f = \frac{\bar{v}}{A} \quad [2]$$

$$i = \frac{(h_0 - h_1 - h_{bef}) - h_{kint}}{h_{bef}} \quad [3]$$

$$k = \frac{v_f}{i} \quad [4]$$



21. kép A Müntz-Lainé-féle beszivárgásmérő készülék



22. kép A belső gyűrű felső síkjának ellenőrzése

6.2 LABORATÓRIUMI MÉRÉSEK

Változó nyomású laboratóriumi áteresztőképességi vizsgálat

A Müntz-Lainé készülékkel mért értékek ellenőrzésére változó nyomású áteresztőképességi vizsgálatot végeztünk 6 db talajmintán (23. kép). A talajmintákat a Müntz-Lainé készülékkel történt mérések helyszíneiről vettem. A méréseket a Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék Laboratóriumában végeztük el a 24. képen látható eszközökkel. A mintákat a kiszűrőhengerbe helyeztük, szükség esetén tömörítettük, majd a felső 3,5 cm-t eltávolítottuk. Ez után a mintákat telítettük, majd légmentesen lezártuk és a bűrettárat feltöltöttük vízzel. A bűrettárról fél percenként (szükség esetén 15 másodpercenként) leolvastuk az átszivárgó víz mennyiségét. A 25. képen a zavartalan minták kiszűréséhez használt szorítóhenger és kiszűrőhenger, illetve a zavart minták tömörítéséhez használt eszköz és egy tömörített talajminta látható (ISO 17892-11:2019).



23. kép A talajminták



24. kép Változó nyomású laboratóriumi áteresztőképességi vizsgálathoz használt készülékek



25. kép A tömörítéshez használt eszközök

A szivárgási tényezőt az alábbi képlettel számoltuk:

$$k = \frac{a \cdot l}{A \cdot \Delta t} \cdot \ln \frac{h_0}{h_1} \quad [5]$$

ahol:

- a [mm²] – a büréta átmérője,
- A [mm²] – a talajminta átmérője,
- l [mm] – a talajminta magassága,
- h_0 – a kezdeti vízszint a bürétában,
- h_1 – a Δt idő utáni vízszint a bürétában.

A laboratóriumi mérés során elkerülhetetlen bizonytalanságok miatt a kapott szivárgási tényezőt „fél nagyságrend” pontosságúnak kell tekinteni (Fellegi és társai, 2020).

Kezdeti és telített víztartalom

A kezdeti és telített víztartalmakat a változó nyomású laboratóriumi áteresztőképességi vizsgálatnál használt talajmintákon határoztuk meg (26. kép), mivel ezek térfogata ismert volt. Ugyan az áteresztőképességi vizsgálathoz nem használt maradék talajmintákra (27. kép) is meghatároztuk a víztartalmakat, ismert térfogat hiányában csak a tömegszázalékban megadott víztartalmak ellenőrzésére használtuk az eredményeket.

A minták nedves majd vízzel telített tömegét lemértük, a mintákat 105 °C-on 24 órán keresztül kiszárítottuk és az így kapott száraz tömeget (m_d) is lemérve számoltunk víztartalmakat, az alábbi képletekkel:

$$w_m = \frac{m - m_d}{m_d} \cdot 100(\%) \quad [6]$$

$$w_v = \frac{n_m \cdot m_d}{V_{teljes} \cdot \rho_v} \quad [7]$$

ahol:

- w_m [%] – a víztartalom tömegszázalékban,
- w_v [%] – a víztartalom térfogatszázalékban,
- m_d [g] – a minta száraz tömege,
- m [g] – a minta tömege nedves ill. telített állapotban,
- V_{teljes} [cm³] – a minta térfogata,
- ρ_v [$\frac{g}{cm^3}$] – a víz sűrűsége.

A modellben térfogatszázalékban kellett az értékeket megadni, ezért volt szükséges az átváltás.

Az eredményeket átlagolva a nedves víztartalom 32,8%, a telített víztartalom 57,1% lett.



26. kép Az áteresztőképességi vizsgálathoz használt minták szárítás után



27. kép A maradék talajminták szárítás után

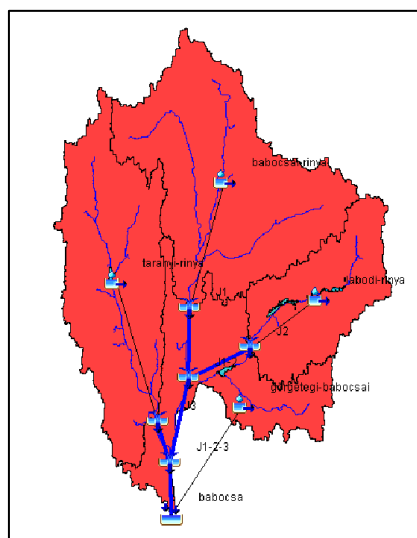
6.3 MODELL BEMUTATÁSA

A modellt HEC-HMS 4.9 (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) szoftverben készítettük el. A HEC-HMS amerikai fejlesztésű, világszerte alkalmazott csapadék-lefolyás modellező szoftver, melyet a vízgyűjtő rendszerek hidrológiai folyamatainak modellezése céljából hoztak létre. A szoftver több hagyományos hidrológiai számítást is tartalmaz, például a felszíni összegyülekezés számítható egységárhullámkép módszerrel. A szoftvert használva van lehetőség folyamatos futtatás végzésére is. Ebben az esetben a párolgást, a növények vízfelvételét, a hóolvadást és a talaj nedvességtartalom változását is figyelembe kell venni (Scharffenberg, 2016).

A kutatás során több modellt hoztunk létre, melyek csak az alkalmazott veszteség számítási módszerekben tértek el. Mindegyik modell összevont paraméterű, determinisztikus és esemény alapú.

A vízgyűjtőmodell

A vízgyűjtő négy részvízgyűjtőből áll: Babócsai-, Lábodi-, Taranyi- és Görgetegi-Babócsai-Rinya. A részvízgyűjtőket a mércék helye alapján határoltuk le úgy, hogy a részvízgyűjtők kifolyási szelvényeinél legyenek mért vízhozam adatok. A részvízgyűjtőket a kifolyási szelvényüknél lévő vízfolyásról neveztük el, így az északra található vízgyűjtő babócsai, a keleti lábodi, a nyugati taranyi, a déli görgetegi-babócsai részvízgyűjtő lett. A valóságban a kifolyási szelvényénél a Babócsai-Rinya található, azonban a részvízgyűjtő másik fontos vízfolyása a Görgetegi-Rinya, így ezzel az elnevezéssel megkülönböztethető az északi és déli részvízgyűjtő. A HEC-HMS szoftverben a vízgyűjtő felépítése az 7. ábrán látható.



7. ábra A vízgyűjtőmodell felépítése

A meteorológiai modell

A lehető legegyszerűbb meteorológiai modellt vettük fel, ami csak a csapadék idősorok megadását igényli. Ennek oka, hogy az események időtartama rövid, és a szabad vízfelszín nagysága kicsi, így a párolgás elhanyagolható volt. Mivel a modell eseményalapú, és a kiválasztott események fagymentes időszakokból származnak, így a hóolvadással sem kellett számolni.

A modellben lehatárolt részvízgyűjtőkhöz egy-egy, a területhez legközelebbi csapadékmérő állomás adata lett hozzárendelve. Ennek okát az 5. fejezetben mutattam be.

6.3.1 A VESZTESÉG MÓDSZEREK

A kutatás során három veszteség módszert használtam, a Green & Ampt, kezdeti és konstans (Initial and Constant), és az SCS görbeszám (Soil Conservation Service – Curve Number) módszert.

Green & Ampt módszer

A Green & Ampt beszivárgási módszer a talajokban lévő nempermanens vízmozgásokra vonatkozó Richards-egyenlet egyszerűsítése. A módszer feltételezi, hogy a talajban kezdetben mindenhol egységes víztartalom van és a beszivárgás csappantyú elmozdulás elvén történik. A szükséges paraméterek a kezdeti víztartalom [-], telített víztartalom [-], a talaj szívókapacitása (suction) [mm], szivárgási tényező [mm/h] és a beszivárgás nélküli területek aránya [%] (Scharffenberg, 2016).

A kezdeti víztartalom eseményről eseményre változik, ezért a laboratóriumban meghatározott víztartalmat kezdeti értéknek véve kalibráltam ezt a paramétert. A laboratóriumi mérések eredményeit a 7.2 fejezetben ismertetem.

A szívókapacitás a talaj fajtájától függ (Scharffenberg, 2016), a szivárgási tényező függvényében becsültem meg a HEC-HMS Technical Reference Manual (Feldman, 2000) 12. táblázata alapján, a megfelelő értékek közti interpolációval. Minél nagyobb a szivárgási tényező, annál kisebb a szívókapacitás értéke.

A beszivárgás nélküli területek a részvízgyűjtő azon részei, melyek közel vízzárónak tekinthetők. Ezekre nem számol a modell szivárgási veszteséget, mivel a részvízgyűjtők ezen területeire eső csapadék egésze a közvetlen lefolyás része lesz (Scharffenberg, 2016). Ezeket az arányokat a Copernicus műholdas térképek állományaiból határoztuk meg (Copernicus L.M.S., 2022).

Kezdeti és konstans módszer

A kezdeti és konstans egy egyszerű veszteség számítási módszer, de mégis hasznos az olyan vízgyűjtőkre, melyek talajfizikai paramétereiről kevés információval rendelkezünk. Három paramétere van, a kezdeti veszteség (initial loss) [mm], a beszivárgás intenzitása (constant rate) [mm/h] és a beszivárgás nélküli területek aránya [%] (Scharffenberg, 2016).

A kezdeti veszteség az a csapadékmennyiség, ami a vízgyűjtő területén beszivárog vagy tárolódik a felszíni lefolyás előtt. A csapadékmentes időszakokban ez nem áll vissza az eredeti értékre (Scharffenberg, 2016). Ez eseményenként változó érték lehet, ezért kalibrálása szükséges volt külön-külön minden eseményre.

A módszerben a beszivárgás intenzitása az esemény hosszától függetlenül állandó (Scharffenberg, 2016). Értékének a Müntz-Lainé készülékkel való mérésekkel kapott átlagos beszivárgási intenzitást vettem (7.1 fejezet).

SCS Görbeszám módszer

A Soil Conservation Service Curve Number (azaz görbeszám) módszert gyakran használják lefolyás számítására (Wang et al., 2017). Az egyszerű és jól bevált módszer három paramétert használ, a görbeszámot (curve number) [-], a kezdeti veszteséget (initial abstraction) [mm] és a beszivárgás nélküli területek arányát [%].

A módszer alapja a görbeszám, ami a vízgyűjtőre jellemző talajféleség, területhasználat, hidrológiai állapotok és kezdeti talajnedvesség függvénye (Wang et al., 2017). Értékét Wang et al. (2017) kutatása alapján számítottuk.

A módszer használatakor megadható egy kezdeti veszteség (initial abstraction), ami azt a csapadékmennyiséget jelenti, amelynek a felszíni lefolyás kezdete előtt le kell esnie ahhoz, hogy elinduljon a lefolyás (Scharffenberg, 2016). Mivel ez különböző eseményeknél változó, az eseményenként kalibrálandó paraméterek közé sorolható.

6.3.2 FELSZÍNI ÖSSZEGYÜLEKEZÉS SZÁMÍTÁSA

A felszíni összegyülekezést számító módszerek közül az SCS Unit Hydrograph-ot használtam. Ennek oka elsősorban az volt, hogy egy másik, hasonló témájú kutatással (Zema et al. (2016)) szerettem volna összevetni saját eredményeimet, így az ott is alkalmazott SCS Unit Hydrograph-ot választottam a jobb összehasonlíthatóság érdekében. A módszerhez a HEC-HMS szoftverben grafikon típust szükséges választani, illetve a késleltetési idő (lag time) értékeket kell meghatározni.

A grafikont az alapértelmezett standard típusként adtam meg, amíg a késleltetési idő (lag time) karakterisztikus értékeit a csapadék és vízhozam idősorok felhasználásával számítottuk (Nagy és társai, 2022).

6.3.3 ALAPHOZAM

A felszíni összegyülekezéshez hasonlóan, a Zema et al. (2016) által használt konstans havi (constant monthly) módszert használtam. Ehhez minden hónapra meg kell adni részvízgyűjtőnként az alapvízhozamot, melynek az események kezdő időpontjában mért vízhozamot vettem. Így az alaphozam eseményenként és részvízgyűjtőnként eltérő, de egy adott futtatás során konstans érték volt.

6.3.4 MEDERBELI LEFOLYÁS

A mederbeli lefolyásnál a kinematikus hullám módszert választottam, mivel elegendő mért vagy számított adat állt rendelkezésre, és a módszert használva már sikeresen kalibráltak és validáltak csapadék-lefolyás modellt, például Négyesi (2019) kutatása során.

A mederbeli lefolyás számításához szükséges adatok: a vízfolyás szakaszának hossza és a meder esése (térképállományok alapján számított adatok), a mederre jellemző érdességi együttható (helyszíni bejárás alapján becsült, de kalibrálandó), a meder alakja (trapéz) és szélessége (terepi bejárás alapján), a rézsú hajlása (1:2). Az utóbbi három, geometriát jellemző érték részvízgyűjtőkön belül is gyakran változik, ezért egy átlagos értékkel számoltam.

6.4 KALIBRÁCIÓ

6.4.1 VIZSGÁLT ESEMÉNYEK

A vizsgált eseményeket a már említett (6.3 fejezet) kritériumokat figyelembe véve választottam. Tehát az események májustól novemberig (mindössze kettő novemberi esemény van) tartó időszakból lettek kiválasztva, figyelve arra, hogy könnyebben modellezhető árhullám legyen (a 6.3 fejezetben említett okok miatt).

Az események kezdő és záró időpontjai a 3. táblázatban láthatók.

3. táblázat Az események kezdő és vég időpontjai

1	2010. szept. 4. 19:30	2010. okt. 16. 23:50
2	2015. máj. 19. 16:40	2015. jún. 9. 23:50
3	2015. okt. 6. 20:30	2015. nov. 11. 23:50
4	2016. júl. 7. 13:00	2016. júl. 26. 23:50
5	2016. aug. 15. 0:00	2016. szept. 2. 23:50
6	2017. szept. 14. 21:00	2017. okt. 2. 23:50
7	2018. máj. 10. 4:30	2018. máj. 23. 14:00
8	2018. jún. 12. 18:00	2018. jún. 27. 23:50
9	2018. aug. 31. 22:00	2018. szept. 17. 23:50
10	2019. máj. 3. 11:00	2019. máj. 27. 0:50
11	2019. máj. 27. 0:50	2019. jún. 8. 23:50
12	2020. jún. 14 0:00	2020. júl. 5. 23:50
13	2020. júl. 15. 0:00	2020. aug. 16. 23:50
14	2020. okt. 10. 21:40	2020. nov. 1. 23:50
15	2021. máj. 11. 12:00	2021. jún. 1. 23:50
16	2021. okt. 29. 12:00	2021. nov. 13. 18:00

Az események közül 11 db-ot választottunk ki kalibrációra (a 3. táblázatban vastag betűkkel szedve jelöltek), a maradék 5 db-ot a kutatás folytatásában validációra tervezem használni. A kalibrációs események közül vannak, melyeknél nem mindegyik vízhozam adat áll rendelkezésre. A lábodi adatok a 6., 13. és 14. eseménynél, a háromfai adatok a 14. eseménynél hiányoznak.

6.4.2 A MODELL KALIBRÁLÁSA

A modell kalibrálását a HEC-HMS szoftverbe beépített automatikus optimalizálásra alkalmas optimalizációs próbákat (optimization trial) használva végeztem el.

A modell által számított értékek és a mért értékek alapján előállított árhullámok közti különbség számszerűen célfüggvényekkel jellemezhető. Ennek értéke zérus, ha a kettő megegyezik. A célfüggvény minimuma akkor érhető el, ha a mért árhullámot legjobban leképező paraméter értékeket megtaláljuk. Az optimalizációs próbák iterációk segítségével érik el a célfüggvények minimumához tartozó optimális paraméter kombinációt. Ehhez a paraméterek kezdeti értékeit kell megadni, és a valótlan optimalizált értékek elkerülése végett minimum és maximum értékek adhatók minden paraméterhez. Az optimalizációs próba futtatásakor a program egy árhullámot számít az optimalizáció céljaként kiválasztott szelvényben. Ez után a paraméterek értékét a keresési módszer (search method) alapján megváltoztatja és újra számítja az árhullámot és a célfüggvényt. A folyamat addig ismétlődik, amíg a célfüggvény megfelelően kicsi lesz vagy elérjük a maximális iterációszámot (Scharffenberg, 2016). Mivel az optimalizáció eredménye bizonyos mértékben függ a kezdeti értéktől, több kezdeti értéket is kipróbáltam az egyes paramétereknél.

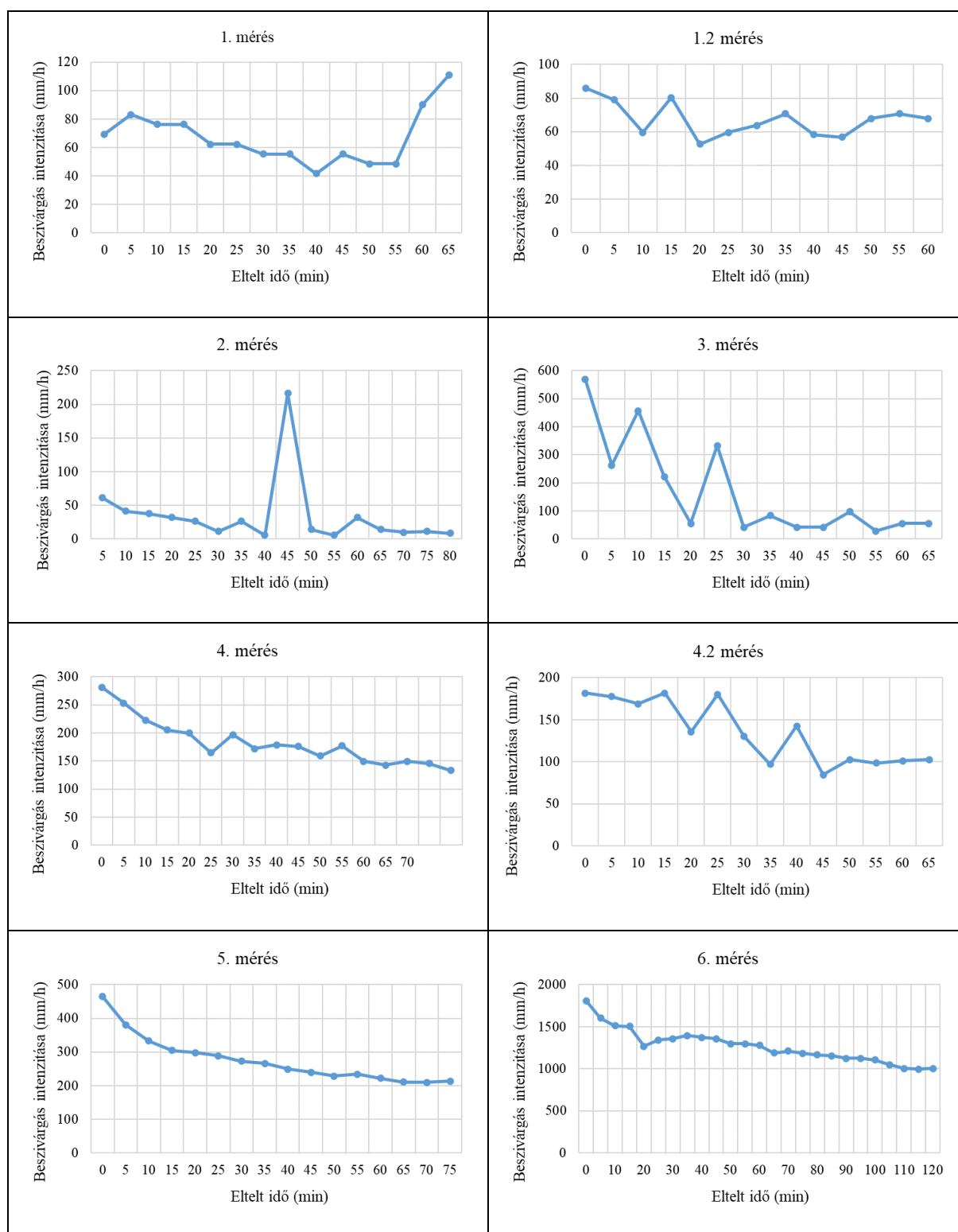
Az optimalizációs próbákhoz szükséges beállításokat Négyesi (2022) kutatása alapján végeztem el, mivel ennek használatával sikeresen kalibrált és validált modellt. Célfüggvénynek a lag time autocorrelation nevű függvényt, a keresési módszernek a simplex módszert választottam. A maximális iterációszámot 1000000-ra, a toleranciát 10^{-8} -ra vettem fel. A simplex módszer determinisztikus és a Nelder-Mead módszert használja a paraméterek egyidejű számítására és a változtatandó paraméter kiválasztására (Négyesi, 2022).

A modellel számított értékeknek a mért adatokhoz való megfelelésének mértékét számszerűen a Nash-Sutcliffe modellhatékonysági mutatóval (NSE) jellemeztem, ez a szoftverben minden futtatásnál automatikusan számított. A NSE értéke a $]-\infty; 1]$ intervallumról vehet fel értékeket. Ha $NSE < 0$, akkor a mért adatok átlagából jobb becslés számítható, mint a modellel, tehát a modell teljesítménye nem megfelelő. Ha $0,5 < NSE < 0,8$, a modell jó, ha $0,8 < NSE$, akkor az eredmények kiválóak. Ezeket a határokat Négyesi (2022) munkája nyomán vettem fel. A $NSE = 1$ azt jelenti, hogy tökéletesen megfelel egymásnak a modellezett és mért árhullám. Tehát minél nagyobb a NSE, annál jobb a modell teljesítménye (Négyesi, 2022).

7. EREDMÉNYEK

7.1 MÜNTZ-LAINÉ KÉSZÜLÉKKEL VALÓ MÉRÉSEK

Összesen nyolc mérés készült, melyekből egy hibás kiugró értéket elvettem, így a maradék hét mérés átlagát használtam fel a későbbiek során. A Müntz-Lainé készülékkel kapott szivárgási tényezők átlaga (a feltehetőleg hibás mérés kiszűrése után) a vályogos talajra 51,1 mm/h, az erdőtalajra 301,8 mm/h, az összes mérés átlaga pedig 162 mm/h lett. A mérések eredményei 4. táblázat 2. oszlopában található. A mérésekhez tartozó beszivárgási görbék a 8. ábrán láthatók. Az 1. és 1.2 méréseket ugyanazon a helyen végeztem, az 1.2 mérés ellenőrzésként szolgált, mivel az 1. mérés végén a beszivárgó víz mennyisége nőni kezdett. A jelenség az első mérés eredményeként kapott beszivárgási görbén is megfigyelhető (8/1. ábra). A mérésre a számított szivárgási tényezőt a három egymást követő legkevesebb beszivárgási intenzitás (a növekedést megelőző három érték) alapján számoltam. A talaj feltehetőleg ekkor lehetett telített állapotban. Az 1.2 mérés közben ilyen probléma nem merült fel. Ennek a mérésnek az eredménye hasonló lett az 1. méréséhez, tehát a telített állapot feltételezése helyes lehetett. A 4.2 mérést a 4. méréssel megegyező helyen végeztem, ennek oka az volt, hogy lehetőség adódott egy csapadékesemény után elvégezni a mérést. A mérés célja az volt, hogy megvizsgáljam mekkora mértékben befolyásolja az eredményt, ha a talaj kezdeti víztartalma nagyobb. A szivárgási tényező értékek ugyan eltérők lettek, de nagyságrendi különbség nem volt. A 6. mérés eredménye kiugróan magas, ez már mérés közben is sejthető volt, mivel a vízutánpótlást sokkal gyakrabban és nagyobb mennyiségekben kellett végezni. A beszivárgó vízmennyiség közel konstans értékre való beállása a többi mérésnél tapasztaltnál (1-1,5 óra) több időt vett igénybe, itt körülbelül két óra volt hozzá szükséges. Feltehetőleg a területre kevésbé jellemző, erősen vízáteresztő talajon sikerült a mérést végezni, így ezt az értéket hibásnak vettem. A további eredmények szerint az erdőtalaj összességében a területre kevésbé jellemző, hiszen a 4., 5., és 6. erdőtalajon végzett mérések nélkül az átlag közelebb lenne a más módszerekkel meghatározott szivárgási tényezőkhöz, melyek jobban szerepeltek a modellben. (Ezt a 7.3 fejezetben fogom részletesen ismertetni). A 2. mérés beszivárgási görbéjén látható kiugró érték oka egy mérési hiba, mivel mérés közben az úszó megakadt, így a víz nem tudott áramolni a belső henger felé (a 40. percnél lévő nagyon alacsony érték oka), emiatt mechanikai beavatkozásra volt szükség. Az úszó lefelé mozdítása miatt több víz tudott áramlani (hiszen az úszó nem úszott e rövid ideig, hanem le volt nyomva), így kaptam a kiugró értéket a 45. perben.



8. ábra A terepi mérésekből származó beszivárgási görbék

A Müntz-Lainé készülékkel való mérések alapján számoltam a beszivárgás intenzitását is, mely a kezdeti és konstans módszerhez volt szükséges. A kapott értékek a 4. táblázatban láthatók.

A Müntz-Lainé-féle beszivárgásmérő készülék előnye, hogy egyszerű a működési elve, akár a helyszínen is számolhatók eredmények, emiatt már mérés közben észrevehetőek a mérési hibák.

A hibás mérés így rögtön megismételhető, ezzel a pótlólagos terepi kiszállás elkerülhető. Hátránya, hogy közel pontszerű a minta a vízgyűjtő nagyságához viszonyítva, így a területre kevésbé jellemző talajon való mérés, mint például a 6. mérés a kutatás során, a későbbi számításokban nagyságrendbeli hibákat okozhat. Tehát sok mérés szükséges egy nagy kiterjedésű vízgyűjtő talajfizikai paramétereinek megfelelő becsléséhez. Ebben nehézséget okoz, hogy a gyűrűket minden különböző helyen végzett mérésnél újra le kell verni a talajba és a vízutánpótlást is biztosítani kell. Egy mérés során kb. 30-40 liter víz volt szükséges a két henger közti területen az állandó vízszint tartásához (a 6. mérésnél ez több, mint 60 liter volt). Tehát a mérés általában jelentős fizikai munkát igényel és időigényes is, hiszen egy mérés 1-1,5 óra hosszú átlagosan.

A méréseket Veres (2021) javaslatai alapján végeztem, feltehetőleg emiatt csökkent a Veres (2021) által tapasztalt két nagyságrendi eltérés egy nagyságrendre a térképes adatokhoz képest.

7.2 LABORATÓRIUMI ÁTERESZTŐKÉPESSÉGI VIZSGÁLAT

A változó nyomású áteresztőképességi vizsgálattal kapott szivárgási tényezők átlaga 3,86 mm/h-ra adódott. Egyes talajmintákon több mérés elvégzése volt szükséges. Egyes méréseknél a zavartalan talajmintából kiszűrt henger alakú mintából (az alján elhelyezett szűrő ellenére is) a talaj mérés közben kipergett. Előfordult azonban az is, hogy ugyanezen talaj esetén tömörítés (mely az előbb leírt tapasztalatok miatt volt szükséges) után kiugróan alacsony szivárgási tényező értéket kaptunk. Tehát a két jelenség azonos talajmintából vett egy-egy hengeres mintánál is megjelent. Megállapítható, hogy a kapott szivárgási együttható értéke nagymértékben függött a talajminta hengerbe való helyezésekor végzett tömörítéstől.

A laboratóriumi változó nyomású áteresztőképességi vizsgálat előnye, hogy kevesebb fizikai munkát igényel. Hátránya, hogy amennyiben a zavartalan mintából kiszűrt minta kipereg mérés közben, vagy nem sikeres a kiszűrés, akkor a mintát tömöríteni kell, ami nagymértékben befolyásolja az eredményt. Ekkor már nem beszélhetünk zavartalan mintáról sem, ráadásul pontszerű talajmintán mérünk (kisebb, mint a Müntz-Lainé-nél). Azonban a vizsgálat legnagyobb hátránya úgy gondolom az, hogy a tömörítés miatt (melyet legjobb igyekezet ellenére sem lehet mindig ugyanakkora mértékben elvégezni egy ilyen kicsi mintán) az eredményekre ható hibák nem következetesek, inkább véletlenszerűek. Míg a Müntz-Lainé készülékkel való méréseknél, ha nem is pontos a mérés, a talajok közti különbségeket jól lehet látni. Szemcsés, vagy kevésbé kötött talaj (erdőtalaj) esetén nagyobb, kötött (vályogos) talaj esetén kisebb szivárgási tényező értékeket kaptam. A laboratóriumi méréssel azonban van olyan

kevésbé kötött talaj, melyre kisebb a szivárgási tényező, mint a kötött talajnál. Emiatt a Müntz-Lainé készüléket megbízhatóbbnak gondolom, mivel az eredmények valószínűleg elsősorban csak szabályos hibával terheltek.

4. táblázat A terepi és laboratóriumi mérések eredményei

Mérés száma	Szivárgási tényező				Beszivárgás intenzitása	
	Müntz-Lainé készülék		Változó nyomású vizsgálat		[m/s]	[mm/h]
	[m/s]	[mm/h]	[m/s]	[mm/h]		
1	2,31E-05	83,21	1,23E-06	4,41	1,41E-05	50,81
1.2	3,42E-05	123,17			1,91E-05	68,83
2	4,33E-06	15,57	1,18E-07	0,43	2,70E-06	9,70
3	1,75E-06	6,28	2,76E-06	9,93	1,28E-06	4,62
4	8,87E-05	319,47	1,58E-07	0,57	3,97E-05	142,74
4.2	7,04E-05	253,44			2,80E-05	100,70
5	9,24E-05	332,50	1,10E-06	3,95	5,86E-05	211,11
6	4,31E-04	1550,42	-	-	2,79E-04	1002,42

7.3 MODELLEZÉS

Az eredményeket elsősorban a részvízgyűjtőkön külön-külön modellezett árhullámok alapján vizsgáltam. Ennek oka az volt, hogy így nagyrészt csak a veszteség módszerek befolyásolták a modellezett árhullámot, a mederbeli lefolyás nem. Ez csökkentette a futtatási időt is, hiszen az optimalizációt egyszerre kevesebb paraméterre végeztem. A teljes vizsgált vízgyűjtőre való futtatáskor így már csak a görgetegi-babócsai részvízgyűjtő kalibrálandó paramétereit és a mederbeli lefolyás paramétereit kellett optimalizálni. Az eredmények kiértékelése szempontjából két csoportra osztottam az eseményeket. Az első csoportba tartoztak azok, ahol az árhullám során lefolyt víztömegben domináns a felső három (babócsai, taranyi, lábodi) részvízgyűjtő. Ezeknél az eseményeknél a teljes vizsgált vízgyűjtőre kapott eredmény csak kis mértékben függött a görgetegi-babócsai részvízgyűjtőre számított árhullámtól, legtöbb esetben a részvízgyűjtő vízhozama közel konstans volt. A második csoport esetén a görgetegi-babócsai részvízgyűjtőről érkező víztömegnek is jelentős szerepe volt. Ebben az esetben a részvízgyűjtők után megvizsgáltam a teljes vízgyűjtő árhullámát is, mivel annak ellenére, hogy a három másik részvízgyűjtőre kapott eredmény nem volt kielégítő, a babócsai kifolyási szelvényre számított árhullám még lehetett megfelelő. A csoportosítás motivációja onnan eredt, hogy a futtatások során sokszor teljesült, hogy ha a részvízgyűjtők eredményei nem voltak megfelelők, a teljes vízgyűjtő árhulláma sem volt az, tehát az események döntő része az első kategóriába tartozott,

így a nem megfelelő eredmények kiszűrésére lehetőség volt. Mivel nagy mennyiségű futtatásra került sor, ezzel jelentősen csökkent a futtatásokkal töltött idő.

A két kategória határát egy becsléssel határoztam meg. Ha a babócsai, taranyi és lábodi részvízgyűjtők maximális vízhozamainak összege meghaladta a kifolyási szelvényél (ahol a babócsai, taranyi, lábodi és a görgetegi-babócsai részvízgyűjtőn lefolyó víztömeg is megjelenik) mért maximális vízhozam 90%-át, akkor az eseményt az első csoportba soroltam. Az első kategóriába a 4., 6., 7., 8., 9., 13., és 15., a második kategóriába a 2., 10., 11., és 14. események kerültek.

A modellezett árhullámok NSE értékei részvízgyűjtők és események szerint az 5. táblázatban láthatók. A J1 a babócsai, a J2 a lábodi, a J3 a taranyi részvízgyűjtő kifolyási szelvényére vonatkozik. Fehérrel a nem megfelelő ($NSE < 0$), világos zölddel az elfogadható ($0 < NSE < 0,5$), zölddel a jó ($0,5 < NSE < 0,8$), sötétzölddel a kiváló ($NSE > 0,8$) eredményeket jelöltem. A *-gal jelzett eseményeknél az adott részvízgyűjtő vízhozamára nincs adat.

A veszteség módszereknél részvízgyűjtőnként kalibrált paraméterek a Green & Ampt módszernél a kezdeti víztartalom; a kezdeti és konstans módszer esetén a beszivárgás intenzitása, a kezdeti veszteség és a késleltetési idő; a görbeszám módszernél pedig a kezdeti veszteség és a késleltetési idő voltak. Ennek okát a fejezet későbbi részében ismertetem.

5. táblázat Az események részvízgyűjtőnkénti kalibrálásának eredményei (NSE)

Esemény	Green & Ampt									Kezdeti és konstans (Initial and Constant)			SCS Görbeszám (Curve Number)		
	Müntz-Lainé			Laboratóriumi			Térképes			J1	J2	J3	J1	J2	J3
	J1	J2	J3	J1	J2	J3	J1	J2	J3						
k2	-0.335	-0.463	-0.914	0.420	-3.228	0.564	-0.335	-2.163	-0.177	0.945	0.208	0.648	0.754	-0.144	0.721
k4	-0.811	0.497	0.060	-207.045	-12.666	-11.736	-12.836	0.497	-1.422	0.877	0.618	0.190	0.766	0.618	-0.062
k6	0.415	*	-0.574	0.367	*	0.376	0.415	*	-0.574	0.589	*	0.514	0.589	*	-0.569
k7	-1.028	-0.809	-6.606	-0.149	-0.809	-22.208	-1.028	-0.809	-22.208	0.456	-0.290	-0.279	0.415	-0.803	-6.562
k8	-0.347	-3.130	-4.618	0.255	-37.461	-3.221	0.323	-3.130	-4.618	0.933	-1.733	-0.120	-0.142	-2.017	-1.291
k9	-0.430	-0.414	-0.541	-333.154	-13.334	-5.759	-1.288	-0.569	0.681	0.747	0.207	0.824	0.750	-0.042	0.246
k10	-0.080	-0.198	-1.286	-0.080	-64.678	-6.571	-0.080	-0.198	-1.286	0.579	0.014	0.450	0.216	-0.384	-0.360
k11	-0.351	-0.237	-2.294	-0.351	-1.112	-2.294	-0.351	-1.112	-2.294	-0.188	-0.128	-0.344	-0.126	-0.128	-0.344
k13	-0.070	*	-1.196	0.735	*	-0.097	0.852	*	0.267	0.906	*	0.627	-0.039	*	0.080
k14	-63.030	*	*	-63.030	*	*	-63.030	*	*	-21.358	*	*	-15.823	*	*
k15	-0.833	-0.669	-0.035	-14.263	-0.977	-0.724	-0.833	-0.669	-0.035	-0.486	0.467	0.275	-0.486	0.358	-0.859

7.3.1 GREEN & AMPT MÓDSZER

A Green & Ampt módszerrel lehetőség volt összehasonlítani a különböző módszerekkel meghatározott szivárgási tényező értékeket. Az NSE minősítések darabszáma a használt szivárgási tényező értékek szerint az összes részvízgyűjtőből és eseményből a 6. táblázatban olvasható. A Müntz-Lainé készülékkel mért értékek közül mindössze három modellezett árhullám lett elfogadható ($0 < \text{NSE} < 0,5$). Ezek közül az NSE maximuma 0,497, minimuma 0,060 volt. Az elfogadható értékek különböző részvízgyűjtőknél adódtak. A laboratóriumi vizsgálattal mért értékeket használva két eseménynél lett jó ($0,5 < \text{NSE} < 0,8$), négy eseménynél elfogadható a kapott eredmény. Az összesen hat megfelelőnek ($0 < \text{NSE}$) mondható árhullámból négy a babócsai, kettő a taranyi részvízgyűjtőre esett. A térképes adatbázis alapján megállapított értékekkel szintén hat megfelelő árhullám adódott, de ebből egy már a kiváló ($0,8 < \text{NSE}$) kategóriába sorolható, ezen kívül egy jó és négy elfogadható eredmény lett. A megfelelő árhullámok közül három a babócsai, egy a lábodi és kettő a taranyi részvízgyűjtőhöz tartozott. A három darab első részvízgyűjtőhöz tartozó megfelelő minőségű modellezett esemény a laboratóriumi vizsgálattal kapott értékkel is megfelelő volt. A legjobb NSE érték szintén ugyanahhoz az eseményhez és ugyanahhoz a részvízgyűjtőhöz tartozott mind a laboratóriumi mind a térképes értékeknél (13. esemény, babócsai részvízgyűjtő).

6. táblázat Az NSE minősítések darabszáma a Green & Ampt módszer esetén

NSE minősítés	Müntz-Lainé [db]	Laboratóriumi [db]	Térképes [db]
elfogadható ($0 < \text{NSE} < 0,5$)	3	4	4
jó ($0,5 < \text{NSE} < 0,8$)	-	2	1
kiváló ($0,8 < \text{NSE}$)	-	-	1

A teljes vízgyűjtőre nézve a második kategóriába tartozó eseményeket, a Müntz-Lainé készülékkel és a laboratóriumban mért értékekkel egy-egy, a térképes értékekkel kettő elfogadható eredményt kaptam (7. táblázat).

7. táblázat A Green & Ampt módszer eredményei a teljes vízgyűjtőre (NSE)

Esemény	Müntz-Lainé	Laboratóriumi	Térképes
k2	-0.925	0.246	0.052
k10	-0.626	-0.397	-0.346
k11	0.192	-0.246	0.219
k14	-0.376	-0.975	-0.313

7.3.2 KEZDETI ÉS KONSTANS MÓDSZER

A kezdeti és konstans módszerrel összesen öt kiváló, hét jó és nyolc elfogadható eredmény lett. Ezek közül nyolc a babócsai, öt a lábodi, hét a taranyi részvízgyűjtőhöz tartozik, a kiváló eredmények közül négy a babócsai részvízgyűjtőre esik. A megfelelő árhullámok közt a legjobb NSE érték 0,945, a legrosszabb 0,014.

A Green & Ampt módszernél megfigyelt tendencia miatt a kezdeti és konstans módszernél a beszivárgás intenzitását is kalibráltam. A mért intenzitást is kipróbáltam, azonban pár esemény alapján látható volt, hogy a beszivárgás túl nagy és nem tud kialakulni megfelelő árhullám. Az eseményekre számított késleltetési idő értékek átlaga sem bizonyult jónak a csapadékok változó eloszlása miatt, ezért a kezdeti és konstans módszernél már az is kalibrálásra került. A legjobb eredményeket a kezdeti és konstans módszerrel sikerült elérni. A részvízgyűjtők modellezett árhullámait nézve a 29-ből (összesen 33, de 4 esetben nincs adat) 20 esetén megfelelő volt az eredmény. Ez 69%-os arányt jelent. Mivel a módszer jól szerepelt, a kalibrációt minden eseménynél elvégeztem a teljes vízgyűjtőre is (8. táblázat). A teljes vízgyűjtőre nézve is mindegyik eseményre megfelelő eredményt kaptam, kivéve a 14. eseményt. Az utóbbi oka az lehet, hogy két részvízgyűjtő adata is hiányzott, így csak egy részvízgyűjtőre tudtam külön elvégezni a kalibrálást. Azonban ennek a maradék részvízgyűjtőnek a lefolyási hányada 0,0076 volt, ehhez valószínűleg nagy beszivárgási intenzitásra lett volna szükség, így az árhullám modellezése sikertelen volt. Látható, hogy az események csoportosításánál második kategóriába került események (2., 10., 11., és 14.) közül a 11. esemény teljes vízgyűjtőre modellezett árhulláma kiváló minőségű lett annak ellenére, hogy a részvízgyűjtők egyikére sem volt megfelelő a modellezett árhullám. Ennek oka, hogy a görgetegi-babócsai negyedik részvízgyűjtőről érkezett a lefolyó víztömeg nagy része, melyet már korábban is említettem a második kategória definiálásánál.

8. táblázat A kezdeti és konstans módszer eredményei a teljes vízgyűjtőre (NSE)

Esemény	Kezdeti és konstans módszer
k2	0.892
k4	0.485
k6	0.459
k7	0.166
k8	0.557
k9	0.788
k10	0.078
k11	0.835
k13	0.641
k14	-0.942
k15	0.660

7.3.3 GÖRBESZÁM MÓDSZER

A görbeszám módszert használva hat jó és öt elfogadható eredményt kaptam, melyekből hat a babócsai, kettő a lábodi és három a taranyi részvízgyűjtőre esett. Ezek közül az NSE maximális értéke 0,766, minimális értéke 0,080 volt. A görbeszám módszerrel 29-ből 11 részvízgyűjtőn lévő eseményre lett megfelelő a számított árhullám, ami 38%-os aránynak felel meg. A teljes vízgyűjtőre való kalibrációt minden eseményre elvégeztem, ennek eredményei a 9. táblázatban láthatók.

A kezdeti és konstans módszernél említett okok miatt a késleltetési időt ennél a módszernél is kalibráltam. A görbeszám módszernél nem muszáj megadni kezdeti veszteség értéket, azonban a próbálkozások alapján úgy tűnt, hogy jobb eredményeket lehet elérni, ha a kezdeti veszteséget is kalibrálom. A görbeszám értékek jónak bizonyultak, azokat nem változtattam, azonban néhány eseménynél jobb értékek adódtak volna, ha a talajt egy kevésbé kötöttebb kategóriába sorolnám. Ezt a kutatás folytatásában lehetőség lenne megvizsgálni a talaj besorolása alapján.

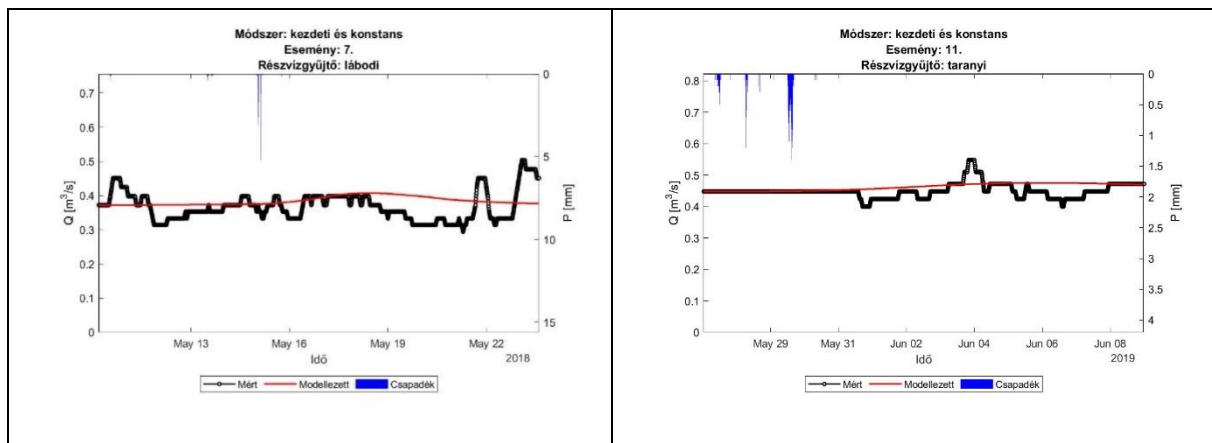
9. táblázat A görbeszám módszer eredményei a teljes vízgyűjtőre (NSE)

Esemény	Görbeszám módszer
k2	0.798
k4	-0.848
k6	0.797
k7	0.061
k8	-2.023
k9	0.760
k10	0.511
k11	0.141
k13	-0.409
k14	-24.693
k15	-0.442

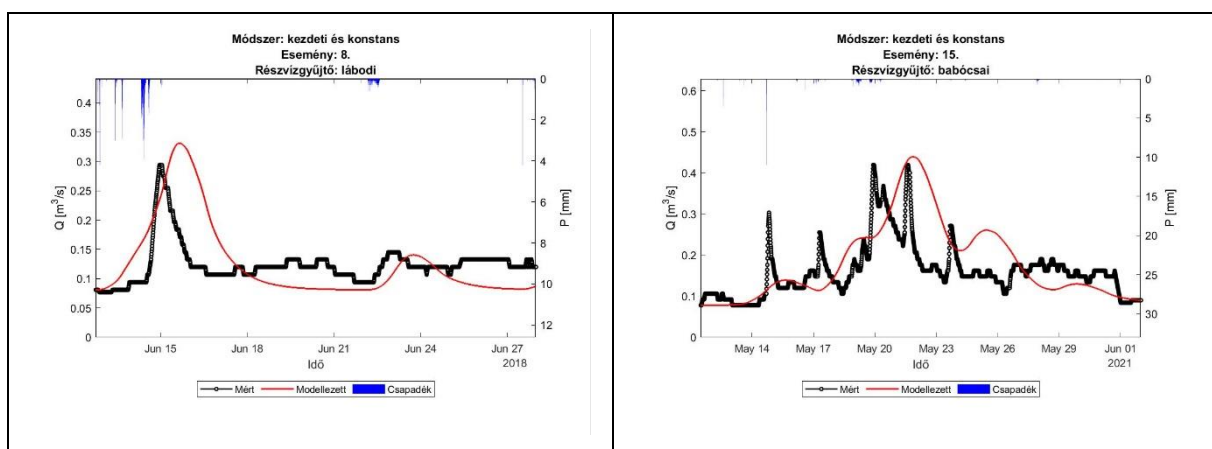
8. KONKLÚZIÓK

A Green & Ampt módszert használva a különböző szivárgási tényező meghatározási módszerek közül a leggyengébben a Müntz-Lainé készülékkel mért értékek szerepeltek, a laboratóriumi és térképes értékek egymáshoz hasonló teljesítményt mutattak. Ha a nem megfelelő eredmények minőségét is figyelembe veszem, kijelenthető, hogy a térképes állományból vett értékek szerepeltek a legjobban. A Müntz-Lainé készülékkel mért értékek felülbecsülték a szivárgási tényezőt, ez a kapott árhullámokból látható volt, mivel a modellezett árhullám sokkal kisebb volt, mint a mért vízhozam értékek. A megfigyelést az is alátámasztja, hogy az egy, illetve két nagyságrenddel kisebb laboratóriumi és térképes értékek jobban szerepeltek. Bozóky-Szeszich (1960) hasonló megállapítást tett, miszerint a készülékkel mért értékek nagyobbak, mint a számítással kapott értékek. A laboratóriumi értékek valószínűleg a tömörítés miatt alábecsülték a szivárgási tényezőt. Összességében a Green & Ampt módszerrel kapott árhullámok rosszul közelítették a mért árhullámokat.

Megfigyelhető, hogy a kezdeti és konstans, és görbeszám módszerek által megfelelően modellezett események nagy része megegyezett. Ezekben az eseményekben közös, hogy a maximális vízhozam $2 \text{ m}^3/\text{s}$ feletti, míg a többi esemény maximális vízhozamának átlaga $1,07 \text{ m}^3/\text{s}$. Ennek oka, hogy több eseménynél is előfordult, hogy a konstans havi alapvízhozam módszernél megadott, esemény kezdeti időpontjában mért vízhozam az esemény során egy csapadékmentes időszakban a kezdeti vízhozamnál kevesebb lesz, és ennek a jelenségnek kis vízhozamok esetén jelentős hatása van. Mivel a modell a veszteséget az alapvízhozamon felüli vízhozamból vonja le, a kezdeti vízhozam alá nem tud esni a modellezett vízhozam, ezért a modellel számított értékek az ilyen esetekben rosszul közelítik a mért értékeket. Ilyen a 7. esemény a lábodi (9/1. ábra) és taranyi részvízgyűjtőn, és a 11. esemény a taranyi részvízgyűjtőn (9/2. ábra). A nem megfelelő modellezett árhullámok másik esete akkor fordul elő, amikor a tetőző vízhozam után hirtelen, rövid idő alatt csökken a vízhozam. Az így keletkező „hegyes csúcsokat” a modellezett árhullám nem képes lekövetni, mivel a vízhozam változása mindig fokozatos, így lekerekített csúcsokból, görbékből áll, melyekre fokozatos görbületváltozás jellemző. Ilyen például a 8. esemény a lábodi részvízgyűjtőn, illetve a 15. esemény a babócsai részvízgyűjtőn (10. ábra).



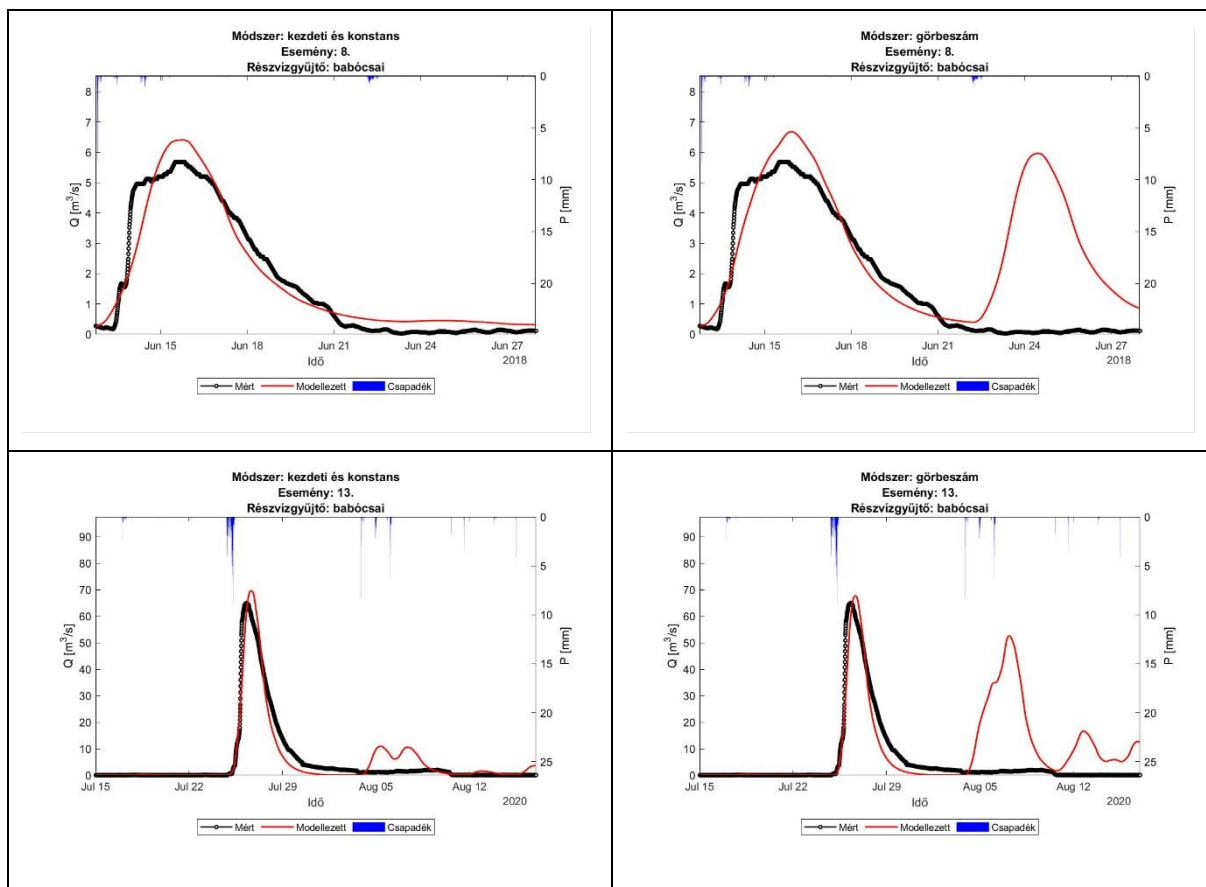
9. ábra A kezdeti vízhozam alá eső árhullámok példái



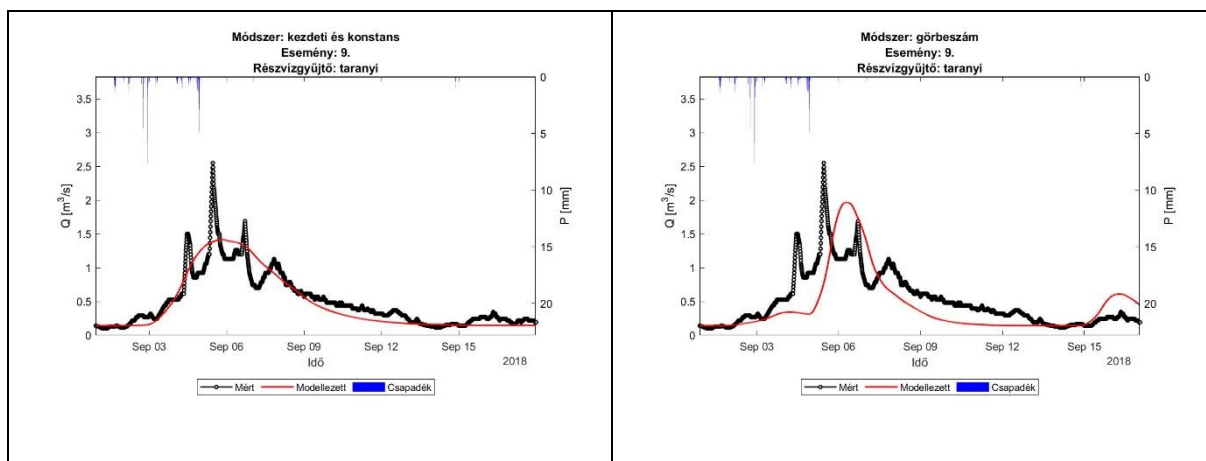
10. ábra A hirtelen elért tetőző vízhozamok vagy kisebb árhullámcsúcsok példái

Olyan esemény nem volt, ahol a görbeszám módszerrel jelentősen jobb eredményt lehetett elérni, mint a kezdeti és konstans módszerrel. A kezdeti és konstans módszerrel megfelelően modellezett események közül azonban hét olyan volt, amely a görbeszám módszer esetén nem megfelelő, vagy jelentősen rosszabb (a két esemény NSE különbsége nagyobb, mint 0,5). Ezek az események az 5. táblázatban a görbeszám módszernél piros betűszínnel vannak jelölve. Döntő többségben (öt esetben) a rosszabb teljesítmény oka, hogy a mért árhullámot okozó csapadékesemény után egy második, általában az elsőnél kisebb mennyiségű csapadék is érkezik, melyre a görbeszám módszert használó modellel számított vízhozam értékek a mért vízhozamokat nagymértékben túlbecsülik. Ezáltal második árhullámcsúcs alakul ki, ami a mért vízhozam adatsorban nincs, vagy jóval kisebb nagyságú. Erre a jelenségre látható két példa a 11. ábrán. Mivel ez a probléma a kezdeti és konstans módszernél nem merült fel, és a görbeszám változtatása sem küszöbölte ki ezeket a hibákat, a probléma a két kezdeti veszteség (initial loss és initial abstraction) közti különbségben rejlik. Azonban nem találtam olyan publikációt, amely vizsgálná a két paraméter közti eltérést. A másik előforduló jelenség az volt, hogy a

hosszabb időtartamú, elhúzódó árhullámok helyett egy rövidebb árhullám lett a futtatás eredménye, ez például a 9. eseménynél a taranyi részvízgyűjtőn figyelhető meg (12. ábra).



11. ábra A második árhullámcúcsok kialakulásának példái



12. ábra A görbeszám módszer esetén az árhullám nem megfelelő alakjának példája

Az eredményeknél megfigyelhető, hogy a lábodi részvízgyűjtőnél mindegyik módszer gyengébben szerepel, mint a másik kettő részvízgyűjtőn. Ez elsősorban arra vezethető vissza, hogy a fentebb tárgyalt hibát okozó jelenségek itt gyakran fordulnak elő, például a vízhozam kezdeti érték alá esése a kis vízhozamok miatt, vagy második árhullámcsúcs kialakulása az elsőt követően a csapadékok eloszlása miatt. A terepi bejáráson megfigyelt tényezők – erős növényzet, benőtt meder, legkevésbé gondozott rész – is hatással lehetnek a nehezebb modellezhetőségre.

Az eredményeimet Zema et al. (2016) kutatásával összevetve számos egyezés található. A Green & Ampt módszer kevésbé mutatott jó eredményeket, míg a kezdeti és konstans, valamint a görbeszám módszerek jól szerepeltek, az utóbbi kettő módszer hasonló eredményekkel. Azonban a kutatásom során legtöbb esetben - főleg a második árhullámcsúcsok kialakulása miatt - a tetőző vízhozam és lefolyt víztömeg értékeire jobb becslést adott a kezdeti és konstans módszer, mivel jobban illeszkedett a modellezett a mért árhullámhoz. Ezekről eltekintve azonban általában a Rinya-patak esetén is hasonló alak volt jellemző a két módszer esetén.

Schoener et al. (2019) megfigyeléseihez hasonlóan a vízgyűjtőre jobban alkalmazhatók az egyszerű módszerek (kezdeti és konstans, görbeszám), mint a komplex Green & Ampt módszer, mely összességében gyengén szerepelt. Kutatásukban megállapították, hogy a kis vízhozamú eseményeknél gyengén szerepelnek a módszerek. Az öt legkisebb tetőző vízhozamú eseményre a kezdeti és konstans módszer csak az esetek 20%-ában adott megfelelő eredményt. Ezek az események mindegyike $1 \text{ m}^3/\text{s}$ alatti tetőző vízhozamú volt, ezért a kutatásomban is megvizsgáltam az ilyen tulajdonságú eseményeket. Ezeket az 10. táblázatban narancssárga színnel jelöltem. A kezdeti és konstans módszerrel a kiemelt események 50%-ára megfelelő árhullámot kaptam, (10. táblázat, zöld betűszín). Tehát Schoener et al. (2019) megfigyeléseitől eltérően a kezdeti és konstans módszerrel a Rinya vízgyűjtőjére a kis vízhozamok fele jól modellezhető.

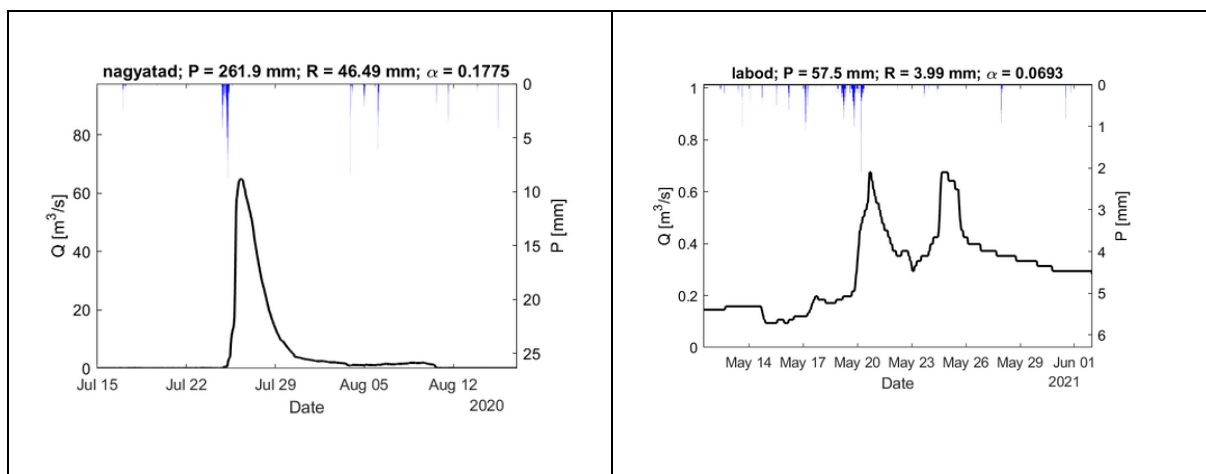
10. táblázat Az események tetőző vízhozamai az egyes részvízgyűjtőkön

Esemény	J1	J2	J3
k2	5.28	3.4	7.4
k4	3.28	0.53	2.08
k6	2.48	-	0.744
k7	7.48	0.504	1.06
k8	5.68	0.294	0.856
k9	2.32	3.34	2.55
k10	0.947	0.53	0.51
k11	1.32	1.66	0.624
k13	65	-	12
k14	0.134	-	-
k15	0.419	0.675	2.952

Kulkarni et al. (2022) a veszteség módszerek közül a görbeszám módszerrel ért el jó eredményeket, mely bár nem a legjobban, de jól szerepelt a Rinya-patak vízgyűjtője esetén is.

Bezak et al. (2022) kutatásától eltérően, a Rinya-patak vízgyűjtőjén a módszerek nem azonos teljesítménnyel szerepeltek, a kezdeti és konstans módszer kiemelkedően jól szerepelt. Bár a görbeszám módszer a kezdeti és konstans módszernél rosszabb, a Green & Ampt módszernél sokkal jobb teljesítményt nyújtott. A megfigyelések közti eltérés oka, hogy a vízgyűjtő talaja nem tekinthető homogénnek.

Az OMSZ által szolgáltatott adatok nagyrészt jó eredményekre vezettek, azonban a csapadék és vízhozam idősorokat együtt figyelve jó pár alkalommal látszólag nem megfelelő eloszlás figyelhető meg, melyek közül egy-egy példát az alábbi ábrákon mutattam be (13. ábra). A 13/1. ábrán látható, hogy az adatok alapján leesett relatív nagy csapadékmennyiségekből nem keletkezett árhullám. A 13/2. ábrán pedig ennek fordítottja látható, a (második) árhullámot okozó csapadékmennyiségek hiányoznak. Ezek a kalibrációnál nehézséget okoztak, az előbbi jelenség főleg a görbeszám módszernél jelentett problémát, melyet a fejezet fentebbi részén már említettem. A számított lefolyási hányadok minimuma 0,0076 volt, a 14. eseménynél a babócsai részvízgyűjtőn. Az 5. táblázatból leolvasható, hogy semelyik módszerrel nem sikerült megfelelő árhullámot előállítani erre az eseményre, a legtöbb módszernél ehhez tartozik a legkisebb NSE érték. Ezek a tapasztalatok alapján a csapadék idősorok részletesebb vizsgálata érdemes lenne. A lefolyási hányadok vizsgálata és az adatok feldolgozása közvetlen felhasználás helyett (területi átlag számítása, hibás értékek kiszűrése) is megfontolandó lenne.



13. ábra A csapadékatatok nem megfelelő eloszlása

9. ÖSSZEFOGLALÁS

A kutatás során a Rinya-patak vízgyűjtőjére készítettem csapadék-lefolyás modellt. A modellhez szükséges paraméterek meghatározása terepi és laboratóriumi mérések, illetve térképállományok alapján történt. A terepi méréseket egy háromnapos helyszíni bejárás előzte meg, mely nagyban segítette a modellezési munkát. A szükséges vízhozam és csapadékidősorokhoz a DDVIZIG és az OMSZ adatait használtam. A modellben három különböző veszteség módszert alkalmaztam, a Green & Ampt, kezdeti és konstans és SCS görbeszám módszereket.

A Green & Ampt módszer paraméterezése során a szivárgási tényező értékére Müntz-Lainé készülékkel, laboratóriumi változó nyomású áteresztőképességi vizsgálattal és térképállományok segítségével meghatározott értékeket vettem fel. A Müntz-Lainé-féle beszivárgásmérő készülék eredményei felülbecsülhették a szivárgási tényező értékét, mivel nem tudott árhullám kialakulni a számítások során, így legtöbbször gyengén szerepeltek. A laboratóriumi változó nyomású áteresztőképességi vizsgálat eredményei a Müntz-Lainé készülékeshez képest jobban teljesítettek, azonban összességében kevés számított árhullám közelítette meg a mért értékeket. A laboratóriumi mérés közben felmerültek problémák, melyek miatt többször szükséges volt a mérés megismétlése. Emellett a mérés a tömörítés miatt véletlennek vehető hibával terhelt, így a Müntz-Lainé készülékes méréseket potenciálisan jobbnak tartom, mivel azok látszólag szabályos hibával terheltek (mindig felülbecsülték a szivárgási tényezőt, de a talajok egymáshoz viszonyított különbségeit jól mutatták), tehát a fejlesztés lehetségesnek tűnik. A Green & Ampt módszernél a legjobban a térképes adatok szerepeltek, bár szintén kevés megfelelő eredményt produkáltak.

A használt veszteség módszerek közül a Rinya-patak vízgyűjtőjére a kezdeti és konstans módszer alkalmazható a legjobban. A részvízgyűjtők eseményeinek 69%-ára, a teljes vízgyűjtő eseményeinek 91%-ára megfelelő lett a számított árhullám.

A görbeszám módszer közepesen szerepelt, 38%-os arányban adott megfelelő eredményt. Ez az arány közel lehetne a kezdeti és konstans módszeréhez, azonban a később kezdődő csapadékesemények miatt kialakuló második árhullámcsúcsok nagy térfogatbeli különbségeket okoznak a lefolyt víztömegben.

A módszerek elemzése során az árhullámok és csapadékidősorok alapján vontam le következtetéseket, hogy melyek esetén nehezebb a kalibráció, ez lehetőleg segítséget nyújt az esemény alapú modelleknél kiválasztandó eseményekhez.

Ugyan az említett szakirodalmi források közt nem volt más olyan kutatás, ahol a kezdeti és konstans módszer ilyen kiemelkedően szerepelt volna, Schoener et al. (2019) megállapítását - mely szerint az egyszerű módszerek jól teljesítenek vízgyűjtő léptékben – alátámasztják a kapott eredmények, hiszen a kezdeti és konstans és görbeszám módszereket használva jó eredményeket kaptam. A bonyolultabb Green & Ampt módszer Zema et al. (2016) tapasztalataihoz hasonlóan az általam vizsgált vízgyűjtőre is kevésbé elfogadható eredményeket adott. A vizsgált módszerek közül ez a módszer inkább fizikai alapúnak mondható, a többi empirikus. Bár a fizikai alapú módszerektől pontosabb eredmények várhatók el, a kutatásomban, és számos más kutatásban is gyengén szerepeltek az empirikus módszerekhez képest. Ennek oka az lehet, hogy a paraméterek nehezen becsülhetőek és bonyolult kapcsolatban állnak egymással, azonban a pontos megállapítások további vizsgálatokat igényelnek.

Az Országos Meteorológiai Szolgálat 10 perces csapadékidősortai általában jól használhatók voltak, azonban néhány esetben megnehezítették a kalibráció folyamatát a különböző, vízhozamokkal nehezen összeegyeztethető csapadékeloszlások. Ennek felülvizsgálata ajánlott más vízfolyásokra vonatkozó adatsorokkal összevetve.

A kutatás folytatásában szeretném a HEC-HMS-ben választható többi veszteség módszer (még további két módszer: Exponential Loss és Smith Parlange) alkalmazhatóságát is megvizsgálni, majd a legjobban alkalmas veszteség módszert használva a modell validációját is szeretném elvégezni. Az igazolás során vizsgálható, hogy az eseményenként kalibrálandó, kezdeti feltételnek tekinthető paraméterek összefüggésbe hozhatók-e valamilyen esemény karakterisztikával, úgy, mint a megelőző csapadék vagy a tetőző vízhozam. Egy ilyen jellegű kapcsolat feltárásán keresztül lehetőség adódna a modell használatára előrejelzések készítéséhez, ami az itt bemutatott vizsgálatok hosszútávú célja.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném megköszönni Nagy Eszter Dóra, Dr. Farkas Dávid, Négyesi Klaudia és Dr. Farkas-Karay Gyöngyi konzulenseimnek a rengeteg segítséget és fáradhatatlan munkájukat, mely nélkül jelen dolgozat nem valósulhatott volna meg.

Köszönöm Némethy Ferenc segítségét a laboratóriumi mérések kivitelezésében.

Hálás köszönet a Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság és az Országos Meteorológiai Szolgálat adatszolgáltatás terén nyújtott segítségéért.

FELHASZNÁLT IRODALOM

Agrártudományi Kutatóközpont Talajtani és Agrokémiai Intézet (ATK TAKI)
<http://www.elkh-taki.hu/hu/osztalyok/kornyezetinformatikai-osztaly/agrotopo> (letöltve: 2019.10.25)

AtádHír <https://www.atadhir.hu/hirek/nagyatad-1/legi-felvetelek-es-fotok-a-rinya-aradasarol-3535.html> (megtekintve: 2022.11.04.)

Beven, K., (2012). Rainfall-Runoff Modelling, The Primer, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex, PO19 8SQ, UK

Bezák, N., Peranic, J., Mikoš, M., Arbanas, Z., (2022). Evaluation of Hydrological Rainfall Loss Methods Using Small-Scale Physical Landslide Model, Water 2022, 14, 2726. <https://doi.org/10.3390/w14172726>

Bozóky-Szeszich, K., (1960). A csörgedezettető öntözés hidraulikai vizsgálata, Hidrológiai Közlöny 1960 1. sz. 16-27

Copernicus (2022). Imperviousness Density 2018, <https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/imperviousness/status-maps/imperviousness-density-2018> (letöltve 2020.09.05.)

CORINE Land Cover – Copernicus <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover> (letöltve: 2022.10.10.)

Dél-dunántúli Vízügyi Igazgatóság (2016), Vízyűjtő-gazdálkodási terv 2015, Rinya-mente tervezési alegység

Dingman, S. L. (2015) Physical Hydrology, Third Edition, Long Grove, Illinois

EU-Soil Hydro Grids Database (MTA ATK TAKI), (2022). - Tóth, B., Weynants, M., Pásztor, L., Hengl, T., (2017). 3D Soil Hydraulic Database of Europe at 250 m resolution. Hydrol. Process., doi: 10.1002/hyp.11203. (letöltve: 2022.09.10.)

Faragó, T., Iványi, Zs., Führer, E., Járó, Z., Jászai, T., Kovács, G., Mika, J., Nováky, B., Nováky, E.; Petrasovits, I.; Práger, T.; Szalai, S., (1990). Az éghajlat változékonysága és változása: okok, folyamatok, regionális hatások, különös tekintettel a lehetséges társadalmi-gazdasági következményekre, a nemzetközi együttműködésből adódó feladatokra, Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium, Országos Meteorológiai Szolgálat

- Feldman, A., D., (2000). Hydrologic Modelling System HEC-HMS Technical Reference Manual, U.S. Army Corps of Engineers
- Fellegi, Zs., Karafa, B., Koch, E., Kovács, G., Murinkó, G., Tóth, G. J., (2020). Munkagödrök és Földművek Víztelenítése, Magyar Mérnöki Kamara, 1117 Budapest, Szerémi út 4.
- Hajnal, G., Koris. K., (2014). Hidrológia I. Fizikai Hidrológia, Budapest
- Huntington, T. G., (2006). Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis, *Journal of Hydrology* 316 83-95
- Johnson, A. I., (1963). A Field Method for Measurement of Infiltration, United States Government Printing Office, Washington
- Kulkarni, A., Kale, G., (2022). Identifying best combination of methodologies for event-based hydrological modeling using HEC-HMS software: a case study on the Panchganga River basin, India, *Sustainable Water Resources Management* (2022) 8:123, <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00691-4>
- Majer, F. K., (2019). Hidrológiai modellezés a magyaregregyi kísérleti vízgyűjtőn, MSc diplomamunka
- MÁV csoport – MÁVINFORM <https://www.mavcsoport.hu/mavinform/majus-17-en-ujraindul-vonatkozlekedes-beleg-es-somogyszob-kozott> (megtekintve: 2022.11.04.)
- Müntz., M. A., Faure, M. L., Laine, M. E., (1905). Études sur la perméabilité des terres faites en vue de l'arrosage: France Min. de l'Agr. Dir. Gér, Eaux et Forêts, *Ann. Forêts-Hydraulique*, v. 33, p. 45-96.
- Nagy, E. D., Szilagyi, J., Torma, P. (2022). Estimation of Catchment Response Time Using a New Automated Event-Based Approach, *Journal of Hydrology*, 128355. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128355>
- Nagy, E., (2014). A Kemence-patak térségének hidrológiai vizsgálata, TDK dolgozat, BME Építőmérnöki Kar, Vízmérnöki szekció, Budapest
- Nagy, E., (2015). Vízgyűjtő-modellezés gyakorlati alkalmazhatóságának vizsgálata a Tarján-patak vízgyűjtőjén, TDK dolgozat, BME Építőmérnöki Kar, Vízmérnöki szekció, Budapest
- Nagy, E., (2016). Lefolyás idősorok vizsgálata nem mért vízgyűjtők feltárásának előkészítésére, TDK dolgozat, BME Építőmérnöki Kar, Vízmérnöki szekció, Budapest

- Négyesi, K., (2019). Különböző típusú csapadékadatok használatának összehasonlító elemzése, TDK dolgozat
- Négyesi, K., (2020). Különböző típusú csapadékadatok használatának összehasonlító elemzése, BSc diplomamunka
- Négyesi, K., (2022). Comparison of different lag time estimation methods: from measurements to empirical equations, MSc Thesis
- Scharffenberg, W., (2016). Hydrologic Modelling System HEC-HMS User's Manual, U.S. Army Corps of Engineers
- Schoener, G., Stone, C. M., (2019). Impact of antecedent soil moisture on runoff from a semiarid catchment, Journal of Hydrology, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.12.025>
- Széles, B., (2012). Hidrológiai modellvizsgálatok a Bükkös-patak vízgyűjtőjén, TDK dolgozat, BME Építőmérnöki Kar, Vízmérnöki szekció, Budapest
- Veres, V., (2021). Helyszíni beszivárgásmérés eredményeinek felhasználása csapadék-lefolyás modellezéshez, TDK dolgozat, BME Építőmérnöki Kar, Vízmérnöki szekció, Budapest
- Wang, J., Ding, J., Zhang, Z., Chen, W., (2017). Improved Algorithm of SCS-CN Model Parameters in Typical Inland River Basin in Central Asia. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 57. 012051. DOI:10.1088/1755-1315/57/1/012051
- Zema, D. A., Labate, A., Martino, D., Zimbone, S. M., (2016). Comparing different infiltration methods of the HEC-HMS model: The case study of the Mésima torrent (Southern Italy), Land Degrad. Develop. 28: 294–308, DOI: 10.1002/ldr.2591