

TELÍTETLEN TALAJ HATÁSA A FELSZÍNI LEFOLYÁSRA MÉLYSÉGINTEGRÁLT VÍZGYŰJTŐMODELLBEN

ÁMON Gergely, Dr. BENE Katalin

Víztudományi és Vízbiztonsági Nemzeti Laboratórium, Széchenyi István Egyetem,
Közlekedéscsillagászati és Vízmérnöki Tanszék / Vízgazdálkodási Kutatócsoport, Egyetem tér 1, H-9026 Győr, Magyarország, amon.gergely@sze.hu

Absztrakt: A hazai csapadékviszonyok ártrendeződése, az intenzitások változása egyre nagyobb szakmai figyelmet irányít a nagy esésű kisvízgyűjtőkön képződő lefolyás modellezésére. A számítási kapacitások növekedésével a vízgyűjtőkre kiterjesztett mélységintegrált numerikus áramlási modellek szintén egyre komolyabb szerephez jutnak.

A felszíni lefolyás modellezése során fontos a telítetlen talaj irányában a szivárgási veszteség és beszivárgás folyamatának minél pontosabb meghatározása. A vízgyűjtőt jellemző felső, telítetlen talajréteg hidrológia paramétereinek változására a kifolyási peremen kialakuló vízhozam idősor érzékenyen reagál. A telítetlen talajréteg hidrológia paramétereinek közül a két legfontosabb; a talajtípusok vízáteresztő képessége, illetve a legérzékenyebb és egyúttal legnehezebben definiálható paraméter, a kezdeti telítettség.

Jelen cikk az észak-nyugat magyarországi Hidegvíz-völgy vízgyűjtőre felépített mélységintegrált hidrodinamikai lefolyásmodellen keresztül mutatja be, hogy a telítetlen talaj paramétereinek meghatározása milyen mértékben van hatással az egyes csapadékesemények keltette árhullámok tetőző vízhozamára és a felszíni lefolyás arányára a vízgyűjtő kifolyási pontján.

Kulcsszavak: hidrodinamika, numerikus módszerek, telítetlen talaj.

1. HIDRODINAMIKAI MODELLEK ALKALMAZÁSA A CSAPADÉK KELTETTE LEFOLYÁS MODELLEZÉSÉBEN

A 2010-es év csapadék keltette árvizei ráirányították a figyelmet a hazai vízgazdálkodásban elhanyagolt, magas villámár kockázattal rendelkező kisvízgyűjtőkre. Az elmúlt években elkészült az OMSZ javaslata az új racionális módszerre (OVF, 2021), illetve elkészült dombvidéki vízgyűjtők statisztikai alapú árhullámszámítási segédlete (Koris et al., 2021).

Az analitikus módszerek mellett a különböző projektek, pályázatok (pl. TOP Plusz, LIFE 4 WATER) már sok esetben megkövetelték a numerikus szimulációk elkészültét a villámár kockázatok kezelésének támogatására. A numerikus módszerek alkalmazása, a lefolyásmodellezés a vízgazdálkodási tervezési folyamatokban is lassan, de kezd szélesebb teret nyerni. Jövőben ez a tervezési szabványok szintjét is eléri.

A rendelkezésre álló modellpaletta egyik eleme a hidrodinamikai modellezés. A mélységintegrált modellek részletes képet adnak az árhullámok levonulásáról, de a nagy számítási igény miatt

leginkább a rövid idejű esemény alapú vizsgálatok támogatására alkalmasak. Ugyanezen okból a dombvidéki vízgyűjtőkön kialakuló villámárvizek átfogó részletes vizsgálatára ideálisak.

A vízgyűjtő szintű hidrodinamikai modellezés ugyanakkor nem áll meg a felszíni lefolyás számításánál. Lehetőség van a veszteségek integrálására a bemeneti csapadék idősorba (Ámon, Bene, 2023) azonban, ha nem csak a kifolyási szelvény pontosságára koncentrálnak, a hidrodinamikai modellhez hozzá kell rendelni a vízgyűjtő tulajdonságaiból adódó veszteségeket.

1.1. Feltáratlan vízgyűjtők modellezése

A hazai vízgyűjtők túlnyomó része feltáratlan, mérések nagyon ritkán állnak rendelkezésre, sok évre visszatekintő idősorok pedig dombvidéki vízgyűjtők esetében gyakorlatilag egyáltalán nem. A feltáratlanság különösen igaz a dombvidéki vízgyűjtők felső részvízgyűjtőire. A nagy esésű, sok esetben időszakos vízfolyások hidraulikai viselkedése nem ismert, a települések legfeljebb az egyre gyakoribb elöntési problémákkal szembesülnek. A vízgyűjtők monitorozása és modellezése viszont csak pilot helyszíneken van folyamatban (4STREAM Mérnöki Kft., 2022).

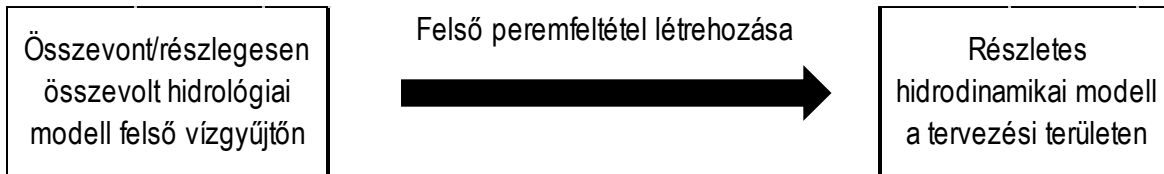
Összegezve a hiányos adatellátottság miatt a klasszikus kalibrálás - validálás folyamat nem alkalmazható. Ebben az esetben a vízgyűjtő tulajdonságaival, és korábban rögzített kiugróan szélsőséges csapadékesemények hatására kialakult történelmi árhullám szintek segítségével lehet a modell felépíteni. A hidrodinamikai modellezésnek minden esetben van egy szükséges adatigénye; a felszíni terepmodell, területhasználat, és a talajtérképek:

- DTM, amely alapvetően határozza meg a modell részletességét. A hozzáférhető, tervezésre nem alkalmas adatforrások (pl. EUDEM) erősen lehatárolják a modellezés lehetőségeit. Célszerűen a lézerszkenelés és a fotogrammetria eszközeivel a projekt elején részletes terepmodellt szükséges létrehozni, amely lehetővé teszi a modell további fejlesztését.
- A területhasználat megállapítására szintén rendelkezésre álló akár ingyenes források szintén befolyásolják a modell megbízhatóságát, a DTM felvételével szinkronban a területhasználat felvétele is szükséges.
- Felszíni lefolyás veszteségeinek meghatározásához a felső, telítetlen talajrétegeket is hozzá kell rendelni (pl. MTA ATK TAKI 3D hydrosoil)

A hidrológiai adatok – úgymint vízhozam, vízállás rögzítések – hiánya miatt mért csapadékesemények és modellcsapadékok felhasználásából lehet kiindulni. A vízgyűjtő paraméterezésén keresztül, különböző események vizsgálatával a modell bizonytalanságát okozó paraméterek kiszűrésére kell koncentrálni. Ugyanazon vízgyűjtőterületen eltérő fizikai tartalmú modellek eredményeinek és érzékenységének összehasonlításával szűrhetővé válnak a modell bizonytalanságáért felelős paraméterek. Például egy kisvízgyűjtő összevont paraméterezésű hidrológiai modelljének kifolyási idősorának összehasonlítása ugyanazon terület mélységintegrált hidrodinamikai modelljének kifolyási peremén számított idősorral (Ámon, Bene 2022).

1.2. Modellkapcsolatok alkalmazása, hidrodinamikai modellek létjogosultsága

Gyakorlatban a kapcsolt modellek alkalmazása gazdaságos és hatékony módszer, főleg tervezési folyamatok támogatására (Ámon, 2017). Általában a települési csapadékvíz elvezetés hatékony módszere, ahol a tervezési terület feletti vízgyűjtőterületnek csak a mennyiségi kockázata számít, a felületen képződő elöntések alakulása nem. Ebben az esetben összevont vagy részletesen részlegesen összevont paraméterű hidrológia modellt lehet alkalmazni a vízgyűjtő felső szakaszán. A vízgyűjtő alsó szakaszán, ahol már lakott terület is található, a részletesebb elöntési térképekhez, hidrodinamikai modell alkalmazása szükséges.



1. ábra: Tervezéshez, feltáratlan vízgyűjtők modellezéséhez használt általános modellkapcsolat

A vízkárelhárítási és sok esetben ökológiai kérdések feltárása, továbbá felső tározók létesítése, elöntési kockázatok súlyozása a vízgyűjtő részletes, rácsháló alapú modellezését igényli. Néhány pilot projekt már létezik hazánkban is, amely célja, hogy a lefolyás hidrodinamikai közelítésével lokális problémákra választ lehessen kapni (4STREAM Mérnöki Kft., 2022).

A villámár veszélyes vízgyűjtőkön található vízfolyásokon a kis- és a nagyvízi hozam között nagyságrendnyi eltérés is lehet (Ámon, Bene, 2023). Tehát a vízkárelhárítás mellett az üzemeltetési és ökológiai szempontok is más-más igényeket támasztanak a modellekkel szemben felbontás és részletesség tekintetében egyaránt.

A hidrodinamikai modellek részletességük miatt a tervezéstámogatás hatékony eszközei. A számítási igény miatt eleve a rövid idejű, esemény alapú szimulációkhoz célszerű eszköz, mint például a villámárvizek kialakulásának és lefolyásának számítása. Emellett az időben permanens kisvízi állapotok részletes áramlásviszonyainak számítását is lehetővé teszik.

1.3. Különböző modelltípusok bizonytalanságai

Az összevont/részlegesen összevont paraméterezésű hidrológiai modell viselkedését legjobban befolyásoló paraméterek esemény alapú modelleknél:

- Összegyülekezési idő
- Telítetlen talaj vízáteresztő képessége
- Víz záróság százalékos aránya

Hidrodinamikai lefolyásmodell alkalmazásakor azonos veszteségszámítás (intercepció, szivárgás) mellett a felszíni lefolyás időbeli és mennyiségi ellenőrzéséhez más fizikai tartalmú, részlegesen összevont paraméterezésű hidrológiai modell felhasználásával következtetni lehet a modellek megbízhatóságára. A veszteségek paraméterérzékenysége pedig reprezentálja a modell érzékenységét, ebből adódóan bizonytalanságait (Ámon, Bene, 2023).

Felbontásából adódóan a hidrodinamikai modellek szélesebb vizsgálati spektrumot fednek le egy paraméterbeállítás mellett. Mért villámárvíz eseményére kalibrált hidrodinamikai modell jelentősen kisebb csapadék esetén is tud legalább tetőző vízhozamot jól közelítő eredményt produkálni (Ámon, Bene, 2023).

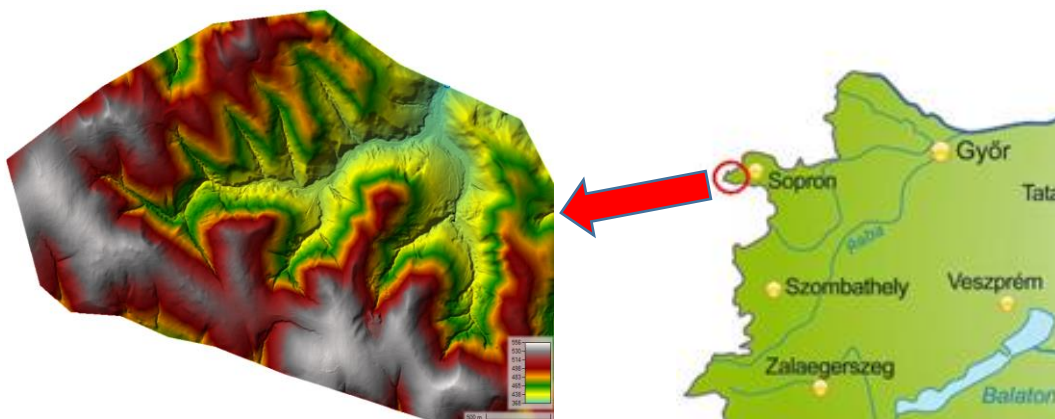
Kiseb csapadékesemény szimulálásakor a telítetlen talaj tulajdonságai jóval dominánsabbá válnak. Összevont paraméterezésű hidrológiai modellek esetében adott villámárvizet okozó csapadéokra készült kalibráció kisebb csapadéokra való alkalmazásakor, még ha a talajtani jellemzők hasonlóak az évszakosság és a megelőző csapadékok okozta telítettség miatt, a felszíni lefolyás könnyen eltűnik teljesen az eredmények közül.

2. MINTATERÜLET

Jelen vizsgálat a Soproni Egyetem üzemeltetésében lévő Hidegvíz-völgy mintavízgyűjtőre készült. A vízgyűjtő területe $\sim 6 \text{ km}^2$, a Rák-patak felső vízgyűjtője. Dombvidéki jellegű, ritka az akár 60%-os terepesés sem, a 370-550 mB.f. tartományban helyezkedik el. Területhasználatát tekintve természetes, javarészt erdő borította terület, ahol burkolt felületek minimális mértékben fordulnak elő, erdei utak formájában. A modellvizsgálatok szempontjából ideális terület. A gyors összegyülekezés, potenciális villámár kitettség jellemzi. Illetve Magyarország egyik olyan kis vízgyűjtője, ahol több éve hidrológiai és meteorológia mérések történnek. A vízgyűjtőterületen saját hidrometeorológiai állomás működik, illetve állandó mérőbukós vízhozammérés, talajvíz- és talajnedvesség mérés történik (Gribovszki et al, 2012).

2.1. Földrajzi elhelyezkedés

A vízgyűjtő terület Soprontól nyugati irányban helyezkedik el, közel az országhatárhoz (2. ábra).

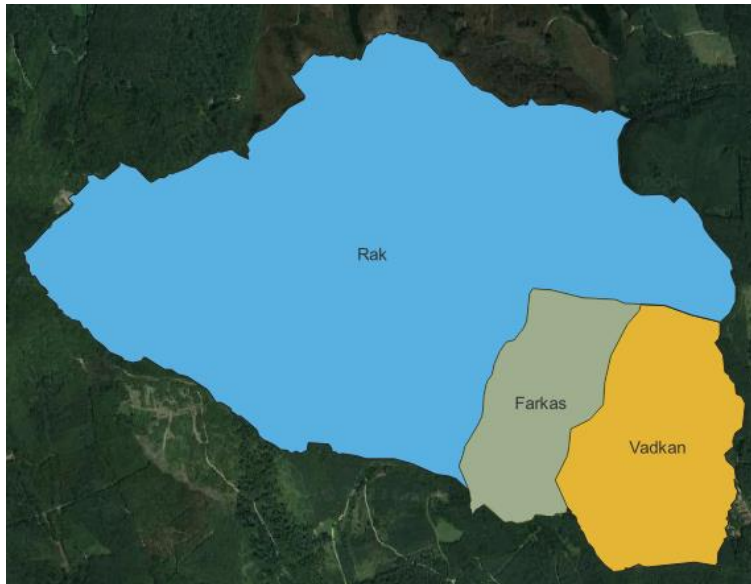


2. ábra: Hidegvíz-völgy földrajzi elhelyezkedése, Soprontól nyugati irányban, az országhatárnál

A terület három részvízgyűjtőre oszlik (3. ábra), nyugat-kelet irányban az alábbiak szerint:

- Rák-patak felső vízgyűjtője

- Farkas-árok vízgyűjtő
- Vadkan-árok vízgyűjtő



3. ábra: Hidegvíz-völgy három fő részvízgyűjtője

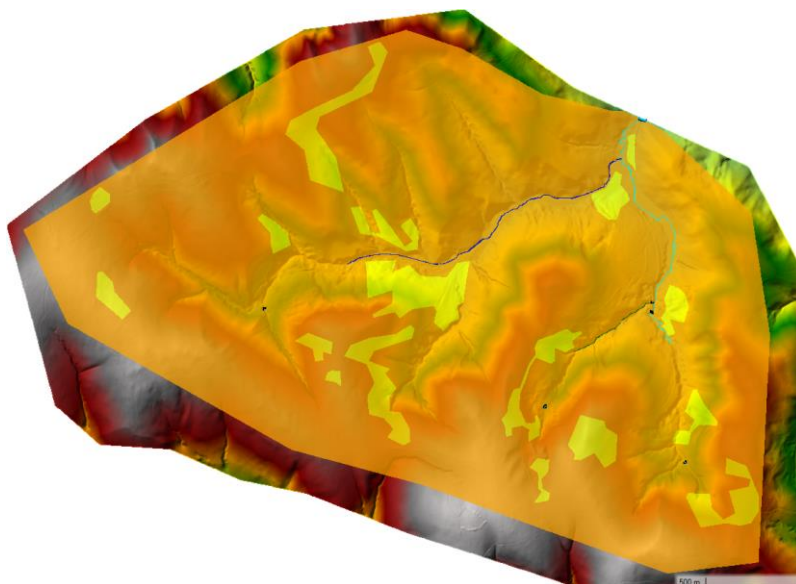
2.2. Geometria és területhasználat

A DTM-et a Soproni Egyetem munkatársai bocsátották rendelkezésre, a lézerszkenneléssel készült terepmodell 50x50 cm felbontású. A vízfolyások átlagos fenékesése 3-5 % között van, a terepesés ugyanakkor átlagosan eléri a 10-15% -ot is.

Területhasználat szempontjából három kategória különböztethető meg:

- Erdő (nagyobbrészt lombhullató, ~80%, kisebb részt örökzöld, ~20%)
- Rét (erdei tisztás területek nagyjából homogén növényzettel)
- Természetes meder (meanderező, helyenként erodált földmeder, kövekkel, sziklával)

A 4. ábrán látható területhasználati eloszlás mutatja, hogy a vízgyűjtőterületen az erdős területek dominálnak. Tehát a felszínen lefolyó vízmennyiség szempontjából az erdős területek hatása fog érvényesülni a mederbéli lefolyás mellett.



4. ábra: Területhasználat: narancs: erdő; sárga: rét, tisztás; kék-zöld: meder

2.3. Talajtani jellemzők

A Soproni Egyetem kutatóitól az egyeztetések során kapott információk alapján a vizsgált terület a Sopron környéki ottngai és kárpáti képződmények (tehát a kavicsfelhalmozódások) közé sorolható. Az aljzat kristályos pala. Erre települtek több rétegben, más-más üledékes viszonyok között szárazföldi törmelékes rétegek. A jelentős vastagságú üledékrétegben négy szint különíthető el. A felszínre csak a legfelső két réteg került: magasbérci rétegek (iszapos homokos üledék, helyenként folyóvízi kavics-rétegekkel), brennbergi blokkavics (lekerekített kavicsú rétegek közbetelepülve iszap, homok és finomtörmelék). A képződményösszetétel erősen osztályozatlan. A talajtípusok elkülönülése a területhasználattal van összhangban, azaz a magasbérci-rétegek a vízfolyások környezetében, rétes területeken fordulnak elő inkább, míg a vízgyűjtő túlnyomó részén, az erdősebb területeken a kolmatálódott blokkavics formáció dominál.

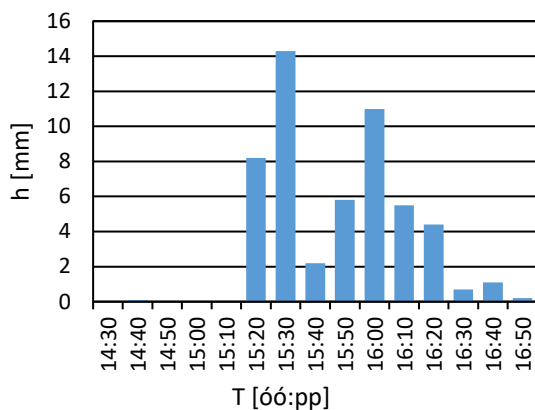
Az MTA-ATK gondozásában készült 3d hydrosoil adatbázis alapján volt mód a telítetlen talaj felszíni rétegének tulajdonságainak felvételére (Laborczi et al., 2018, Szatmári, Pásztor, 2018). A modellezés során a talajparaméterek a vízáteresztő képesség függvényében kerülnek meghatározásra. A felső talajréteg a kötött frakciók irányában határozható meg, váltakozó módon agyag, agyagos-homok talajokkal. Fentiek alapján a telítetlen talaj típusainak eloszlása a modellben a területhasználat eloszlásához kötődik.

2.4. Mért adatok

A vízhozam- és csapadékidősorok a Soproni Egyetem hidrometeorológiai állomásáról származnak. A rendelkezésre bocsájtott adatsorokból a 2010-12-es év eseményei kerültek feldolgozásra, amelyek közül jelen vizsgálat a 2012.07.06.-i csapadékeseménnyel foglalkozik.

2.4.1. Csapadék

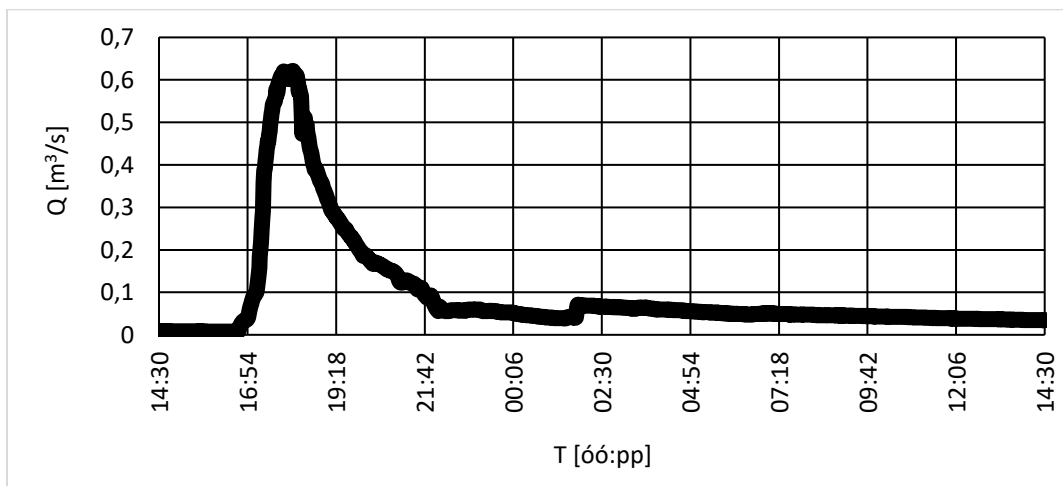
A szimulációhoz felhasznált, 2012.07.06.-i csapadékesemény a 14:30 - 16:50 időszakban zajlott le (5. ábra), az effektív csapadékidőtartam nagyjából 1,5 óra. A teljes csapadékmennyiség 53,50 mm.



5. ábra: Modellezéshez használt csapadékidősor (2012.07.06)

2.4.2. Lefolyás

A modell kalibrálása a Soproni Egyetem mérőállomásánál lévő mérőbukó adataira készült (6. ábra).

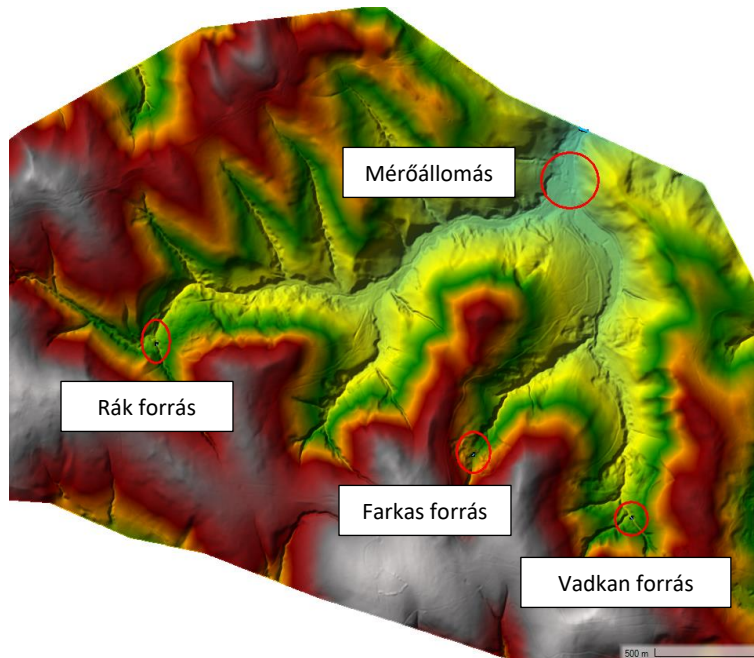


6. ábra: 2012.07.06.-07.-i vízhozammérés időszora

A vízhozam idősor alapján látható, hogy az összegyülekezés gyors, a lefolyás intenzív. Ugyanakkor a veszteségek is nagy mértékűek a felszíni lefolyás szempontjából, tekintve, hogy a ~1,5 óra alatt lehulló, 53,50 mm csapadékból képződő árhullám tetőző vízhozama $0,63 \text{ m}^3/\text{s}$.

2.4.3. Források

A vízgyűjtőn három forrás található. A források elhelyezkedését a 7. ábra mutatja. A források hozamára nincs külön mérés, a kisvízi hozamot a hidrometeorológiai állomás bukója rögzíti, a Soproni Egyetem kutatóinak megfigyelései alapján a három forrás hozzávetőleg azonos hozammal működik, a modellben így azonos, folyamatos hozamot generálnak a medrekben.



7. ábra: Források és a Soproni Egyetem mérőállomásának elhelyezkedése a vízgyűjtőn

2.4.4. Intercepció

A hidrometeorológiai folyamatok mérését a Soproni Egyetem mérőállomásán végzik. Az intercepció méréséhez az automatizált eszközökön túl a kutatók kísérleteket végeznek a lomb- illetve az avar intercepció meghatározására.

Az intercepció számítása az alábbi egyenlet felhasználásával történt (Gribowszki et al, 2014):

$$E = S \cdot \left(1 - e^{-\frac{p}{S}}\right) + 0,07 \cdot p$$

Ahol E [mm] – intercepció, S [mm] – jellemző növényfaj tározókapacitása, p [mm] – csapadék

Az egyenlet nem tartalmaz időbeli tagot, a Soproni Egyetem kutatóinak eredményei alapján az intercepció lineárisnak vehető.

A mérések alapján további veszteséget okoz az avar. Az avar okozta intercepció csapadékeseményre vetítve ~6-7 mm-t tesz ki. Az avarintercepció jelen modellben a beszivárgáshoz van kötve.

2.4.5. Beszivárgás

Az MTA-ATK talajadatait a Soproni Egyetem kutatóinak talajfeltárási eredményeivel összevetve, a 3d hydro-soil adatbázisban a talaj felső 15 cm-ben hasonló talajtípusokat találtunk. A hydro-soil adatok szórása miatt a kalibráció első lépéseként két talajtípust határoztunk meg. A mederbeli talaj, illetve a vízgyűjtő teljes területe. A vízgyűjtő felszíni borítottsága erdő (88%) és mező (10%). Az erdős területeken, a felszíni lefolyásra, a beszivárgás mellett az avar tározás jelentős hatással van, emiatt az erdővel borított területeken a talaj és avar vízvezető képességének súlyozott átlagával számoltunk.

A telítetlen talajba beszivárgás számítása a Green and Ampt módszerrel történt:

$$f_t = K \cdot \left[1 + \frac{(\phi - \theta_i) S_f}{F_t} \right]$$

Ahol K [mm/h] – talaj vízvezető képessége, S_f [cm] – elszívás, ϕ – porozitás, θ – nedvességtartalom, F_t [cm– időben változó kumulált veszteség

Felhasználva az 1. táblázatban megadott, talajtípusokra vonatkozó értékeket (Rawis et al., 1982), a talajtani jellemzőket K értékének függvényében lettek meghatározva.

| | Porozitás | Residuális víztartalom | Porozitás-Residuális víztartalom | Vízkapacitás | S_f [mm] | K [mm/h] | Szemcseeloszlás |
|---------------|-----------|------------------------|----------------------------------|--------------|------------|------------|-----------------|
| Homokos iszap | 0.453 | 0.041 | 0.358 | 0.207 | 222 | 25.908 | 0.378 |

táblázat 1.: Talajjellemzők

3. Módszertan

A hidrodinamikai lefolyás modell felépítéséhez figyelembe kell venni a felszíni lefolyás mellett a vízgyűjtőre kiterjeszhető veszteségek számítását is. Tehát minél részletesebb képet kell kapni a lefolyásviszonyokról a rendszerben tározódó vízmennyiség becslése mellett. A felszíni lefolyás meghatározásánál a cél a hidrológia folyamatok minél részletesebb megértése, a felszíni lefolyás koncepciók modelljének felállítása, illetve modellezési módszertan kialakítása. Így, az eljárás a későbbiekben kiterjeszhető lehet más villámár kockázattal terhelt vízgyűjtőkre.

3.1. Hidrodinamikai modell

A lefolyás 2D, véges-térfogat módszer alapú számítása, Riemann-probléma megoldása rácshálón. A legmegfelelőbb a sekélyvízi egyenletek teljes alakjának (SVE) diszkrét közelítése. A megoldás

pontosságának növeléséhez örvényviszkózitás számításának hozzárendelésével (Huang et. Al, 2015).

A modellszámítás HEC-RAS környezetben készült, ahol a teljes SVE módszer még a 0,1 másodperces időlépés mellett is nagy instabilitást mutatott. A HEC-RAS jelenlegi verziója felkínálja a diffúz hullámegyenlet alkalmazását, azonban ebben az esetben várható az összegyülekezés, ezáltal a tetőző hozam alulbecslése. A program már felajánlja az ún. „local inertia” megoldás lehetőségét, a sekélyvízi egyenletek alábbi módosításával:

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (V \cdot \nabla)V + f_c k \times V = -g \nabla z_s + \frac{1}{h} \nabla \cdot (v_t h \nabla V) - \frac{\tau_b}{\rho R} + \frac{\tau_s}{\rho h}$$

Ahol V [m/s] – sebességkomponensek x-y irányban, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right)$ - nabla-operátor x-y irányban, g [m/s²] – nehézségi gyorsulás, ∇z_s [m, mB.f.] – vízfelszín geodetikus szint hely szerinti változása, v_t [m²/s] – horizontális örvényviszkózitási tenzor, τ_b [N/m²] - fenékcúsztató feszültség, R [m] – hidraulikus sugár, τ_{sy} [N/m²] – szél keltette feszültség a felszínen (jelen modellben nem használt), h [m] – vízoszlop magasság, f_c [1/s] – Coriolis paraméter (program alapbeállítását használva), k – egységvektor, ρ [kg/m³] – víz sűrűsége

Örvényviszkózitás számítása, Smagorinsky-Lilly – féle turbulenciamodell:

$$\vartheta_t = D u_* h + (C_s \Delta)^2 |\bar{S}|$$

Ahol v_t [m²/s] – örvényviszkózitás, D – elkeveredési tényező tenzora, u^* [m/s] – középsebesség a mederfenék közelében, h [m] – vízmélység az adott cellában, C_s – Smagorinsky-tényező (~0,005-0,2), Δ [m] – szűrőmezőszélesség, megegyezik a lokális rácsfelbontással, S [1/s] – alakváltozás időbeli változásának vektora.

A módszer lényege, hogy a sekélyvízi egyenletekből a modell kiküszöböli a nemlineáris advekciót, megtartva a sekélyvízi egyenletek megoldási struktúráját. Azonban a modellszámítás így hozzátétőleg 30%-al stabilabbá válik (Brunner, 2020).

A módszer pontosságában Almeida és Bates 2013-as modellkísérletei alapján a diffúz hullámegyenlet és a teljes dinamikai egyenlet közé helyezhető. Összevetve SVE megoldással a pontosság nagy a $0,1 < Fr < 0,5$ tartományban, felette és rohanó vízmozgás esetén a local inertia megoldása a cellákban számított vízoszlopmagasság alulbecsli az SVE alapú megoldást, de összességében megfelelően közelíti azt (Almeida, Bates, 2013).

A modell illetően várható hibája nem befolyásolja az előntéses területek kiterjedésének becslését, illetve a felszínen lefolyó vízhozamot az alsó területen, ezért a modell stabilitásának megőrzése miatt elfogadható. Részletesebb elemzésnél, például a meder tervezéstámogató modellezésénél, erózió számításánál célszerűbb kisebb kiterjedésű, az SVE megoldást követő lokális modelleket felvenni.

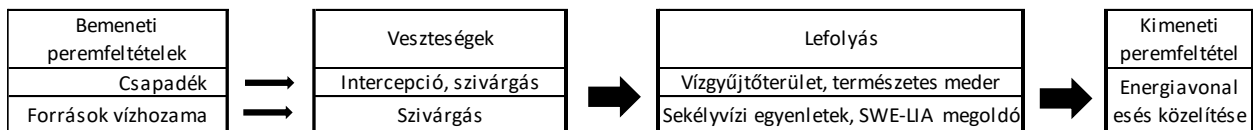
3.2. Modell felépítés

A 8. ábra mutatja a modell szerkezetét. A bemeneti peremfeltételek a források hozamából (állandó) és a csapadékból (esemény) épülnek fel. A modellben a mederbeli vízmozgás vesztesége a szivárgás. A szivárgási veszteség hatással van a csapadék okozta felszíni lefolyásra, a csapadék esetében ezt megelőzi az intercepció okozta tározódó vízmennyiség levonása. A szivárgást a telítetlen talaj kalibrált paramétere határozzák meg.

A veszteségek számítása után indul meg a felszíni lefolyás véges térfogat alapú, 2D számítási rácshálón, kalibrálva a felszíni érdességet leíró Manning együtthatóra.

A kifolyási peremen az energiavonal esésének közelítése került alkalmazásra. Előzetes modellfuttatások alapján a Rák-patakon, a modell kifolyási szelvényének környezetében a mederfenék esésével az energiavonal esése megfelelően közelíthető.

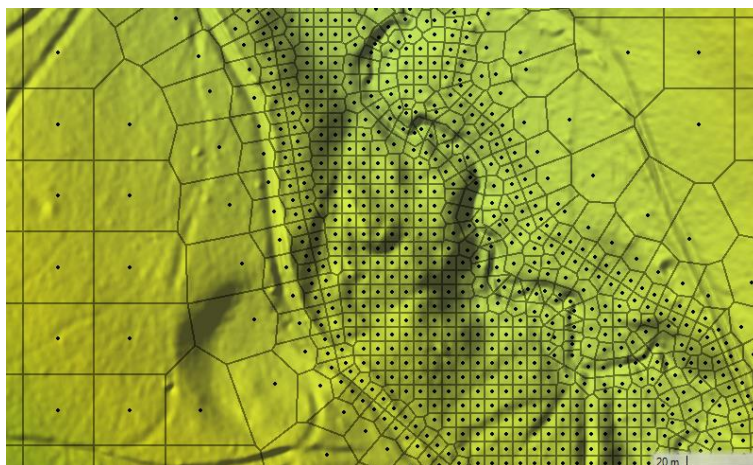
A felszíni lefolyás folyamataira az alábbi koncepcionális modell alakítottuk ki:



8. ábra: Modell koncepcionális felépítése

3.3. Modell geometria

A számítás strukturálatlan rácshálón történt. A rácsháló leköveti a terepi változásokat, a mederszakaszok vonalát, a homogén felületeken nagyobb cellaterület alkalmazásával (9. ábra). Mivel a vízgyűjtő kicsi, ezért megengedhető a nagyobb felbontás alkalmazása, így a rácsméret ~5-20 m²-es cellákból épül fel. A szimulációk során látható volt, hogy a stabilitás miatt szükséges is a nagy rácsfelbontás.



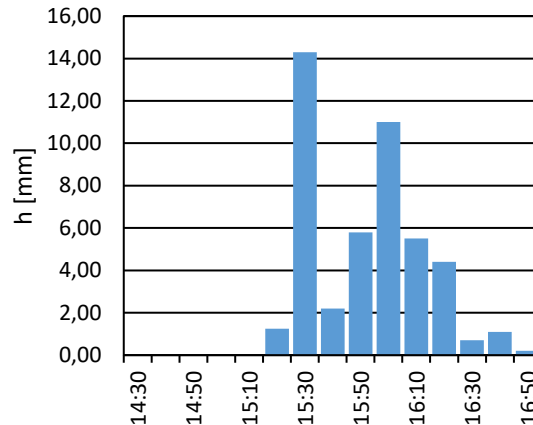
ábra 9.: Számítási rácsháló felvétele a DTM-en

3.4. Peremfeltételek

A peremfeltételek az alábbiak szerint épülnek fel:

- Bemeneti peremfeltétel: csapadékidősr [mm] az intercepció [mm] mennyiségének levonása után
- Kifolyási peremfeltétel: energiavonal esésének közelítése.

A csapadékidősr, az intercepció okozta tározódó mennyiség levonása után:



ábra 10.: Modellhez használt csapadékidősr az intercepció hatásával

A kifolyási peremen környezetében a vízhozam idősr mellett vízállásrögzítések is történtek, ezek a vízállások a mérőbukóra vonatkoznak, de a kifolyási szelvény felvétele indokoltabb volt valamivel lejjebb, a Rák-patak medrében. Így a kifolyási peremen az energiavonal esésének mederfenék eséssel való közelítése volt a legcélszerűbb ($S_e \sim S_0$). Jelen esetben ennek értéke 0,015.

3.5. Kiindulási feltételek

A mérések alapján a három forrás kisvízi hozama a modellezés időszakában $\sim 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$. A modell „warm-up” periódusában ez a mennyiség kezdeti feltételnek tekinthető, a mérési ponton a vízmélység 0,042 m. A modellidő a csapadékesemény előtt kezdődik, ebben az időszakban csak a források hozama van jelen a rendszerben.

A mérések szerint a hozam állandó, a modellezési időszakban is folyamatosan jelen van.

4. Eredmények

Miután a modell az esemény szimulációját elvégezte érzékenységvizsgálat került elvégzésre. A kifolyási hozamhoz való kalibráláskor is tapasztalható volt, hogy várhatóan a telítetlen talaj nagy szerephez jut a teljes felszíni lefolyás meghatározásában. A talaj hatásához érzékenységvizsgálat készült, amely a talaj vízáteresztő képességére és a kezdeti víztartalomra koncentrált.

4.1. Kalibrálás

A vízgyűjtőterületen ugyan hidrometeorológiai és hidrológiai mérések rendelkezésre álltak, a lefolyás paramétereinek meghatározásához szakirodalomban (Brunner, 2020) előírányzott intervallumokra lehetett támaszkodni. A modell kalibrálásához az alábbi paraméterek beállítására volt szükség:

- Meder érdességi együtthatója és a vízzáróság százalékos területi arányának meghatározása, átereszek adatainak megfelelő felvétele a felületmodell és terepi adatok alapján
- Talaj paramétereinek meghatározása a Green and Ampt módszerhez

4.1.1. Felszín

| | n [s/m ^{1/3}] - javasolt | n [s/m ^{1/3}] - kalibrált | vízzáróság [%] |
|-------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------|
| Meder | 0,03-0,05 | 0,03 | 10 |
| Rét | 0,15-0,2 | 0,15 | 5 |
| Erdő | 0,16-0,3 | 0,16 | 5 |

táblázat 2.: Manning együtthatók a területhasználat alapján

4.1.2. Talaj

A területhasználat alapján elkülönített, területátlagolt talajjellemzők, K függvényében meghatározva, ahol a K értékekhez (Rawis et al., 1982) regresszióval lettek hozzárendelve a talajparaméterek:

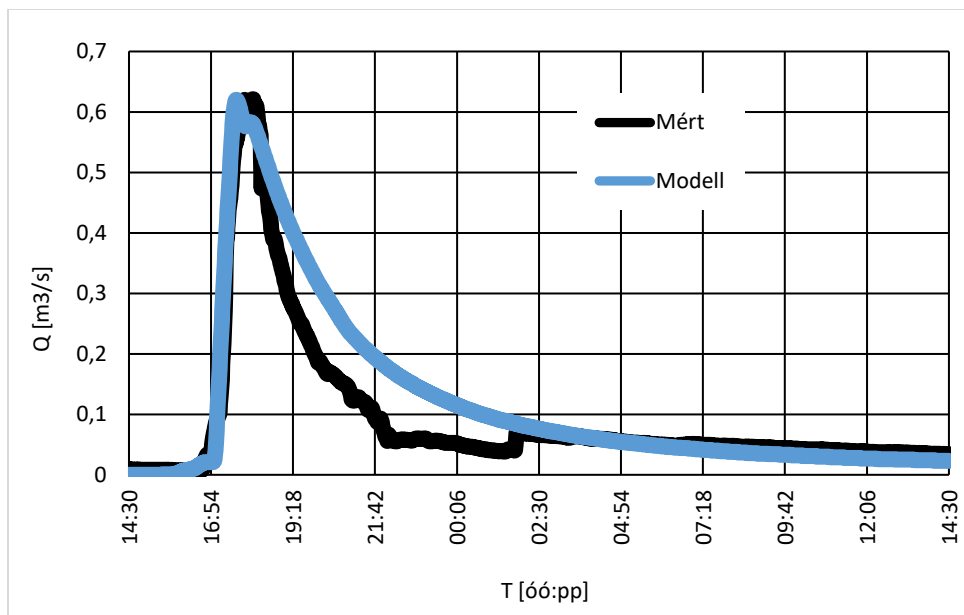
| | K [mm/h] | S _f [mm] | Kezdeti víztartalom | Telített víztartalom | Visszamaradó vízmennyiség | Pórusméret |
|-------|----------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------------|------------|
| Erdő | 26,67 | 219,0409 | 0,1787 | 0,3529 | 0,0314 | 0,3955 |
| Rét | 15,67 | 261,7631 | 0,2031 | 0,3330 | 0,0355 | 0,3474 |
| Meder | 100 | 140,6724 | 0,1300 | 0,4023 | 0,0232 | 0,5458 |

táblázat 3.: K függvényében meghatározott talajparaméterek a Green and Ampt módszerhez

4.1.3. Modell kiértékelés

A kiértékelés a 7. ábrán bemutatott mérőállomás bukóján mért értékekre történt. Nagy csapadék hatására a vízmegállásos helyek, elöntéses területek alakulása várhatóan megfelelő. Természetesen a modellgeometria kialakításánál figyelmet kellett fordítani arra, hogy se a rácsháló kiosztása, átereszek geometriájának megadása miatt ne alakuljon ki hibás vízmegállás, ami miatt a modell hibás eredményt produkálna. A DTM felbontása nagy, ezért a megfelelő geometriai elemek a terepi bejárások tapasztalataival kiegészítve megfelelően illeszthetőek voltak.

A modell kifolyási peremén a mérttel összevetve az alábbi kifolyási hozam alakul ki:



11. ábra: Mért- és számított vízhozamidősorok összevetése a mérőbukó (2012.07.06-2012.07.07)

Az áradó ág és a tetőzés közelítése megfelelő, az apadó ág esetében eltérés látható. A Nash-Sutcliffe – féle arány és a térfogathiba az alábbiak szerint alakul:

| | |
|----------|------|
| NSE | 0,82 |
| Térfogat | 0,26 |

táblázat 4.: Modell megbízhatósága és térfogathibája

Megjegyzendő ugyanakkor, hogy vélhetően a mérőbukón uszadék időszakos fennakadása miatt, ahogy 00:00 óra környékén is látható, a mérések emiatt az apadáskor egy szakaszon nem voltak pontosak, így a valós hiba ennél kisebb.

4.2. Érzékenységvizsgálat

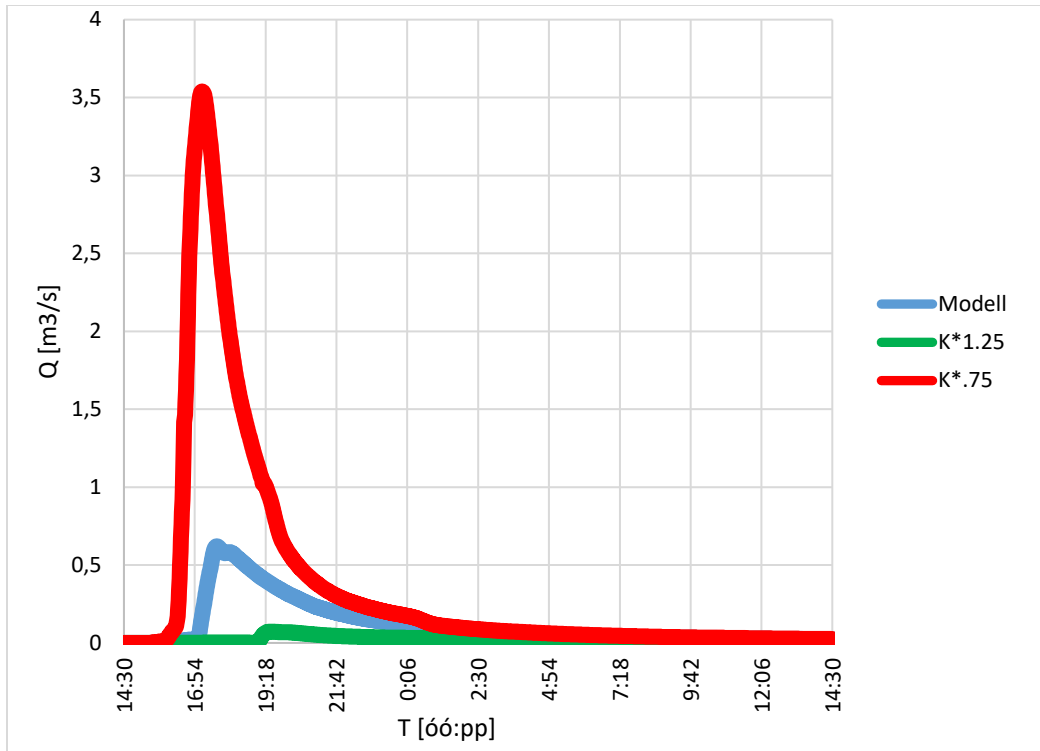
Az érzékenység vizsgálat során megvizsgáltuk, hogy mely bementi paraméterek lesznek a legnagyobb hatással a kifolyási vízhozam idősorra. Az elvégzett érzékenységvizsgálatok közül alábbiakban a talajjal kapcsolatos, veszteségre fókuszáló érzékenységek kerülnek bemutatásra. Az érzékenységvizsgálatok során az erdőterületeken a talajhidrológia paraméterek, és a kezdeti feltételek változtatásának hatását vizsgáltuk. A paraméterek közül a K érték, illetve a kezdeti víztartalom érzékenysége kerül bemutatásra, a többi paraméter hatása lényegesen kisebb volt.

4.2.1. Vízvezető képesség

Mindkét esetben a vízvezető képesség értékét $\pm 25\%$ -kal változtattuk.

| Kalibrált érték (mm/h ϵ) | 25% növelt | 25% csökkentett |
|------------------------------------|------------|-----------------|
| 26,67 | 33,33 | 17,74 |

táblázat 5.: Kalibrált K érték és kimozdított értékei



12. ábra: Érzékenységvizsgálat kiértékelése a mérőbukón a K együtthatóra

Látható, hogy a modell nagyon érzékenyen reagál a K érték változtatására. Annak ellenére, hogy 25%-al lett megváltoztatva a vízvezetőképesség értéke, mindkét irányban nagyságrendi eltérés tapasztalható az eredményekben. Ha a vízáteresztő képesség csökken, akkor $3,53 \text{ m}^3/\text{s}$, míg növelése esetén $0,07 \text{ m}^3/\text{s}$ a tetőző hozam. Az áradó ág meredeksége hasonló.

Kiindulva a korábban ismertetett értékekből, látható, hogy a 26,67 -es érték kimozdítása nem is jelent markáns talajtípusra vonatkoztatva változást, a kimozdított értékek is a homokos-iszap frakcióra jellemzőek.

| | K [mm/h] |
|---------------|----------|
| Iszapos homok | 61.214 |
| Homokos iszap | 25.908 |
| Iszap | 13.208 |

táblázat 6.: Talajtípusok a kalibrált érték környezetében, a kalibrált érték a homokos-iszap frakcióhoz közelít

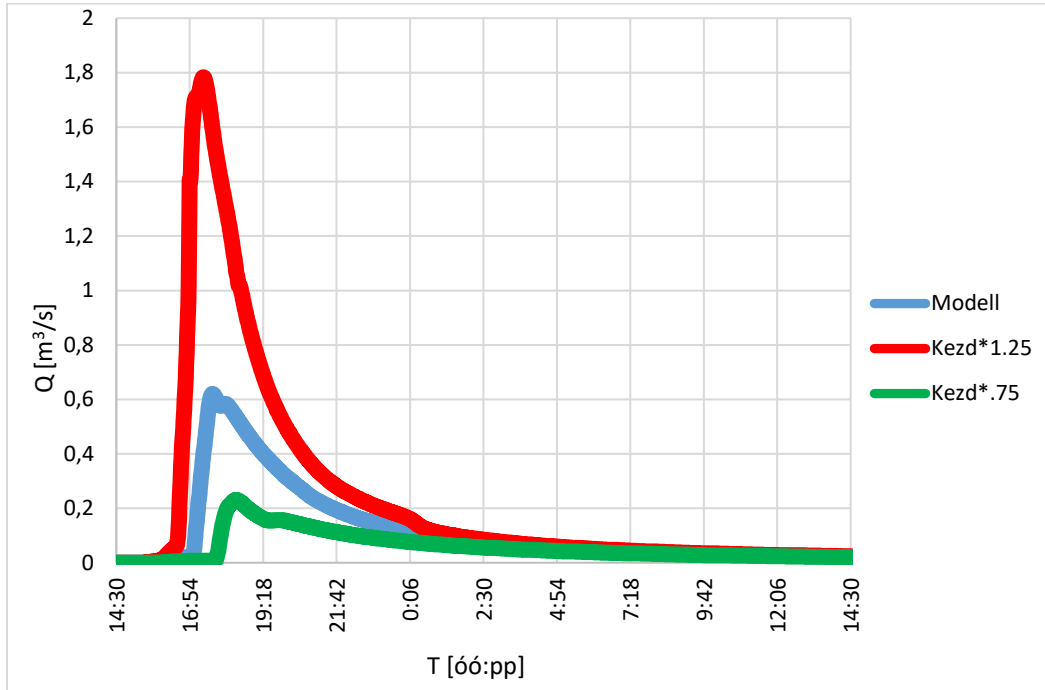
A paraméter a teljes modell érzékenysége szempontjából kitüntetett szereppel bír.

4.2.2. Kezdeti telítettség

Mindkét esetben a vízvezető képességhez hasonlóan a kezdeti víztartalom értékét $\pm 25\%$ -kal változtattuk.

| Kalibrált érték (mm/hr) | 25% növelt | 25% csökkentett |
|-------------------------|------------|-----------------|
| 0,1787 | 0,2234 | 0,134 |

táblázat 7.: Kalibrált kezdeti víztartalom és kimozdított értékei



13. ábra: Érzékenységvizsgálat kiértékelése a mérőbukón a kezdeti telítettségre

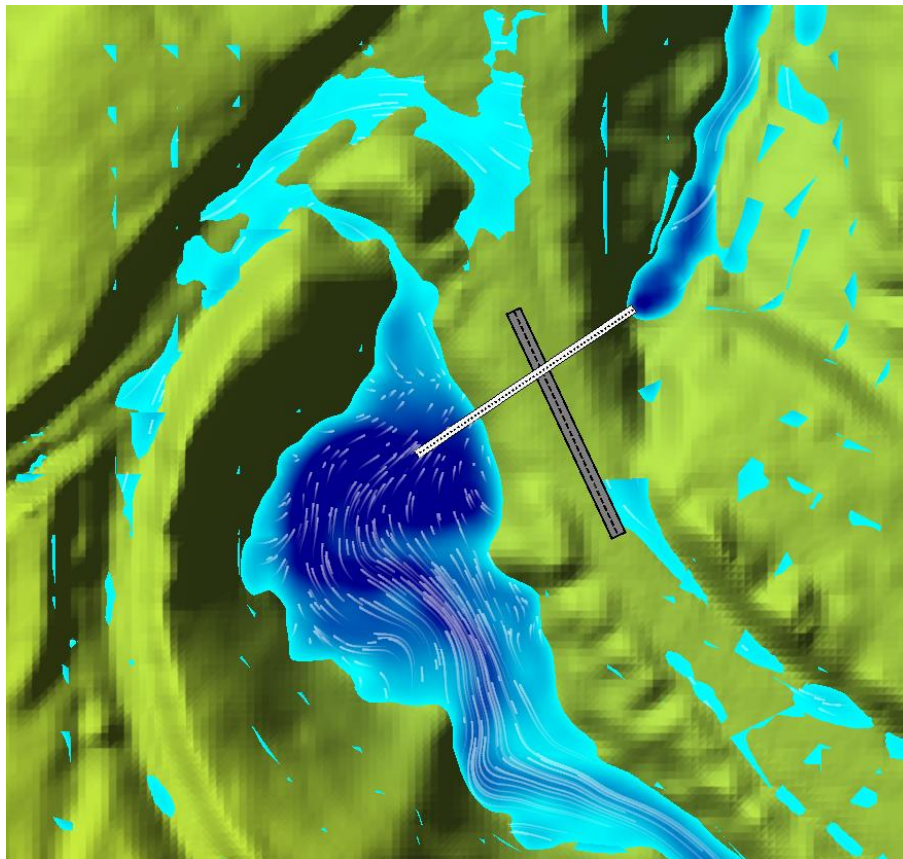
A kezdeti telítettség kimozdítása, bár nem olyan drasztikus mértékben, de markáns hatással van a kifolyási vízhozamra. A kialakuló eltérések a tetőző vízhozam tekintetében mindkét irányban hozzávetőleg fele akkora, mint a K esetében, de látható, hogy az eltérés így is jelentős. Az áradó ág meredeksége ebből adódóan még jobban hasonlít a kalibrált modellhez. Az áradás kezdete, ha nem is olyan mértékben, mint a K esetében, ugyanúgy eltér, de hatása kisebb az összegyülekezési időre.

5. Összegzés

A modellvizsgálat célja a villámár veszélyes vízgyűjtőkkel kapcsolatos problémák módszertani feltárása. Cél meghatározni azokat a paramétereket, amelyek a teljes vízgyűjtőrendszer érzékenységét meghatározzák, azaz melyik az a paraméter, amely kalibrált értékének a csekélyebb kimozdítására is intenzíven reagál. A modell részletességével nő azon paraméterek száma is, amelyek érzékenyek lehetnek és bizonytalanságot okozhatnak. Emiatt, ahol lehet uniform értékek használata javasolt a veszteségek számításánál.

5.1. Konklúzió

- A hidrodinamikai modellek alkalmazása kisvízgyűjtők villámárvíz levonulással kapcsolatos vizsgálatára megfelelő módszer. A felszíni lefolyás számításához szükséges vagy a sekélyvízi egyenletek, vagy azt megfelelően közelítő számítások alkalmazása a lokális hatások (műtárgyak, vízborítottság stb.) megfelelő hidraulikai számításával.
- A hidrodinamikai modellezés részletes képet ad a vízgyűjtő elöntésviszonyairól, amelyek alapján egyrészt következtetni lehet lokális hatásmechanizmusok befolyásoló szerepére (14. ábra), emellett a tervezéstámogatás nagy felbontásban.



14. ábra: Lefolyásviszonyok alakulása műtárgy környezetében

- Vízgyűjtő szintű vizsgálatnál csak a felszíni lefolyás kalibrálása nem elégséges, szükség van a veszteségek megfelelő definiálására.
- A telítetlen talaj paramétereit között találhatóak olyan paraméterek, amelyek kimozdítására a modell intenzíven reagál.
- A kezdeti telítettség mértéke hatással van az összegyülekezésre és a tetőző hozamra. A kezdeti telítettség megválasztását segíti egy adott csapadékesemény szimulálásakor a megelőző csapadékok óta eltelt idő. A talaj vízáteresztőképességét figyelembe véve lehet következtetni arra, hogy a vizsgált eseménykor milyen mértékű a kezdeti víztartalom, ezáltal a kezdeti feltétel hibatarományát csökkenthető.

- A vízáteresztő képesség a kezdeti víztartalomhoz képest jelentősebb eltéréseket okoz. Ez az eltérés kötött talajok esetében, a jelentősen kisebb K érték miatt kisebb. Minél szemcsésebb frakcióhoz tartozó talajszerkezet építi fel a felső talajréteget, annál nagyobb bizonytalanságra lehet számítani. Emiatt célszerű a talajtípusok területi átlagolását felhasználni a területhasználat (természetes vízgyűjtőknél a növényzet hatását is figyelembe véve) eloszlása mentén. Így a talaj paramétereinek okozta bizonytalanság kezelhetővé válik.
- Az intercepció hatása természetes vízgyűjtőn nem elhanyagolható. További vizsgálatok tárgyát kell, hogy képezze a természetes vízgyűjtőn az avar és az aljnövényzet tározókapacitásának hatása, amely kulcsfontosságúvá válhat a szivárgási veszteségek definiálása szempontjából.

6. Irodalomjegyzék

OVF (2021): Racionális méretezési módszer felülvizsgálata, <https://www.ovf.hu/hu/dea0f3e6-97bb-4b73-969e-990cbcdc8d09>, tartalomfelelős: Dr Balatonyi László

Koris et al. (2021): Magyarország kisvízfolyásainak árvizei, Országos Vízügyi Főigazgatóság, Budapest

Ámon G., Bene K. (2023): Impact of different rainfall events on overland flow using a 2D hydrodynamical model on a steep-sloped watershed, *EGU General Assembly*, Bécs

4STREAM Mérnöki Kft. (2022): Püspökszilágy, Szilágyi- és Gombás-patakok vízgyűjtőinek lefolyásmodellje a LIFE Logos4Water keretében (Készült Püspökszilágy Önkormányzatának megbízásából), felelős tervező: Ámon Gergely, Győr

Ámon G., Bene K. (2023): Rainfall Duration and Parameter Sensitivity on Flash-Flood at a Steep Watershed, *Pollack Periodica*, DOI:10.1556/606.2022.00713

Ámon G., Bene K. (2023): Impact of hydrological, hydraulic modelling approach to a flash flood event in the Hidegvíz watershed in Hungary, *Hydrocaprpath Conference*, Bécs

Ámon G. (2017): Települési vízrendszerek tervezése modellezéssel, Dialóg Campus Kiadó, 108-117 o.

Gribowski et al. (2012): Hidegvíz Valley Experimental Watershed, *Soproni Egyetem*, Sopron

Laborczi A, Szatmári G, Kaposi A D, Pásztor L. (2018). Comparison of soil texture maps synthesized from standard depth layers with directly compiled products. *Geoderma*, DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.01.020

Szatmári, G. and Pásztor, L. (2018): Comparison of various uncertainty modelling approaches based on geostatistics and machine learning algorithms, *Geoderma*, doi:10.1016/j.geoderma.2018.09.008, 2018.

Kucsara M., Gribowszki Z. (2014): Az intercepció vizsgálata és számszerűsítése, csapadékeseményhez kötött modellel, *kutatási beszámoló, Soproni Egyetem*, Sopron

Rawis et al (1982): USACE EM 1110-2-1417 and Estimation of Soil Water Properties, *Szabvány*, Washington

Huang W. et al. (2015): Full 2D Hydrodynamic Modelling of Rainfall-induced Flash Floods, *Journal of Mountain Science* 12(5), 1203-1218 o.

Brunner G. W. (2020): HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual, US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, California

G. Almeida, P. Bates (2013): Applicability of the local inertial approximation of the shallow water equations to flood modeling, WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 49, 4833–4844, doi:10.1002/wrcr.20366