

Talajfelszíni és digitális téradatokkal bővített lefolyásmodell összehasonlítása hagyományos lefolyásmodellekkel

Dobai András¹, Bíró Tibor², Deák Tamás¹, Dobos Endre¹

¹ Miskolci Egyetem, Műszaki Föld-és Környezettudományi Kar, Földrajz-Geoinformatika Intézet (e-mail: andras.dobai@uni-miskolc.hu, endre.dobos@uni-miskolc.hu, tamas.deak@uni-miskolc.hu)

² Nemzeti Községi Egyetem, Környezeti Fenntarthatósági Intézet, (e-mail: biro.tibor@uni-nke.hu)

DOI: 10.59258/hk.20916



Kivonat

A villámárvizek kezelése napjaink egyik legsürgetőbb vízgazdálkodási kihívásai közé tartozik, különösen a kisvízgyűjtők területein, ahol a rövid ideig tartó, de intenzív csapadékesemények aránytalanul nagy károkat okozhatnak. Kialakulásuk szorosan összefügg a domborzattal, a talaj vízháztartási tulajdonságaival és a felszínborítással, így előrejelzésük komplex, több tudományágat érintő feladat. Az éghajlatváltozás miatt egyre gyakoribbá és hevesebbé váló csapadékesemények szükségessé teszik olyan modellezési módszerek alkalmazását, amelyek a vízgyűjtők fizikai jellemzői mellett a területi érzékenységet is figyelembe veszik. A hazai vízepítési gyakorlat a hidrológiai modellek és empirikus módszerek széles eszköztárát alkalmazza, ugyanakkor a pontosabb előrejelzésekhez elengedhetetlen a villámárvíz-érzékeny területek térképezése, az érintett vízgyűjtők értékelése és a várható vízhozamok becslése. Jelen kutatás a Cseres-völgy vízgyűjtőjét mutatja be, amely a helyi vízkáresemények és a kockázatértékelési eredmények alapján magas kockázatú területnek számít. A vizsgálat célja a várható vízhozamok meghatározása, valamint a Miskolci Egyetem által fejlesztett, térinformatikai és távérzékelési adatokra épülő lefolyásmodell tesztelése. A modell egyszerűen értelmezhető és parametrizálható eszközt kíván nyújtani az árvízi védekezés támogatásához.

Kulcsszavak

Villámárvíz, HEC-HMS, térinformatika (GIS), digitális talajtérképezés, lefolyás modellezés.

Comparison of a runoff model enhanced with soil and digital spatial data to conventional runoff models

Abstract

Flash floods are among the most pressing contemporary challenges in water management, particularly in small catchment areas where short but intense rainfall events are associated with significant impact on the environment. Their occurrence is closely linked to topography, soil hydrological properties, and land cover, making their prediction a complex, interdisciplinary task. Due to climate change, extreme precipitation events are becoming more frequent and intense, necessitating modelling approaches that not only account for the physical characteristics of catchments but also incorporate spatial sensitivity. Although local hydraulic engineering practice relies on a wide range of hydrological models and empirical methods, accurate forecasting requires the mapping of flash flood-prone areas, the assessment of affected catchments, and the optimization of expected runoff volumes. In this study, the Cseres Valley catchment is presented, which has been classified as high-risk based on both actual flood events and risk assessment results. Expected runoff volumes are determined, and a runoff model developed at the University of Miskolc—based on geographic information systems (GIS) and remote sensing data—is tested. The model is intended to serve as an easily interpretable and parameterizable tool for supporting flood risk management and decision-making.

Keywords

Flash-flood, HEC-HMS, GIS, digital soil mapping (DSM), runoff modelling.

BEVEZETÉS

A villámárvizek jelenségének az elmúlt évtizedekben megnövekedett gyakorisága a vízgazdálkodás, az árvízvédelem, valamint a települési vízrendezés egyik legsürgetőbb kihívásává vált, különösen a kisvízgyűjtők területein, ahol a gyors lefolyású, rövid ideig tartó, de rendkívül intenzív csapadékesemények súlyos károkat okozhatnak. Ezek az események jellemzően kis területre korlátozódnak, azonban hatásuk – például hirtelen vízszintemelkedés, jelentős talajerózió vagy infrastruktúrát ért károsodás – aránytalanul nagy lehet. Mindezek alapján szükséges egy komplex szemléletű, de könnyen kezelhető, tervezést támogató keretrendszer létrehozása a hazai felszínborítási és talajtulajdonságok (pl. talajok fizikai, kémiai tulajdonságai) integrálásával. A kisvízgyűjtők hidrológiai tulajdonságaihoz illeszkedő és azok meteorológiai, valamint talajtani paramétereit folyamatosan bővítő modellek története hazánkban

Bogdánfy Ödön munkásságától napjainkig, már több mint 110 éves múltat tekint vissza. A témában kutatók közös megállapítása, hogy a csapadék intenzitása nagymértékben meghatározza a kisvízgyűjtőkön levonuló árhullámok fajlagos vízmennyiségét, majd ezek alapján megalkották a mértékadó árvíz fogalmát (*Koris 2021*). A víztudományi kutatások folyamatosan figyelemmel kísérték és implementálták a talajtan által alkalmazott módszertanokat és azok eredményeit, azonban a XX. század második felében, a nagyüzemi mezőgazdaság megjelenésével, egyre nagyobb hangsúlyt kapott a talajok tulajdonságainak mezőgazdasági célú értelmezése, így a hegy- és dombvidéki területek talajainak leírása háttérbe szorult. A hidrológia és a talajtan a digitális adatbázisok korában is kapcsolatban maradtak, ennek a kiemelt példája az 1:25 000 léptékű Kreybig Lajos-féle (ma már digitálisan is elérhető) talajtérkép (*URL5*), amely figyelembe veszi a talajhasználati

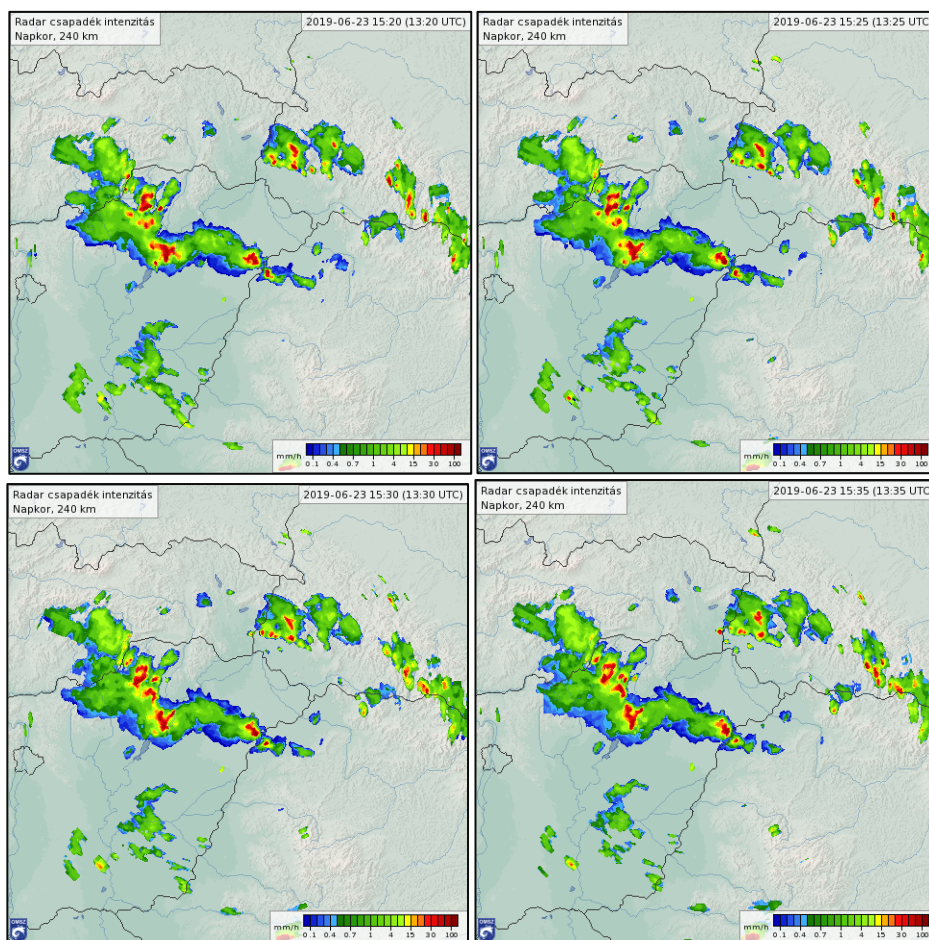
szempontokat is, ezért a mai napig értékes kiindulópontot jelenthet mind a mezőgazdasági tervezésben, mind pedig a környezeti és hidrológiai modellezésekben (*Zsuffa 1997, Pásztor és társai 2010*).

Napjainkban a tervezési vízhozam meghatározása az Országos Vízügyi Főigazgatóság (OVF) főigazgatósági utasításában rögzített racionális méretezési módszere tekinthető irányadónak. A tervező mérnök jogosult a módszertan megválasztására, amelyhez a rendelkezésre álló csapadék- és vízhozamidősorok, továbbá az ezekből származtatható statisztikai adatok szolgálnak alapul. Általános gyakorlat szerint belterületen $Q_{3\%}$ -os, külterületen $Q_{10\%}$ -os tervezési vízhozamot kell figyelembe venni, ugyanakkor minden tervezési feladat egyedi mérlegelést igényelhet. Az adott vízgyűjtőről származó ismeretanyag alapján empirikus alapokon nyugvó, vázlatos (pl.: racionális módszer, OVF-segédlet), illetve részletesebb (pl.: egységárhullámkép) eredményt adó hidrológiai modellek alkalmazhatók a tervezési vízhozam meghatározásakor (*OVF 2024a, OVF 2024b, Koris 2002*). Ezen módszertanokban foglalt várható vízhozam tartományok ellenére, a szélsőséges csapadékeseményekkel járó villámárvizek továbbra is növelik a műszaki bizonytalanságot, ezért a pontos tervezhetőséghez egyre több rendelkezésre álló téradat bevonása szükséges. Ezen adatcsoportok számszerűsítéséhez szükséges a vízgyűjtő villámárvíz-kockázatának térképezése (*Czigány és társai 2009, Sarkadi és társai 2022, Dobai és Dobos 2025*). A lefolyásmodellezés bemeneti adatainak minőségét nagyban növelhetik a kockázati térképezés során felhasznált felszínleíró (pl.: digitális domborzatmodell), valamint távérzékelésből származó állományok (pl.: felszínborítás térképek). Ezek bevonása javítja a modellek pontosságát, bizonyos esetekben lehetővé téve akár teljes viharesemények rekonstrukcióját is (*Knebl és társai 2005, Aaron és Venkatesh 2009, Sabeti és társai 2024*).

A térképanyagok hazai vízgyűjtőkre való alkalmazása során először a magas kockázatú területek kerültek azonosításra, amelyeket az árvízi káresemények és az előzetes kockázati felmérések eredményei is megerősítettek. A magas kockázatú vízgyűjtők kijelölését követően a békeidőben megvalósítható, preventív jellegű védekezési lehetőségek vizsgálata következett egy ismert, magas kockázatú vízgyűjtőn (*Dobai és Dobos 2022*). A tanulmányban a szádlemezekből (U-profilú Larssen) kialakítható, többlepcsős szádfalsor alkalmazását értékeltük. Ez a módszer az

INTERREG-HUSK/2302/1.2/134-Floman elnevezésű projektben is szerepelt, amelynek kivitelezését a Havaria Kft. biztosította volna a projekt megvalósulása esetén. A magas kockázatú vízgyűjtők lokalizálása és az újszerű védekezési módszerek vizsgálata ellenére a villámárvizek jellemzői – például a mért vízhozam adatsorok és a csapadékinzintás hiánya – továbbra is jelentős bizonytalanságot okoznak a modellezésben. Azonban az élet- és vagyonvédelem érdekében fontos, hogy a digitális adatok fejlődésével a rendelkezésre álló információk segítségével felvázolásra kerüljenek az egyes viharesemények lehetséges forgatókönyvei. A műszaki bizonytalanság csökkentésében nagy segítséget nyújtott a rendelkezésre álló HungaroMet által készített 5 perces időbeli felbontású radarfelvétel (*1. ábra*), valamint az OVF éves hidrometeorológia jelentései. A szűken vett mintaterületen belül pedig, az ACQUIS Bt. által, 2020-ban készített „Kondó községben 2019. június 23-án bekövetkezett vis maior esemény okozta károsodások helyreállítása” elnevezésű terv dokumentációjában foglalt adatok voltak hasznosak (*ACQUIS 2020*). A mintaterület esetében a 2019. évi csapadékesemény volt az évtized utolsó, jelentősebb károkozással járó vihareseménye.

A területet érintő mezoskálájú konvektív rendszerek (MKR) viharaiából származó árhullámokról általánosságban elmondható, hogy a településen átfolyó Harica-patak a főmederben levonuló árhullámot képes levezetni, egyrészt a belterületi csapadékvíz elvezető rendszer megfelelő méretezése, másrészt a felvízi oldalon épített záportározónak köszönhetően (*ÉMKTVF 2013*). Jelentősebb károkozást a teljes medertelítettséget meghaladó, környező kisebb vízgyűjtőkből érkező, gyors sebességű többlet víz mennyiségek okoznak, amelyek így jelentős károkat okoznak a települési infrastruktúrában (épületek, magántulajdonú ingatlanok, utak, hidak). Ezek az árhullámok a Harica vízgyűjtő jobb parti mellékvízgyűjtőiből érkeznek, mivel a bal parti vízgyűjtőből (pl.: Varrom-p.) származó vízmennyiségek, a káreseményeket összefoglaló jelentések alapján nem számottevőek, továbbá a károkozás utca szintű azonosíthatósága alapján a vonulási útvonalai kikövetkeztethetők (*B.A.Z. MKI 2021*). Ezek a vízgyűjtők azonosításra, leírásra, valamint kockázati kategorizálásra kerültek, így a környék vízgyűjtői feltártnak minősülnek a villámárvíz szempontjából (*Dobai és Dobos 2022, Dobai és Dobos 2025*).



1. ábra. A 2019. 06. 23-án villámárvizet okozó viharzóna digitalizált radarképe (URL6)
Figure 1. The digitized radar image of the storm zone that caused a flash flood on 23 June 2019 (URL6)

Jelen vizsgálatunk tárgya a kockázati térképi adatbázis alapján lokalizálható, magas villámárvízi kockázatba tartozó Cseres-völgyből érkező vízhozam meghatározása, amely a Miskolci Egyetem Földrajz-Geoinformatika Intézetében fejlesztett ME-Hydrograph elnevezésű lefolyás-moddellel valósul meg. Az eredményeket a műszaki körben elfogadott, HEC-HMS szoftver SCS-CN, valamint Green & Ampt módszereivel kapott eredményekkel hasonlítottuk össze. Mindkét módszer képes a rövid idő alatt lejátszódó, intenzív csapadékesemények hidrológiai következményeinek megbízható meghatározására, ugyanakkor eltérő megközelítéseik biztosítják a modellezés pontosságát és rugalmasságát. Az SCS-CN módszer egyszerűsége és empirikus alapja révén előrejelzés tesz lehetővé, amely jól alkalmazható a vízgyűjtők átlagos viselkedésének értékelésére, miközben a hidrográf-generálás során figyelembe veszi a kezdeti veszteségeket és a tározási kapacitást. Ezzel szemben a Green & Ampt módszer fizikai alapú megközelítése a talajfizikai paraméterek – mint a telítési víztartalom, hidraulikus vezetőképesség és szívóhatás – figyelembevételével képes részletesebb beszivárgási folyamatokat modellezni, így a térbeli és időbeli változékonyságot is pontosabban leképezi. Az ME-Hydrograph a két módszer között helyezkedik el, ötvözve az empirikus és konceptuális megközelítéseket a térinformatikai eszközökkel. A modell osztott paraméterű felépítése lehetővé teszi, hogy a vízgyűjtő minden cellájára külön-külön számításokat végezzen, a digitális domborzatmodell (DEM), a DEM-ből származtatott felszínleíró állományok csoportja,

valamint a felszínborítás és a talajtani adatok integrálásával. Eseményalapú megközelítése ugyan bizonyos korlátokat szab a felhasználására, azonban képes egyszerre több kifolyási pontot is kezelni. A cellánkénti koncentrációs idő és a lefolyási útvonalak figyelembevétele lehetővé teszi a hidrográfok időbeli lefutásának és csúcspontjának meghatározását. A raszteres beszivárgási együttható réteg egyszerűsége ellenére hatékonyan integrálja a talaj és felszínviszonyok hatását, miközben a teljesen rácsalapú számítási struktúra lehetővé teszi az elöntési útvonalak és a kiterjedések vizualizálását.

A vizsgálatához szükséges a vízgyűjtő hidrológiai karakterizációja, valamint talajtani és felszínborítási jellemzőinek ismerete, így a következő lépésben megtörtént a vízgyűjtő talajtani felmérése, majd az ismert csapadékesemények alapján a várható vízhozam modellezése.

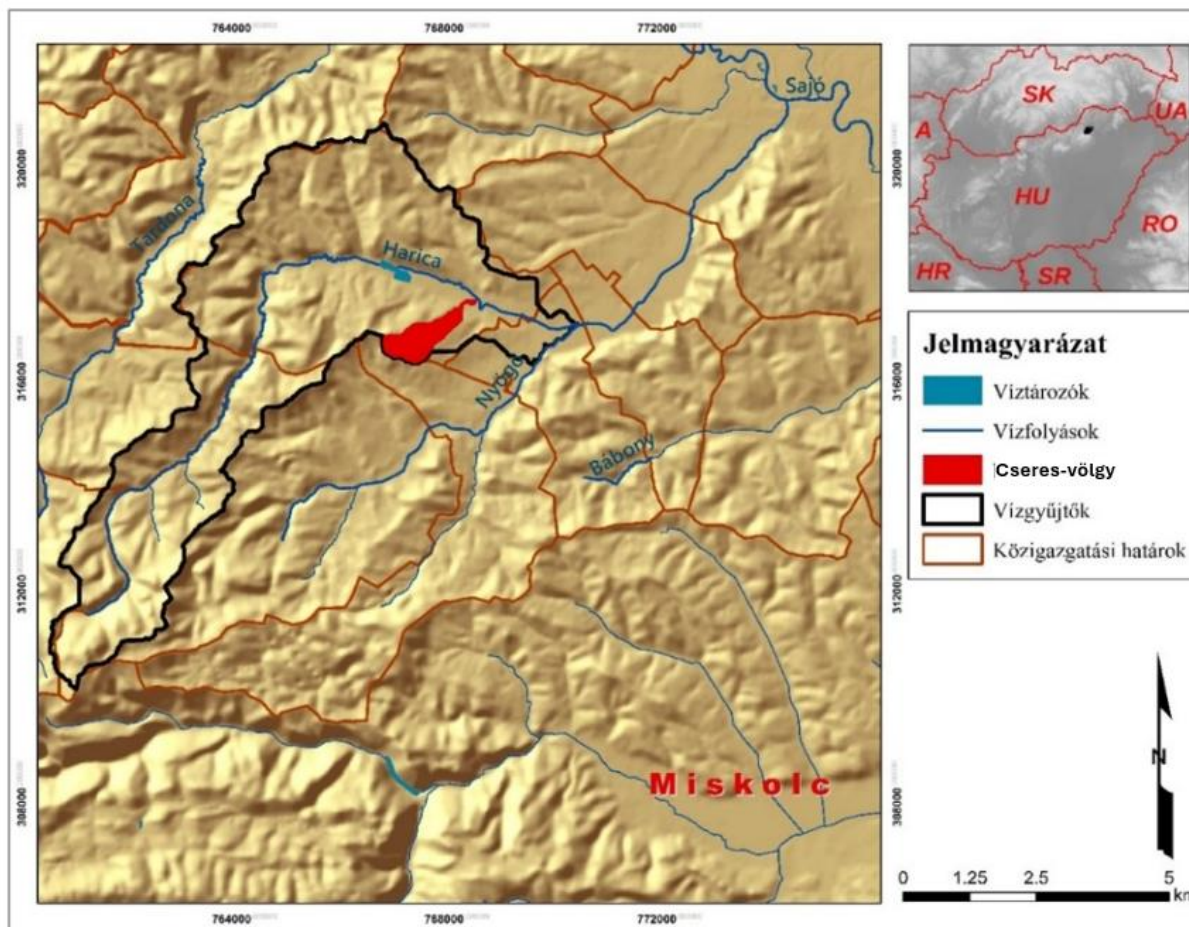
ANYAG ÉS MÓDSZER

Mintaterület

A mintaterületet képző Cseres-völgy a Harica jobb parti vízgyűjtőjében, Borsod-Abaúj-Zemplén vármegyében, Kondó település délnyugati határában található (2. ábra). A völgy, geológiailag az Észak-Borsodi szénmedencéhez tartozik, amelyben az eróziós diszkordanciával lerakódó neogén tengeri, valamint tavi üledékek rétegei találhatók (Kozák és Püspöki 1995, Kozák és társai 1998, Harangi 2001). A Cseres-völgy teljes területe az Egyházaskeregi Formációhoz (eMK) tartozik, a mélyben kavics-

konglomerátummal, amelyet homok, homokkő, a felszínen pedig finomabb iszap és agyagréteg fed (Gyalog 1996). A Cseres-völgy V-alakú, 1,6 km hosszú, 665 m széles, a völgytoroknál szűkül, vízgyűjtő területe 0,76 km². A patak köves, homokos medre helyenként 4-5 méter mély-

ségig vágódik be a felszínbe, relatív esése 7,17%. A völgyet különböző fejlettségű, esőzések okozta eróziós árkok kísérik, amelyek a mintaterületen a 2010 óta tavasztól őszig jelentkező időszakos villámárvizek által is formálódtak (Vágó 2012).



2. ábra. A Cseres-völgy mintaterület elhelyezkedése
Figure 2. Location of the Cseres-valley study area

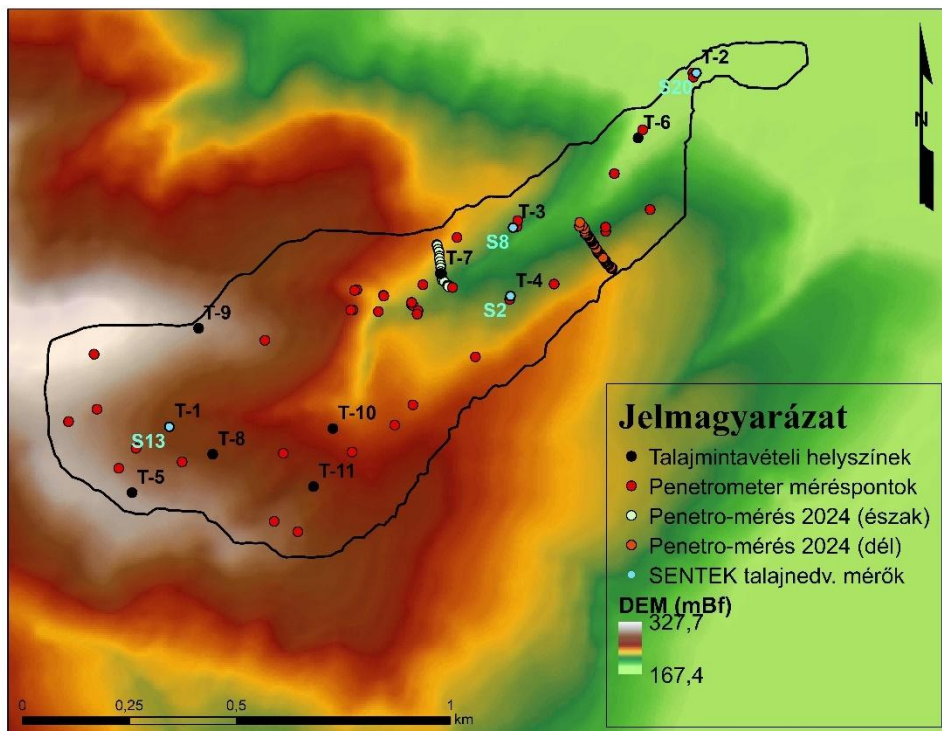
A morfometriai jellemzői alapján megállapítható, hogy a Cseres-völgy vízgyűjtője kis kiterjedésű, mindössze 0,76 km² területű egység, nyújtott formájú, amit a 3,17-es hossz-szélesség arány jelez, ez arra utal, hogy a vízfolyások gyorsan képesek lefolyni a gyűjtőterületről. A 0,21-es cirkularitási érték és az 1,61-es Gravelius-tényező szintén azt mutatja, hogy a vízgyűjtő közel sem kör alakú, inkább megnyúlt, csatornaszerű formát mutat, amely a lefolyás gyorsaságát növeli (Galgóczy 2004). A viszonylag meredek esés és a vízgyűjtő aszimmetrikus szerkezete tovább fokozza az árhullámok gyors kialakulásának lehetőségét, így a terület erősen érzékeny a hirtelen lehulló csapadék okozta villámárvizekre. A Horton-féle relatív lefolyási tényező ($R_f = 1,80$) közepesen sűrű vízhálózatra utal, amely szintén hozzájárulhat a gyors vízmozgáshoz. A völgy paramétereit alapján olyan vízgyűjtőként jellemezhető, amely esetében a geomorfológiai adottságok elősegítik az intenzív és gyors vízlefolást, ezáltal növelve a hidrológiai kockázatot. E feltételezést a kockázattérkékeléssel kapcsolatos tanulmányok is alátámasztották, mind a jelen, mind a környező vízgyűjtők esetében (Dobai és Dobos 2022).

A talajtani adatgyűjtés és talajadatok kiterjesztésének bemutatása

A Cseres-völgy az erdőtalajok zónájába esik, ahol barna erdőtalajok, réti, valamint öntésréti talajok altípusai azonosíthatók, köztük luvisolok (Alfisol), stagnic luvisolok (Eptiaqualfs) és gleysolok (Aqualfs). A laza üledékeken kialakult erdőtalajok a villámárvizek árhullámainak tompítása szempontjából kedvező feltételeket kínálhatnak, ugyanakkor a helytelen agrotechnika és földhasználat következtében kialakuló tömődött talajszerkezet jelentősen csökkentheti a kedvező hatásokat. A tömődöttség mértékének bemutatására penetrométeres méréseket végeztünk, amelyeket külön fejezetben tárgyalunk. A talajtulajdonságok számszerűsítését korlátozza, hogy a jelenleg elérhető talajtani adatbázisok (AGROTOPO) a megfelelő térbeli felbontás hiányában csupán egyetlen jellemző talajtípust, a Ramann-féle barna erdőtalajt (Luvisol) keresztül reprezentálják a vízgyűjtőt. Ez azonban nem tükrözi a területen előforduló talajok heterogenitását, és nem biztosítja a lefolyásmodellezéshez szükséges alapadatokat sem. Így a vizsgálathoz elengedhetlenné vált a terepi mintavételezésre alapozott digitális talajtérkép előállítás.

A talajszelvényeket a területre jellemző talajtípusok alapján jelöltük ki. A vizsgálat során összesen tizenegy ponton történt talajtani mintavételezés (3. ábra). A talajszelvényekből bolygatott és bolygatatlan talajmintákat vettünk, továbbá WET szenzorral a pillanatnyi talajnedvességi állapotokat rögzítettünk. A beszivárgási sebesség (K) meghatározására nyolc jellemző talajfolton alkalmaztuk a hagyományos, keretes módszert, valamint négy, kihelyezett Sentek talajnedvesség-szenzor helyszínén digitálisan regisztrált beöntözést is végeztünk. A szenzorok működésének lényege, hogy a talaj, a víz és a levegő dielektromos állandóiból (más néven relatív permittivitásból) térfogati víztartalmat számoljon, aminek mértékegysége térfogatszázalék (% v/v). A szenzor 10 centimétereként mér

talajnedvességet, a felső 10 cm-en pedig a hőmérsékletet is méri (Kibirige és Dobos 2021). A hagyományos módszer során egy 25×25 cm-es és egy 50×50 cm-es, élezett peremű, nyéllel ellátott fémkeretet süllyesztettünk a talajba 10 cm mélységig. A kereteket egyszerre töltöttük fel vízzel a 10 cm-es jelölésig, és a beöntési időt rögzítettük. A Sentek szenzorok esetében a talajnedvesség-változásokat a szenzor adattárolójából nyertük ki. A mérés során a külső keret állandó hidrosztatikai nyomást biztosított, hogy a belső keretben levő víz lefelé, a talaj mélyebb rétegei felé szivároгjon és ne oldalirányban távozzon. A külső keretet folyamatosan szinten tartva jegyeztük fel a belső keretben bekövetkező vízszintcsökkenést (Várallyay és Főrizs 1966).



3. ábra. A mintaterületen végzett terepi vizsgálatok helyszínei
Figure 3. Field survey locations within the study area

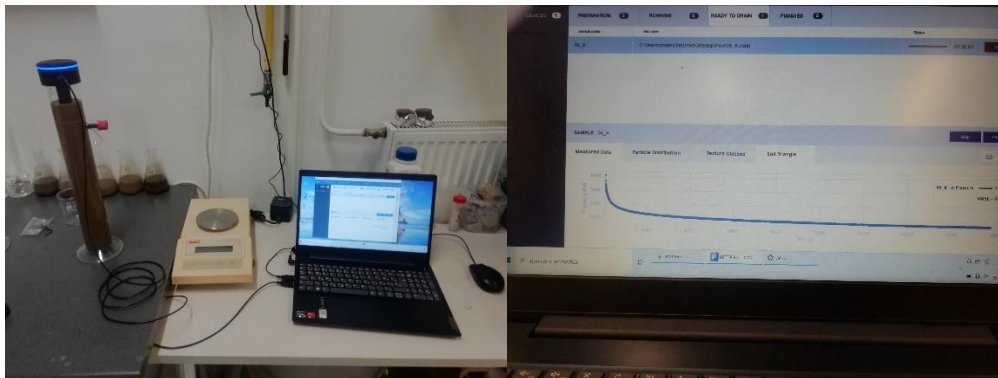
A talajszelvényekhez kapcsolódó terepi és laboratóriumi vizsgálatok idő- és költségvonzata magas, ezért a téma szempontjából fontos tömödöttség gyors és megbízható feltáráshoz a kérdéses talajfolton elektronikus talajvizsgáló nyomószondával talajellenállás mérést is végeztünk. A talaj penetrációs ellenállása az egyik leggyakrabban alkalmazott mutató a talaj fizikai minőségének és talajművelési rendszerek agronómiai értékelésében (Pedrotti és társai 2001, Dexter és társai 2007). Jelen kutatásban a hazai fejlesztésű Penetronik- márkájú elektronikus talajvizsgáló nyomószondát alkalmaztuk, amely segítségével 0-75 cm mélységek között, 2 cm-es lépésközzel regisztrálni lehet a talajfelszín mechanikai ellenállását és a termőréteg nedvességtartalmát a mélység függvényében. A műszer magassága 125 cm, a tartókeret 35 cm x 25 cm, a talajellenállást 0-10 MPa-ig, 50-500 N mérési erőtartományban, a talajnedvességet 0-50 tömeg %-ig méri. A műszer felépítése két függőleges rúdból, valamint a rúdon, mechanikus szerkezet segítségével mozgó műszerdobozból áll, amely az optoelektronikus jeladó segítségével a ta-

lajnedvességgel és a behatolás mélységével arányos villamos jelet képez. A mérési adatok SD-kártyára kerülnek, amely letöltés után alkalmas a számítógépes feldolgozásra (Daróczy és Lelkes 1999, Szőllősi 2003, URL1). A kutatás szempontjából a penetrométeres mérések lehetővé tették a talajművelés okozta tömödöttség mértékének bemutatását. A mintaterületen a vizsgálatokat az egyes évszakok közötti különbségek feltárása érdekében télen és nyáron is elvégeztük, továbbá az északi és déli kitettségű domboldalakon teljes lejtőhosszban végeztünk mérést az erodáltság mértékének tisztázásához, illetve az esetlegesen megjelenő lejtőhordalék talajok lokalizálásához.

A mintázott területekről származó talajminták laboratóriumi elemzésre kerültek. Azonban a pontsűrítés során felmerült további, kérdéses területekről származó minták textúra adataira is szükségünk volt, így azokat saját vizsgálatokkal, Meter-Pario ülepedésvizsgáló készülékkel határoztuk meg. A Pario mérőegységeket a vizsgálat idejére a Nemzeti Közszolgálati Egyetem Víz tudományi Kara bo-

csátotta rendelkezésünkre. A Pario ülepedésvizsgáló berendezés a talajszemcseméret eloszlásának meghatározására szolgál a hidrometrikus (ülepedéses) elven, automatizált formában. A készülék a gravimetrikus szemcseanalízis egy korszerűsített változatát alkalmazza, és különösen a 63 μm -nél kisebb frakciók (iszap és agyag) vizsgálatára alkalmas. A vizsgálat során a 2 mm-es méret alá szétlőrt, 10 g-os tömegű, nátrium-pirofoszfát oldattal előkezelt talajmintát 1 literes ürtartalmú, csiszolatos záródugóval ellátott mérőhengerbe helyezük desztillált vízben (4. ábra). A berendezés ultrahangos érzékelője a szuszpenzió sűrűségét méri az idő függvényében, és automatikusan regisztrálja az ülepedési folyamat adatait. A mérés időtartama általában

12-24 óra, de az adatok már a kezdeti szakaszban is informatívak lehetnek, különösen az iszapos frakció esetében. A berendezéshez tartozó szoftver automatikusan kiértékeli az eredményeket, és meghatározza a különböző szemcseméret-frakciók százalékos arányát (agyag, finom- és durvaiszap), lehetővé téve a talajtextúra háromszög alapján történő besorolást (URL3). A Pario rendszeres laboratóriumi használat esetén jelentősen csökkenti az elemzéshez szükséges időt és emberi beavatkozást, valamint a hagyományos laboratóriumi eljárások eredményeivel összehasonlítva jól korreláló értéket ad, ugyanakkor kritikus fontosságú a minták megfelelő előkészítése (Xiaowei és társai 2024).



4. ábra. Pario mérőműszer mérésre kész állapota és mérési folyamata
Figure 4. Pario device in measurement-ready condition and performing measurement

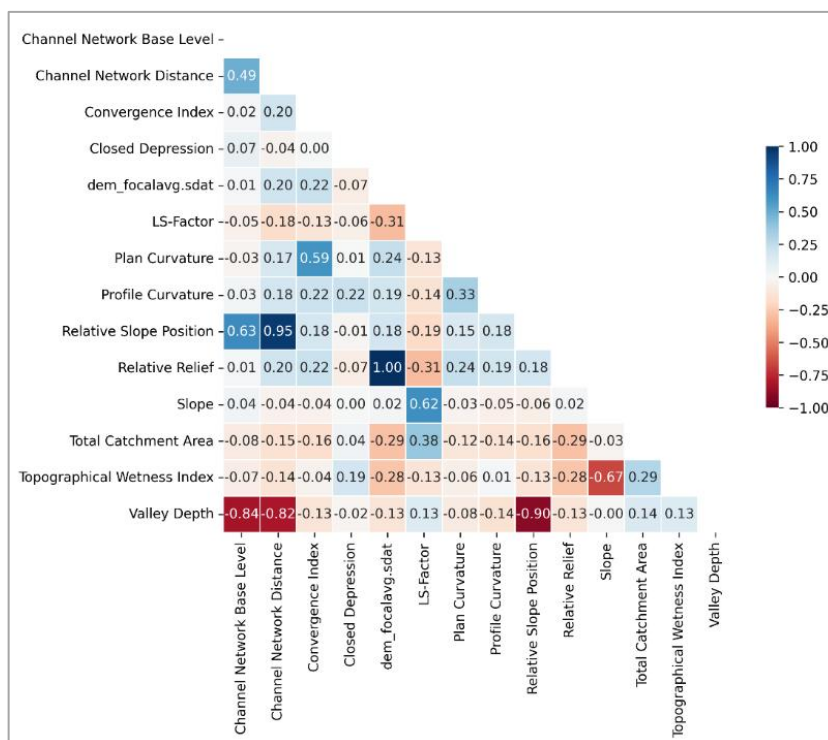
A digitális talajtérkép (DSM) két fő munkafolyamatra épül, amelyek együtt biztosítják a megbízható eredményt. Az első a terület geológiai, geomorfológiai és hidrológiai viszonyait nagy térbeli felbontásban leíró domborzatmodellből (DEM) származtatott indexek előállítására, a második pedig a terepi és laboratóriumi mérések adatbázisba rendezése és ezek térbeli kiterjesztése geostatistikai módszerekkel.

Az alaptérképcsoport a következő adatállományokat tartalmazza:

- lejtőmeredekség és 1 m-es szintközű szintvonalas térkép,
- talajnedvességi index (TWI – Mohamed 2020),
- üledékszállítási index (STI – Ennaji és társai 2022),
- mederteljesítmény-index (SPI – De Rosa és társai 2019),
- csatornahálózat-sűrűség (PDD – Dobos és Daroussin 2005),
- Hammond-féle domborzati osztályozás (upland–lowland) és lejtőgörbület térképe. a konvergens és divergens összefolyások azonosításához (Karagull és társai 2017),
- a Kreybig-térképek digitális adatbázisa (Pásztor és társai 2010).

Ezek az adatok alapot biztosítanak a lejtőhordalék- és vízhatású, valamint a barna erdőtalaj-foltok vázlatos elkülönítéséhez. A következő lépésben komplexebb leválogatások történtek, amelyek során lehatárolhatóvá vált a patakmeder, illetve az egyes talajtípusok altípusai is. Ehhez szükséges volt a pontadatbázis fizikai-kémiai jellemzőinek bevonása, valamint a digitális és archív térképek alapján a terület tájhasználatának figyelembevétele. Ez különösen fontos azonos fűcsoportba tartozó, de eltérő mértékben erodált erdőtalajok esetében.

A digitális talajtérkép második fő munkafolyamata a pontadatbázis leíró és kiegészítő adataira (penetrométer, Sentek-nedvességsorok, Pario-textúra) épült. Ezek alapján a releváns talajadottságok, például a pórustér és a beszívargási sebesség térbeli kiterjesztését végeztük el. Ehhez felhasználtuk a Sentek szenzorok idősoros talajnedvesség-méréseit, valamint a legkisebb RMSE értékkel jellemzett leíró állományok vizsgálatát, amelyet a PyKriges keretrendszer biztosított (Deák és társai 2024). A pórustér és beszívargási sebesség térbeli kiterjesztéséhez olyan geomorfológiai (független) paraméterekre volt szükség, amelyek értékben összefüggést, korrelációt mutatnak a pontadatbázis változóival. A független változók optimális halmazát korrelációs elemzéssel (5. ábra) határoztuk meg és csak azok a geomorfológiai paraméterek kerültek kiválasztásra, amelyek korrelációs együtthatója egy meghatározott intervallumban (pl. $-0,3$ és $0,3$ között) volt (Deák és társai 2024).



5. ábra. A független változók meghatározását segítő korrelációs mátrix
Figure 5. Correlation matrix for the determination of independent variables

A független változók vizsgálata után a talajparaméterek térbeli kiterjesztéséhez szükséges statisztikai módszerek tesztelése és kiválasztása következett, ezek közül a regressziós krigelés eredményei (1. táblázat) bizonyultak a

legmegbízhatóbbnak. A módszer ötvözi a regressziós modell által biztosított értékbeli kiterjesztést a krigelés földrajzi távolságon alapuló súlyozásával, így megbízható becslést pixelértékeket szolgáltat (Deák és társai 2024).

1. táblázat. A regresszió krigelés eredményei a felszíni tulajdonságok kiterjesztéséhez
Table 1. Regression Kriging results for the spatial extension of surface properties

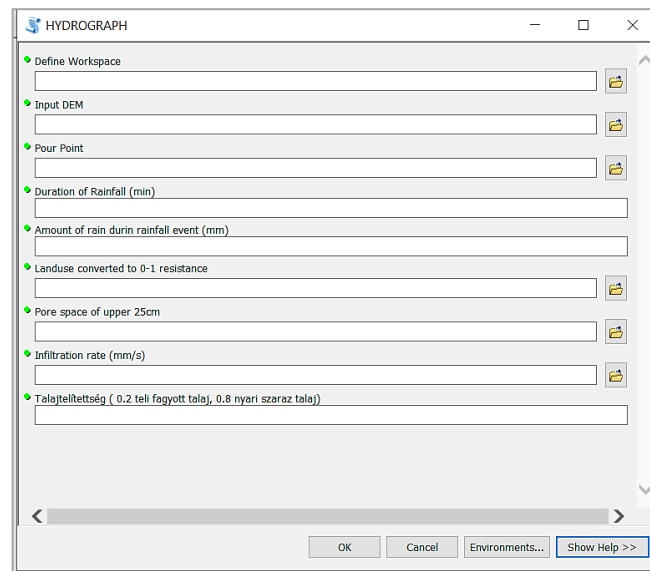
Mintaterület	Módszer	Nugget	Slope	Q1	Q2	cR
Kondó	Bayesian Ridge	7,90E-11	0,003109	0,751113	1,36504	0,006737
	K Neighbors	2,73E-05	1,60E-05	0,169131	1,66003	0,038423
	Lasso	2,39E-05	0,000845	0,191342	1,647436	0,036529
	Linear Regression	1,08E-15	0,002597	0,620728	1,521741	0,006273
	Random Forest	1,67E-06	0,001516	0,018576	1,343064	0,005655
	Ridge	2,10E-09	0,00354	0,800095	1,34005	0,007534

Az így létrehozott adatbázis és a kombinált állományok eredményeként egy komplex, többdimenziós réteg jött létre, amely jól tükrözi a talaj és a felszíni folyamatok kölcsönhatásait. A térképi állományok kezelhetősége érdekében a releváns részeket vektorizáltuk. Ez átfedéseket és szigetszerű területeket eredményezhetett, ezért az egységes megjelenítés érdekében összeolvasztást (dissolve) alkalmaztunk. Ennek eredményeként elkészültek a területről a digitális talajtérkép és az inputként szolgáló térinformatikai rétegek (pl. póruster, beszivárgási sebesség) a lefolyásmodellek számára.

Az ME-Hydrograph bemutatása

Az ME-Hydrograph nevű Python-alapú eszköz az ESRI Stowe Hydrology (URL4) modell alapján a Miskolci

Egyetem Földrajz–Geoinformatika Intézet munkatársai által került továbbfejlesztésre (6. ábra). Az új modell futtatásához nagy térbeli felbontású digitális domborzatmodell (pl.: 5 m DEM), a felhasználó által megadott kifolyási pont, valamint a csapadékintenzitás (mm/min) szükséges. További bemenet a felszínborítási réteg (10 m felbontású), amelyet jelen esetben a Sentinel-2B multispektrális műholdfelvételei alapján állítottunk elő a B2 (kék), B3 (zöld), B4 (vörös), B8 (közeli infravörös – NIR), valamint a 10 méteresre mintázott B5 (közeli VNIR) sáv felhasználásával. A modell további bemeneti adatai közé tartoznak a terepi mérésekből származó adatok, így a talaj felső 25 cm-es rétegének póruster és beszivárgási sebessége (mm/s), valamint a felhasználó által megadható kezdeti talajtelítettség (Dobai és társai 2024).



6. ábra. Az ME-Hydrograph nyitófelülete
Figure 6. Opening site of ME-Hydrograph

A futtatás a kifolyási pont kijelölésével indul, amely alapján a program automatikusan elvégzi a vízgyűjtőre vonatkozó alapműveleteket, így a mélyedéshibák kitöltését (fill), a vízgyűjtőhatár kijelölését (watershed), valamint a lefolyási útvonalak meghatározását (flow accumulation). Ezt követően a modell a csapadék időbeli lefolyását szimulálja, figyelembe véve a talaj póruskapacitását, a beszivárgás sebességét, valamint a felszínborítástól függő lefolyási tényezőket. A különböző évszakokhoz kötődő víztelítettségi különbségekre a program egy felhasználó által megadott kezdeti értékkel reagál, így rugalmasan képes követni a szezonális hatásokat. A csapadék a felszínre érkezve először a talaj pórusteret telíti, amint a telítettség eléri a maximumot a csapadékvíz felszíni elfolyása is megindul. A felszíni áramlás sebességét a modell a felszínborításhoz kapcsolódó érdességi értékei alapján számítja ki, mivel a különböző fedettségi típusok – például erdők, gyepek, mezőgazdasági területek vagy beépített zónák – eltérő módon befolyásolják a víz mozgását (Chow 1959, Emery és társai 2021). A beszivárgás és vízbefogadás modellezésére a korábban bemutatott terepi mérések térbeli kiterjesztésén alapuló állományát használja fel. A tényleges beszivárgás kiszámításakor figyelembe veszi, hogy ha a beszivárgási sebesség nagyobb, mint a csapadék intenzitása, akkor csak az intenzitását tekinti mérvadónak, mivel a víz nem képes gyorsabban beszivárogni, mint ahogyan lehullik. Ellenkező esetben a tényleges beszivárgás megegyezik a talajra jellemző beszivárgási tényezővel. A vízbefogadó képesség értékét a modell egy telítettségi szorzóval módosítja, amely azt fejezi ki, hogy az adott pillanatban milyen mértékben vizet képes a talaj felvenni. A modell programozásának egyszerűsítése érdekében, azokat a területeket, ahol a talaj telítődése hosszabb ideig tart, mint a csapadék hullásának időtartama, a modell kizárja a további számításokból, mivel ezek a felszínek a teljes vízmennyiséget elnyelik, és nem járulnak hozzá a kifolyási pontra jutó felszíni lefolyáshoz. Ezt követően a módosított vízbefogadó képességet elosztja a tényleges beszivárgás értékével, így képes meghatározni, hogy a talaj egy adott ponton mennyi

idő alatt telítődik. A kapott telítési időt hozzáadja a felszíni lefolyási időhöz, így minden pixel esetében meg tudja határozni, hogy a csapadék megjelenésétől számítva mennyi idő szükséges ahhoz, hogy a víz elérje a kifolyási pontot. Az összesített lefolyási idő térbeli megjelenítéséhez az eredményeket 10 perces időintervallumokba sorolja. A 10 perces sávokból előállított izokron térkép azt szemlélteti, hogy az eső kezdete után mely időablakban hány terület egységből érkezik víz a kifolyási pontra. A térképek attribútumtáblájában a modell összeszámolja az egyes időintervallumokhoz tartozó pixeleket, majd azok számát megszorozza a pixelmérettel, így négyzetméterben is kifejezhetővé válnak a részterületek (URL4). Mivel a csapadék mennyisége milliméterben adott, a modell az egyes időintervallumokhoz tartozó vízmennyiséget az intenzitás (mm/s) és a terület szorzataként liter/másodpercben fejezi ki, ezek m^3/s értékre konvertálhatók. Az így kapott értékekből lefolyási görbéket, úgynevezett hidrográfokat készít, amelyek megmutatják, hogyan változik a kifolyási ponton áthaladó vízmennyiség az idő függvényében. Amennyiben az esőzés hosszan tart, a modell a távolabbi területekről lassabban érkező vízmennyiséget folyamatosan hozzáadja a már megérkezett lefolyáshoz, miközben a kifolyási pontról időben távozó vizet levonja, így dinamikusan képes követni a lefolyási folyamatokat az esőzés alatt és azt követően is (Dobai és társai 2024). A modell eredetileg városi csapadékvíz-elvezető rendszerek terhelési vizsgálatára került fejlesztésre és tesztelésre, jelen kutatásban pedig kisvízgyűjtőkön levonuló árhullámok vízhozamának meghatározására alkalmazzuk. A vizsgálatához a villámárvizek kialakulásához szükséges minimum tartományt adtuk meg, amely a digitalizált radarkép alapján egy órán belül 35 mm/h körüli csapadékinтенzitást jelentett (Luong és társai 2021, Dobai és társai 2024). A területen 24 h alatt mért legtöbb csapadék 94 mm volt a vizsgált vízgyűjtőtől nyugatra, Varbó település területén (ACQUIS 2020). Az eddig tapasztalt csapadékok esetében felhívjuk a témában kutatók figyelmét olyan hivatalos és nem hivatalos forrásokra, mint a gátőrök, mederőrök által jegyzett

és a vízügyi igazgatóságok felé közölt csapadék adatok, valamint a vis maior jegyzőkönyvekben szereplő, helyi, illetve nem hivatalos csapadékmérők jelentései.

A HEC-HMS bemutatása

A HEC-HMS szoftver (Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System) egy széles körben alkalmazott hidrológiai modellező rendszer, amelyet az amerikai hadsereg mérnöki hadtestének hidrológiai mérnöki központja (USACE HEC) fejlesztett ki a csapadék-lefolyás folyamatainak szimulálására (URL2). Sokoldalúságának köszönhetően ma már nemcsak klasszikus vízgyűjtőmodellezési feladatokra, hanem egyre szélesebb körű kutatásokban is alkalmazzák, például távérzékelési adatok integrációjára. A program gyakran más térinformatikai szoftverek (ArcGIS–HEC–GeoHMS) kiegészítőjeként is implementálható. Általánosan megállapítható, hogy a HEC-HMS különösen jól működik a félig osztott és osztott vízgyűjtőmodellezési megközelítésekben (Sahu és társai 2020). A rendszer célja, hogy különböző meteorológiai eseményekre adott válaszként modellezze a vízgyűjtők hidrológiai viselkedését, beleértve a csapadék begyűjtését, a beszivárgást, a felszíni elfolyást és a folyóvizek mederbeli lefolyását. Moduláris felépítése lehetővé teszi különböző vízgyűjtők és vízrendszerek tetszőleges összetételű, időben változó elemzését, akár eseményalapú, akár folyamatos szimulációs módban. A modell képes integrálni különböző csapadék-eloszlási modelleket, tározókat, vízelvezető hálózatokat és a talaj-víz kölcsönhatásokat is, így alkalmas árvízszimulációra, vízgazdálkodási vizsgálatokra, illetve városi és természetes vízgyűjtők elemzésére egyaránt (Feldman 2000). A HEC-HMS megbízhatóságát és rugalmasságát széleskörű nemzetközi alkalmazás és rendszeres frissítések biztosítják.

Jelen kutatásban az Egyesült Államok Talajvédelmi Szolgálata által kifejlesztett (Soil Conservation Service Curve Number – SCS CN), valamint a bővebb paraméterezést biztosító Green & Ampt-módszert alkalmaztuk ugyanazon vizsgálati területeken és csapadékeseményeken, mivel ez a két eljárás bizonyítottan alkalmas ilyen jellegű vizsgálatokra (Ámon és társai 2024). A CN-módszer empirikus alapokon nyugvó megközelítés, amely a lefolyás mértékét a talajtípus, a felszínborítás és a talajnedvesség állapota alapján határozza meg, leegyszerűsített módon becsülve a beszivárgás és vízvisszatartás lehetőségeit. Ezzel szemben a Green & Ampt módszer egy fizikai alapú beszivárgási modell, amely a telítetlen talaj vízvezető képességét és szívóerejét figyelembe véve írja le a víz bejutását a talajba, ezáltal részletesebb és dinamikusabb képet

nyújt a talaj-víz kölcsönhatások időbeli alakulásáról. Mindkét modell esetében figyelembe kell venni a szabályozott rendszer keretei adta korlátokat, amelyek főleg mezőgazdaságban érintett területeken nem adják vissza megfelelően a valós hidrológiai viselkedést (Wilcox és társai 1990, Ficklin és Zhang 2013). Az összevetés célja az volt, hogy értékeljük az egyes modelleket és teszteljük, hogy mennyiben térnek el a lefolyási számítások az ME-Hydrograph modellhez képest.

EREDMÉNYEK

A talajmintavételezés és kiegészítő háttér adatok eredményeinek bemutatása

A terepi és labor eredményeket a 7-9. ábrák tartalmazzák, amelyek alapján részletes jellemzést kaphatunk a terület jellemző talajairól. A Cseres-völgy domináns talaja az agyagbemosódásos barna erdőtalaj, azon belül is annak pszeudoglejes altípusa, erősen erodált formában (7. ábra). A talajszelvény genetikai horizontjai jól elkülönülnek: az A és E szintek felett az agyagbemosódásos Bt szintek Fe és Mn-kiválásokkal, valamint agyaghártyákkal utalnak a kilúgzási és felhalmozódási folyamatokra. A szelvény textúrája a felszíni homokos vályogtól (HV) fokozatosan halad a vályog (VH) és agyagos vályog (AV) irányába, míg a mélyebb rétegekben már agyagos (A) jellemző. A tömödöttség közepes fokú a középső szinteken, amely szintén a vízmozgás akadályozottságára utal. A pangóvízfoltok és az agyaghártyák együttesen jelzik a pszeudoglejesedés jelenlétét, míg a gyökérzet jelenléte – főként hajszálgökökerek 60 cm mélységig – mérsékelt gyökérhatással bíró rétegeket feltételez. A talaj szerkezete a felszíntől a középső szintekig tömödött, ami a vízbefogadó képességet és a lefolyás alakulását is befolyásolja. A laboratóriumi vizsgálati eredmények (2. táblázat), tovább pontosítják a szelvény fizikai és kémiai jellemzőit, különösen a középső és alsó genetikai szintekre vonatkozóan. Az 5-70 cm-es mélységtartományban mért értékek alapján a talaj mechanikai összetétele agyag irányába tolódik el, amit a <0,002 mm frakció növekvő aránya is alátámaszt, ezzel megerősítve a genetikai típus besorolását. Ez a frakcióösszetétel vízvezetési és víztárolási szempontból egyaránt kedvezőtlen, mivel a finom szemcseméret lassú vízmozgást és erősen változó nedvességtartalmat eredményez, különösen a lejtős, pangóvízes térszínen. Szervesanyag-tartalma alacsony, ez egyrészt a kilúgozásnak, másrészt az ezzel összefüggő, szerkezetstabilitást adó karbonáttartalom hiányának köszönhető, jellemző területei a főtípusnak megfelelően a T-5, 7, 8, 11, erodált altípusai a T-3,4,9 szelvények (3. ábra). Tulajdonságai alapján megfelel a Luvisol típusnak (Michéli és társai 2024).

	Talajtípus	Agyagbemosódásos barna erdőtalaj (ABET) - pszeudoglejes				
	Pozíció	lejtő oldal, rét, legelő 15° lejtés, EOY: 767694, 316869				
	Genetikai szint	O	A	E	B t g	B t h
	Mélység (cm)	0-5	5-15	15-25	25-40	40-80
	Szín	10 YR 3/4	10 YR 3/4	10 YR 4/4	10 YR 4/6	-
	Szerkezet	tömődött	ua.	ua.	-	-
	Textúra	H	VH	VH	AV	A
	Tömődöttség	-	-	közepes	közepes	-
	Hártyák	-	-		agyag h.	agyag h.
	Kiválások	gyenge szerv a.	-	-	Fe, Mn	Mn
	Vízhatás	-	pangóvíz folt	-	pangóvíz folt	-
	Gyökérzet	hajsza gy.	fás gyök.	-	-	60 cm hajsza gy.

7. ábra. A T-3 jelű szelvényt leíró terepi jegyzőkönyv

Figure 7. Field report of soil profile T-3

2. táblázat. A T-3 jelű szelvény laboratóriumi adatai

Table 2. Laboratory analysis results for soil profile T-3

Szint mélység (cm)	K _A	Össz. só (m/m% sz.a)	Humusz (m/m% sz.a)	Szén-sav-as mész (m/m% sz.a)	pH (H ₂ O) (pH egység)	Szemeloszlás						
						> 0,25 mm	0,25-0,05 mm	0,05-0,02 mm	0,02-0,01 mm	0,01-0,005 mm	0,005-0,002 mm	< 0,002 mm
5-25	36	< 0,02	1,4	< 0,2	5,2	7,8	36,8	12,5	9,9	7,0	7,1	19,0
25-50	38	< 0,02	0,6	< 0,2	5,2	5,2	27,7	13,5	6,8	7,9	4,3	34,7
50-70	40	< 0,02	0,4	< 0,2	5,4	23,8	23,8	11,2	8,8	8,1	5,5	38,7

A villámárvízi jelenség felszíni viszonyaira ez a talaj-típus lehet a legnagyobb hatással, illetve annak vízhatással összefüggő mechanikai tulajdonsága, ezt jól szemlélteti a mintavételezés és beáztatási vizsgálat tapasztalatai (Dobai és Dobos 2023). A szelvény kiásásakor a munkát könnyítendő kis mennyiségű, majd a beszívárgási körülmények értelmezéséhez nagyobb mennyiségű (10-12 l) vizet öntöttünk a szelvénybe, majd követtük a beszívárgást (kb. 1 óra). Tulajdonképpen arra voltunk kíváncsiak, hogy kerektek nélkül, milyen beszívárgási irányok figyelhetők meg. Azonban azt az eredményt tapasztaltuk, hogy sem beszi-

várgás, sem oldalirányú elszívárgás nem történt, több mint egy óra elteltével sem. A szelvény főfalánál a friss felületen történt törés során pár mm-es nedvesedést tapasztaltunk (8. ábra). Ez a gyakorlati tapasztalat alapvető fontosságúvá vált a vizsgálat szempontjából a vízgyűjtőn belüli talajokra, valamint a textúra váltási szint (Bt) mélységéig erodálódott barna erdőtalajokkal kapcsolatban. A villámárvizek vizsgálata szempontjából az ilyen jellegű erdőtalajok esetében az 'erdő' megnevezés inkább formális kategóriaként, semmint a fogalomhoz társított jelentéstartalomként értelmezendő.



8. ábra. Az erodált ABET talaj altípusra jellemző beszivárgási viszonyok
Figure 8. Infiltration conditions of eroded brown-forest soil subtype

A következő jellemző talajtípus esetében szintén fontos szerepe van a felszíni és oldalirányú vízmozgásnak. A T-1 jelű szelvény egy pszeudoglejes jellegű

lejtőhordalék talaj (9. ábra), amely a lejtő alján helyezkedik el, mérsékelt dőlésszögű területen, gyümölcsös művelés alatt.

Talajtípus	Lejtőhordalék talaj - pszeudoglejes				
	Pozíció				
Genetikai szint	A	B	B t	B g	C
Mélység (cm)	0-20	20-40	40-70	70-90	90-110
Szín	10 YR 3/1	-	-	-	-
Szerkezet	hasábos	ua.	aprószemcsés	ua.	-
Textúra	HV	V	AV	AV	A
Tömődöttség	erős	erős	erős	-	erős
Hártyák	humusz h. (h.h), agyag h. (a.h)	a.h	a.h	h. h.	-
Kiválások	Fe, Mn	Fe, Mn	Fe, Mn	Fe, Mn	Mn
Vízhatás	pangó	stagnál	növekvő	ua.	ua.
Gyökérzet	sűrű hajsza gy(hgy)	alap h.gy.	h.gy repedések mentén	h.gy szerkezeten belül	ua.

9. ábra. A T-1 jelű szelvényt leíró terepi jegyzőkönyv
Figure 9. Field report of soil profile T-1

A genetikai szintek jól elkülönülnek egymástól, a szelvény teljes mélysége eléri a 110 cm-t, amelyet végig kísér a jól fejlett gyökér- és hajsza gyökér-hálózat, amelyek kedvezőbb beszivárgási feltételeket biztosíthatnak. Az A szint sötét színe (10YR 3/1) magas szervesanyag-tartalomra és jó humifikációs viszonyokra utal, amit a 2,1 m/m% humusztartalom is megerősít (3. táblázat). A szelvényen belül a szerkezet a felső szintekben hasábos, majd finomszemcséssé válik, amely a szerkezeti átalakulások és az aggregátumstabilitás csökkenését tükrözi a mélységgel. A textúra a felszíni szintek vályogosabb jel-

lege felől az alsóbb, agyagosabb irányba változik, ami jól illeszkedik a talajképződés során kialakuló vándorlás-felhalmózódás folyamataihoz. A finomfrakció (<0,002 mm) aránya a mélységgel jelentősen növekszik, az alsó C szintben eléri az 51,5%-ot, ami az agyagfelhalmózódás (Bt szint) és az illuviációs folyamatok hatására bekövetkező mechanikai, frakció differenciálódás eredménye. A talaj kompaktága minden szinten jelentős, különösen az A és B szintekben, ami rontja a víz- és levegőforgalmat, és elősegíti a pangóvízes viszonyok kialakulását. A Fe és Mn kiválások, valamint a vízhatásra utaló glejesedés (Bg

szint) a redukzív környezet és az időszakos víztelítettség indikátorai. Ezek különösen az alsóbb szintekben erőteljesek, ami alátámasztja a gyenge vízelvezetést és a stagnáló víz okozta hidromorf hatások jelenlétét. A pszeudoglejes jegyek és az illuviális agyagfelhalmozódás együttesen egyértelműen egy olyan fejlődési irányt jeleznek, amelyben a vízmozgások és a topográfiai pozíció alapve-

tően meghatározzák a talajfejlődést és az aktuális állapotot. Jellemző szelvénye a T-1 (3. ábra), azonban kedvező lejtés és csekélyebb eróziós hatásnak kitett területen végig kísérheti a lejtőaljon a barna erdőtalajokat, jelen területen ez csak a lankásabb nyugati területeken jellemző. Tulajdonságai alapján megfelel a Colluvic Regosol típusnak (Michéli és társai 2024).

3. táblázat. A T-1 jelű szelvény laboratóriumi adatai
Table 3. Laboratory analysis results for soil profile T-1

Szint mélység (cm)	K _A	Össz.só (m/m% sz.a)	Humusz (m/m% sz.a)	Szén-sav-as mész (m/m% sz.a)	pH (H ₂ O) pH egység	Szemeloszlás						
						> 0,25 mm	0,25-0,05 mm	0,05-0,02 mm	0,02-0,01 mm	0,01-0,005 mm	0,005-0,002 mm	< 0,002 mm
5-25	45	0,02	2,1	< 0,2	6,2	8,0	23,8	11,9	9,2	6,4	6,9	33,8
40-70	43	< 0,02	1,6	< 0,2	6,5	3,4	20,2	17,8	10,0	9,8	6,8	32,1
90-110	54	< 0,02	0,7	< 0,2	7,4	1,7	14,4	11,9	11,9	4,9	4,9	51,5

A terület harmadik jellemző talajtípusa az öntés réti talaj (10. ábra), amely egy antropogén eredetű hordalékkúpon, a völgytalp legmélyebb részén helyezkedik el. A természetes

eróziós és akkumulációs folyamatokat jelentős mértékben módosította az emberi tevékenység, a terület jelenleg is művelés alatt áll, amely okán jelentős a szerkezet tömődése.

Talajtípus	Öntés réti talaj - antropogén hordalékkúpon				
	völgytalp, 0-2° lejtés, szántó, EOV: 768122, 317230				
Genetikai szint	A sz	A	B t	2A	2 A a
Mélység (cm)	0-30	30-50	50-70	70-100	100-
Szín	10 YR 3/2	-	-	-	-
Szerkezet	szerkezet nélküli	szemcsés	ua.	morzsás	hasábos
Textúra	V	AV	AV	V	V
Tömődöttség	erős	gyenge	erős	-	-
Hártyák	humusz h.	humusz h.	humusz h.	humusz és agyag h.	-
Kiválások	Fe, Mn	-	Fe, Mn	Fe	-
Vízhatás	erős pangóvíz	pangóvíz folt.	-	-	-
Gyökérzet	sűrű hajszál gy. (h.gy)	gyökérzóna	csekély gy.	hajszál gy. hálózata	csekély gy.

10. ábra. A T-2 jelű szelvényt leíró terepi jegyzőkönyv
Figure 10. Field report of soil profile T-2

A genetikai szintek közötti átmenetek elmosódottak, ami a rendszeres bolygatás, feltöltés és keveredés következménye. Ennek ellenére jól megfigyelhetők egyes talajfejlődési folyamatok, így például a humuszfelhalmozódás a felső 30 cm-es rétegben, amely erőteljes színezettség (10YR 3/2) és relatíve magas humusztartalommal (1,4 m/m%) párosul (4. táblázat). A textúra a teljes szelvényen vályogos, enyhén változó finomságú, azonban a mélyebb rétegekben az agyagfrakció (>39% <0,002 mm) koncentrációja fokozatosan növekszik, ami részben az öntésanyag

természetére, részben pedig az illuviációs folyamatok jelenlétére utal. A kiválások, különösen a vas- és mangánformák, valamint a pangó vízre utaló glejesedés elsősorban a felső és középső szintekben figyelhetők meg, jelezve a periódikusan vízzel telített, levegőtlen állapotokat. A humuszos és agyagos hárták megjelenése a mélyebb szintekben arra utal, hogy a talajképződés során az emberi eredetű rétegek is átestek természetes pedológiai folyamatokon. A tömődöttség nem egyenletes a szelvényen belül: míg a felszín közelében erős, addig az altalaj egyes szintjeiben

gyengébb, ami a változó fizikai behatásokkal, talajműveléssel, illetve a különböző időpontban történt elöntésekkel magyarázható. A gyökérzet eloszlása a szelvényen belül

egyenetlen, a felső 50 cm-ben domináns, alatta fokozatosan csökken, és elsősorban hajszálgyökér-hálózat formájában van jelen.

4. táblázat. A T-2 jelű szelvény laboratóriumi adatai
Table 4. Laboratory analysis results for soil profile T-2

Sínt mélység (cm)	K _A	Össz. só (m/m% sz.a)	Humusz (m/m% sz.a)	Szén-savas mész (m/m% sz.a)	pH (H ₂ O) pH egység	Szemeloszlás						
						> 0,25 mm	0,25-0,05 mm	0,05-0,02 mm	0,02-0,01 mm	0,01-0,005 mm	0,005-0,002 mm	< 0,002 mm
0-30	43	0,03	1,4	< 0,2	-	2,4	28,6	13,6	8,8	7,2	5,7	33,6
30-50	48	0,03	0,7	< 0,2	-	1,2	20,0	16,4	9,5	7,9	5,7	39,2
50-70	48	0,03	0,5	< 0,2	-	1,6	26,3	12,4	8,4	6,3	6,0	39,0
70-110	48	0,04	0,5	< 0,2	6,0	2,6	27,6	10,1	8,1	6,2	5,8	39,6

A szelvény jellemzően a Harica, valamint a Cseres völgyből érkező árhullámok területi zónáiban fordulnak elő, tipikus szelvénye a T-2 jelű (3. ábra), amely további érdekessége, hogy a teljes szelvényben jelen vannak bronzkori és egyéb tárgyak (Palicz és Makkay 1978), innen kapta az antropogén jelzőt is (11. ábra). Tulajdonságai alapján megfelel a Fluvis-Gleysol típusnak (Michéli és társai 2024).

A területet jellemző talajok beszívargás-vizsgálatainak eredményeit a 5. táblázat tartalmazza. A legmagasabb átlagos beszívargási sebességet a lejtőhordalék talaj pszeudoglejes változata mutatta (0,24 mm/h). A mintaterület többi talajához képest kedvezőbb eredményt a talajszelvényben nyomon követhető makropórus-hálózat, a terepen mért kezdeti nedvességtartalom (24,9%), valamint a mélyen, jól fejlett gyökérhálózat magyarázza, amely a jó vízáteresztő képességre utalhat. Ugyanakkor a szelvényben feltárt fokozatos agyagfrakció-növekedés, valamint a hidromorfológiai jegyek (glejfoltt, vas- és mangánkiválások) a vízmozgás korlátozására és a tartósabb telítettségére utalnak, így a kedvező vízáteresztő tulajdonság szezonális jellegűnek tekinthető. Ezzel szemben az antropogén eredetű öntés réti talajon lényegesen alacsonyabb értékeket mértek (0,05 réti talajon lényegesen alacsonyabb értékeket mértek (0,05 mm/h), a beszívargás csak 96 perc alatt fejeződött be, ami lassú vízmozgásra és tömörödött, finomszemcsés szerkezetre utal, amely a szántott réteg (Asz) alján kialakult eketalpnak köszönhető. Az agyagbemosódásos barna erdőtalajok esetében a beszívargási folyamat jellemzően az

első 5 percben csökkent, a 19. perc után jelentősen lelassult, vagy kvázi megszűnt, az erodált felszínnek esetében ez még hatványozottabban jelentkezett. A vizsgálatok eredményei egyezik a térségben történt felmérések eredményeivel (Dobai és társai 2024).



11. ábra. A T-2 jelű szelvényből előkerült paleolitik kerámia töredékek

Figure 11. Paleolithic pottery fragments recovered from the T-2 profile

5. táblázat. A terepi beszívargás vizsgálatok eredményei
Table 5. Results of the field infiltration tests

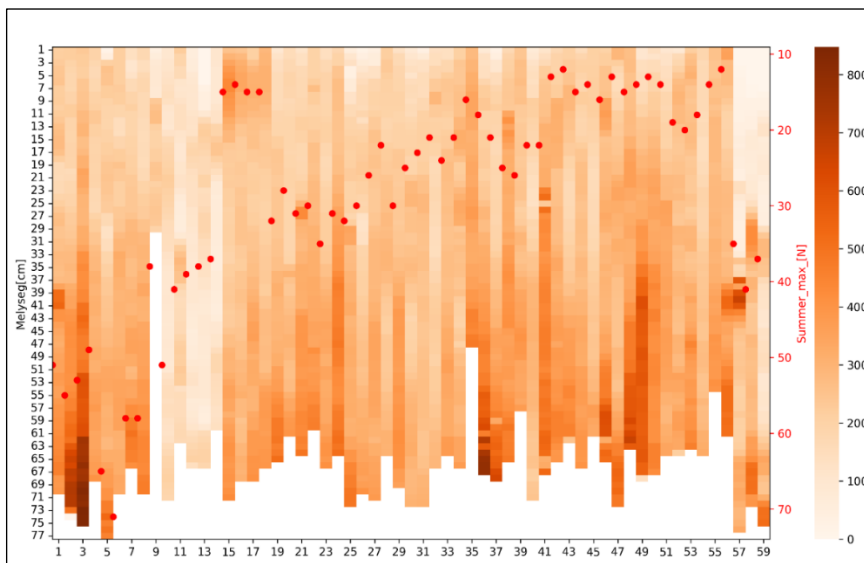
ID	Talajtípus	EOV X, Y	K (átlag) mm/h	K (MAX) mm/h	Megjegyzés
1	Lejtőhordalék talaj - pszeudoglejes	766 891, 316 404	0,24	0,50	A teljes beszívargás megtörtént
2	Öntés réti talaj - antropogén hordalékkúpon	768 122, 317 230	0,05	0,17	A teljes beszívargás 96 min volt
4	Agyagbemosódásos barna erdőtalaj - pszeudoglejes	767 694, 316 869	0,15	0,17	19 min után jelentősen csökkent, kvázi megszűnt a beszívargás
6	Agyagbemosódásos barna erdőtalaj - pszeudoglejes	767 689, 316 708	0,11	0,18	19 min után jelentősen csökkent, kvázi megszűnt a beszívargás
8	Agyagbemosódásos barna erdőtalaj	767 272, 316 339	0,18	0,23	A teljes beszívargás megtörtént

A mért beszívargási sebességek és a talajok fizikai tulajdonságai közötti összefüggések jól mutatják, hogy a vilámárvizek kialakulásának térbeli mintázata szorosan összefügg a talaj szerkezetével és telítettségi viszonyaival. Ez az eredmény megerősíti, hogy a helyi hidrológiai modellezésben a talajtípusok részletes térbeli paraméterezése elengedhetetlen.

A talajellenállás mérés eredményeinek bemutatása

A penetrométeres vizsgálatok lehetőséget nyújtanak a mintaterületen előforduló talajtípusok elkülönítésére (12. ábra), valamint további információval szolgálnak a talaj-térkép pontosításához és a tömődöttségi viszonyok értel-

mezéséhez. A 12. ábra x_1 tengelyén a mérési pontok azonosítószámai szerepelnek. A Penetronik műszer GPS-jeladóval rendelkezik, így az SD-kártyán rögzített koordináták alapján a mérések a terepen pontosan megismételhetők. Az y_1 tengely a műszer által elért maximális talajmélységet (cm) ábrázolja, míg a színskála az adott mélység eléréséhez szükséges erőt (N) mutatja, amely az y_2 tengely skálázott értékeiről is leolvasható. Az ábrán a téli mérések eredmények kerültek bemutatásra, színezett formában. Ennek oka, hogy a téli időszakban a kellően átnedvesedett talajban a tömődöttségbeli különbségek markánsabban ki-rajzolódnak. A nyári mérések során elért maximális mélységeket a piros pontok jelölik.

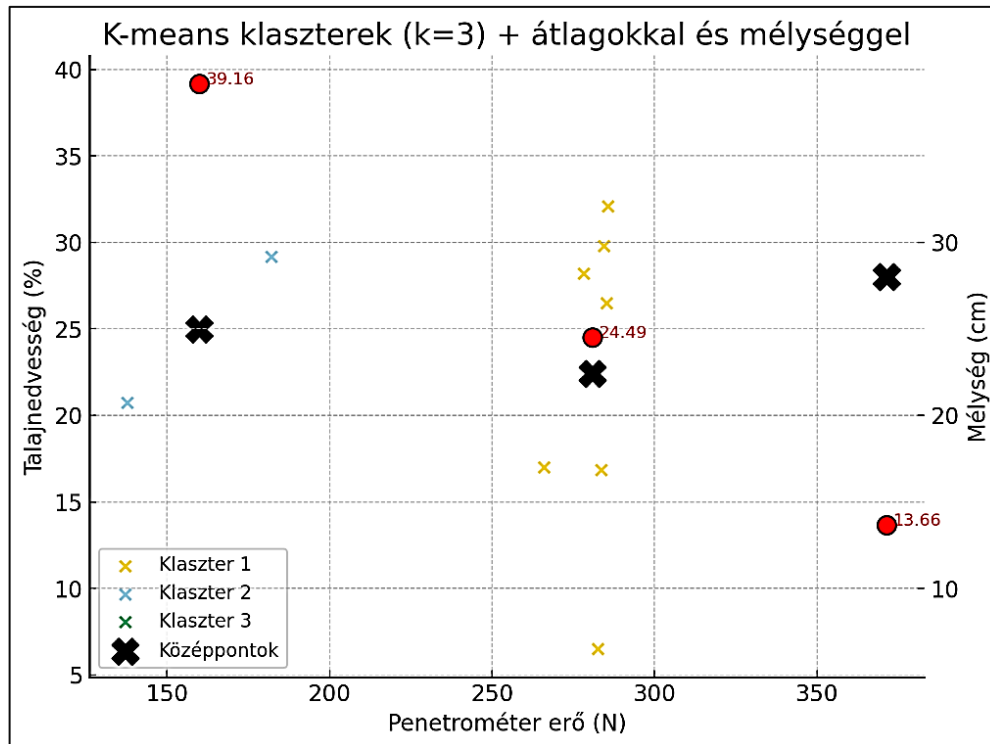


12. ábra. A talajok mechanikai ellenállásának (N) vertikális eloszlása a mélység (cm) függvényében, a nyári (piros pontok) és téli (színskála) mérések alapján

Figure. 12. Vertical distribution of soil penetration resistance (N) across depth (cm), based on summer (red dots) and winter (color-scale) measurements

A vizsgálatok eredményei alapján több talajcsoport különíthető el, amelyek tovább gazdagítják a mintaterületen előforduló talajtípusok térbeli változatosságának értelmezését, különös tekintettel az agyagbemosódásos barna erdőtalaj (ABET) altípusaira. Az 1–8. mérési pontokon öntés réti talaj, aktív szántóföldi művelés alatt álló terület található, amelyben eketalpréteg is kimutatható. A 9–14. pontok nyers öntéstalajhoz köthetők, eltérő textúrákkal. A 15–18., valamint a 44–48. pontok erősen erodált pszeudoglejes agyagbemosódásos barna erdőtalajokat (ABET) jeleznek, míg a 19–26. pontok öntésanyaggal fedett ABET-re utalnak. A 27–43. pontokon kevésbé erodált pszeudoglejes ABET található, fiatal erdőborítással. A 49–51. pontokon lejtőhordalék talaj azonosítható, közepesen erodált felső talajszinttel, a 52–54. pontokon kevésbé erodált, homokban gazdagabb ABET, míg az 55–56. pontokon erősen erodált pszeudoglejes ABET fordul elő. A 57–59. pontok a patakmeder és annak közvetlen környezetét reprezentálják. Tehát döntően a

barna erdőtalajok és alvázotatai dominálnak a területen. A csoportképzés feltételezései statisztikailag is alátámasztható a K-közép módszerrel (Blömer és társai 2016). A klaszteranalízis során a fentebb meghatározott csoportok erő- és talajnedvesség-adatainak átlagai szolgáltattak alapként (13. ábra). Az ábrán a nyári átlagmélységek értékét piros ponttal jelöltük. Az eredmények alapján az egyes klaszterek jól elkülönülnek egymástól. Az első klaszterbe a patakmeder közelében, illetve a nyers öntéstalajokon végzett mérések tartoznak, amelyek közös jellemzője a lazább textúra és a nyári időszakban elért nagyobb behatolási mélység. A második klaszter a barna erdőtalajok különböző altípusait foglalja magában, kivételt képez a csoport legrosszabb értékeit tartalmazó (282,6 N, 6,4 t. nedv %) öntés réti talaj, amely a szántón megjelenő eketalppal magyarázható. A harmadik klaszter az önállóan elkülönülő lejtőhordalék talaj, amely erős tömődöttsége miatt mind a legnagyobb ellenállást, mind pedig a legkisebb nyári mélységet képviseli.



13. ábra. A k-közép klaszter analízis eredménye

Figure. 13. Results of the k-means cluster analysis

A penetrométeres mérés önmagában nem helyettesítheti a talajszelvény feltárását, valamint laboratóriumi célú mintázását, azonban nagyban hozzájárul a kérdéses területek talajszerkezet és nedvességi állapotnak felméréséhez. A szántóföldi területeken kevésbé mutatkozik meg ez a szintű változatosság, azonban a tárgyalt mintaterületen a helytelen agrotechnológia (szántott és taposási károkkal terhelt felső 30 cm) és tájhasználat okozta hatások jól mutatkoznak a felmérés eredményein. Ezek a beszívárgást gátló tulajdonságok a mért talajnedvesség értékeken is visszaköszönnek.

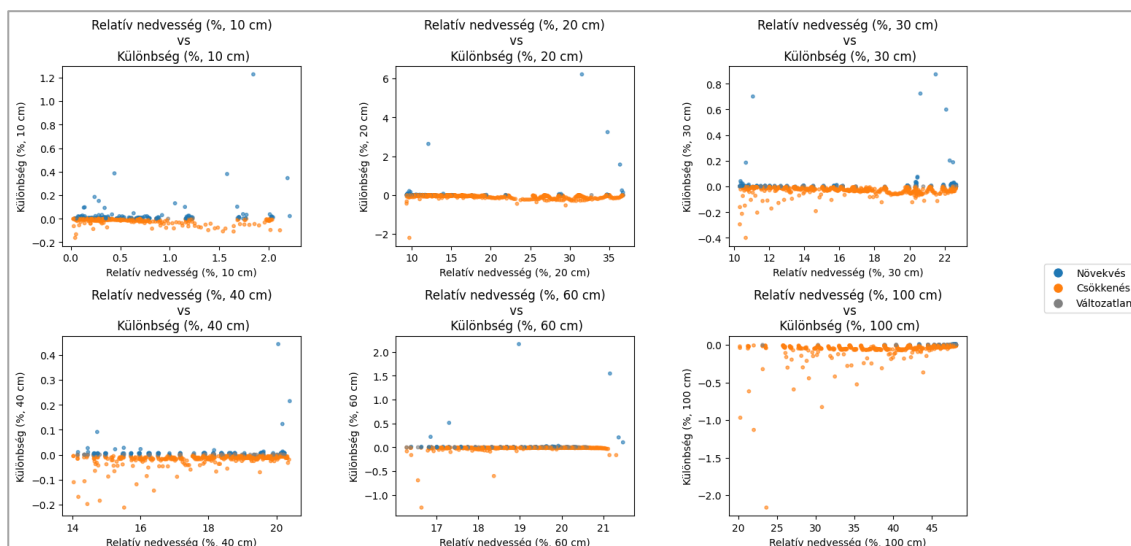
A Sentek talajnedvesség mérés eredményeinek bemutatása

A talajnedvesség adatok és értelmezésük kiemelten fontos nem csak az agrónia területén, hanem a villámárvizek vizsgálata esetében is, ezért 2022-ben kihelyezésre került 4 db Sentek talajnedvességszenzor a mintaterületre egy viharesemény valós időben való rögzítésének reményében. A szenzor 10 centiméterenként (10, 20, 30, 60 és 100 cm) talajnedvességet, a felső 10 cm-en pedig hőmérsékletet, valamint páratartalmat is mér (Kibirige és Dobos 2021). Energiatakarékossági szempontokat figyelembe véve a nyári időszakban félórás, valamint órás, a téli időszakon kétórás mérés eredmények kerültek rögzítésre.

Jelen kutatásban a talajellenállás-mérés eredményeinek alátámasztásához, a két legrosszabb értéket (magas

talaj ellenállás, alacsony talajnedvesség) adó, lejtőhordalék (S-13), valamint az öntés réti talajnál kihelyezett talajnedvesség mérő (S-20) értékeit mutatjuk be a 2022. évi nyári időszakra vonatkozóan (14-15. ábra). Az ábrák szórásdiagrammok formájában mutatják be a relatív talajnedvesség értékeit, azok változásait, valamint a kimutatható trendek irányát. Általánosságban megállapítható, hogy a felszíni, 10 cm-es rétegben mutatkoznak a legnagyobb ingadozások, ahol a pozitív trendek aránya és szórása magas, ami a csapadékesemények gyors és intenzív hatását tükrözi. A mélység növekedésével a változékonyság, valamint a felszíni lefolyással való kapcsolat fokozatosan mérséklődik.

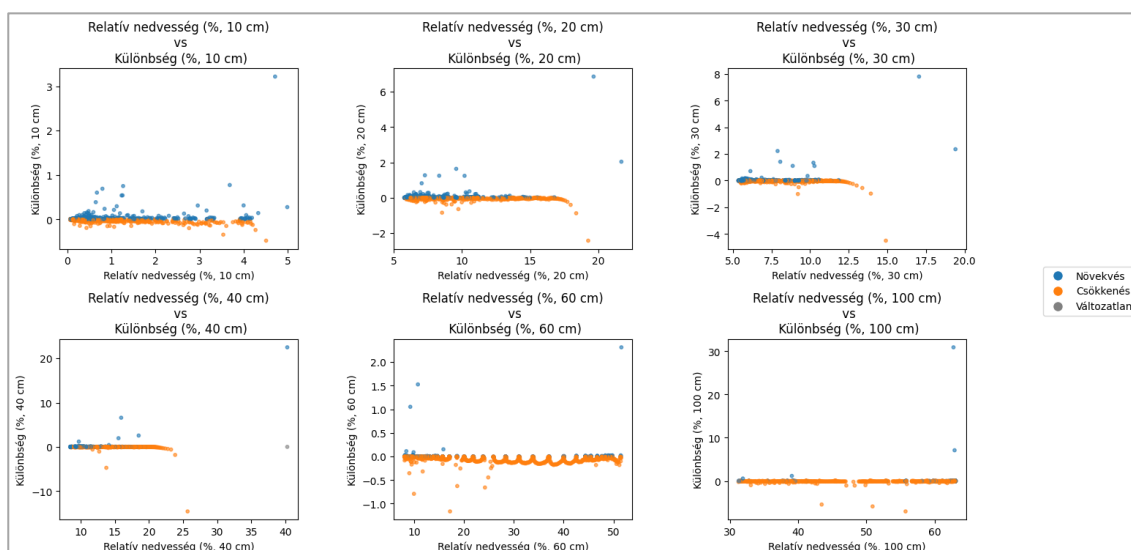
Az S-13 adatai (14. ábra) a pszeudoglejes lejtőhordalék talaj nedvességváltozásai a felső 30 cm eredményei alapján viszonylag szűk tartományban mozognak, ez arra utal, hogy a talaj mikropórusai nem megfelelő állapotban vannak a felszíni víz elvezetéséhez, szerkezete tömődött. A makropórusok hiánya vagy beszűkülése korlátozza a víz mélyebb infiltrációját és elősegíti a felszínközeli gyors vízmozgásokat. A középső rétegekben még kimutathatók növekvő trendek, de ezek aránya csökken, szórásuk pedig kisebb lesz, míg a 60–100 cm közötti zónákban már egyértelműen a negatív trendek dominálnak, és a relatív nedvességváltozások is ehhez igazodnak.



14. ábra. A Sensor-13 relatív nedvesség, szórás diagramja a 2022.06.07-08.17 időszakon belül
 Figure 14. Soil moisture diagram of Sensor-13 during the period from 07.06.2022. to 17.08

Az S-20 (15. ábra) által mért eredmények az öntés réti talaj viselkedését tükrözik, amely a völgytalp legmélyebb részén, emberi bolygatásban érintett. A felső, humuszban gazdag rétegekben a nedvességváltozások kiugróak, a

gyors nedvességnövekedés egyértelműen a felszín közelében érvényesül. Ez a jelenség a mezőgazdasági művelés következménye, amely korlátozza a beszivárgást és elősegíti a gyors telítődést.



15. ábra. Az S-20 relatív nedvesség, szórás diagramja a 2022.06.07-07.14 időszakon belül
 Figure 15. Soil moisture diagram of Sensor-20 during the period from 07.06.2022 to 14.07

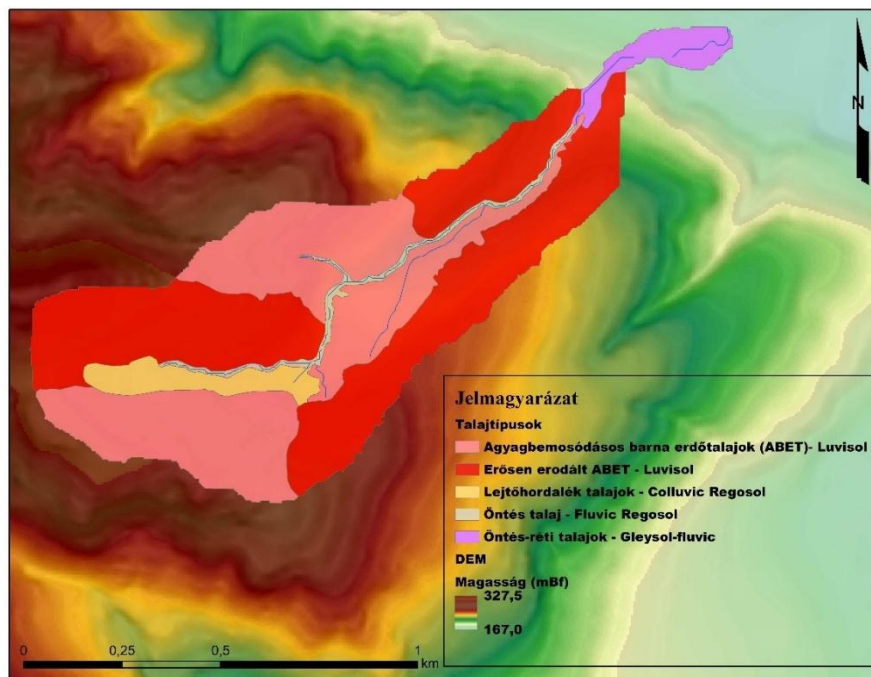
Az előző példához hasonlóan a mélység növekedésével a pozitív trendű mérések egyre csökkennek. A kutatás szempontjából ezek azért fontos eredmények, mivel az öntés talaj felső rétegeinek homokos vályog, vályog textúrája, valamint a lejtőhordalék talaj gyökér- és repedéshálózata nem indokolja a mélyebb rétegekbe irányuló, kedvezőtlen vízelvezetési tulajdonságokat. A két talajra vonatkozó 0-30 cm-es rétegből származó talajminták térfogat-tömege (141,88 valamint 150,20 g/100 cm³), valamint talajpórus értékei (46,46 valamint 43,32 cm³/100 cm³) is alátámasztják a talajellenállás mérés eredményeit. A rendelkezésre álló adatok egyértelműen alátámasztják, hogy a két elméletileg jó vízelvezetésű talajtípus valós viselkedése az árhullám kockázatát növeli.

A digitális talajtérkép bemutatása

A terepi és laboratóriumi, valamint a kiegészítő vizsgálatok mért adatok adatbázisának raszteres és vektoros feldolgozása után létrejött a Cseres-völgy digitális talajtérképe (16. ábra). A térképen markánsan kirajzolódik a barna erdőtalajok két típusának területi elkülönülése, amely szoros összefüggésben áll a felszínborítottsággal és a domborzati viszonyokkal. A vegetáció, különösen az erdőborítottság, valamint a nyugati kitétségű oldalakon mérhető kisebb lejtésszögek kedvezőbb vízháztartási feltételeket eredményeznek. A lejtőhordalék talajok jellemzően ezeknek a domboldali szelvényeknek az alsó, lejtőalji szegmenseiben halmozódnak fel, ahol a gravitációs tömegmozgások, illetve a felszíni lefolyás révén lehordott finomabb szemcseméretű frakciók felhalmozódnak. A pa-

takmeder mentén a két talajtípus lehordott anyaga adja a friss öntés talajok eltérő rétegzettségét, amelyek az árvíz területi zónájában végig kísérik a völgyet, a völgytalpi részen pedig a korábban tárgyalt antropogén behatásra kialakult öntésréti talaj található. Ez az általános kép a laza üledékeken képződött talajok domborzati, valamint vízgyűjtő morfológiai tulajdonságait figyelembevéve nem meglepő, azonban, ha csak a rendelkezésre álló talajtani adatbázisokra támaszkodnánk a talajtulajdonságok parametri-

zálásánál (lefolysmodellezés esetén), úgy nem kapnánk hiteles eredményeket, mivel az Agrotopo adatbázis ezt a területet a barnaföldek, Cambisol csoportba osztja be és annak megfelelően írja le fizikai és kémiai tulajdonságait. Ez a leegyszerűsítés figyelmen kívül hagyja a térség talajainak finomléptékű változatosságát, különösen a lejtőhordalék és öntéstalajok jelenlétét, ami torzíthatja a modell-alapú hidrológiai előrejelzések (árhullám időzítése, beszivárgási arányok, felszíni lefolyás intenzitása) eredményeit.



16. ábra. A Cseres-völgy digitális talajtérképe
Figure 16. Digital soil map of Cseres-valley

A hidrológiai modellek bemeneti adatainak és eredményeinek összehasonlítása

A lefolyásmodellek bemeneti paramétereinek meghatározása a korábbiakban tárgyalt terepi és laboratóriumi vizsgálatokra, valamint a GIS adatbázis alapján

összeállított tematikus térképekre, számadatokra támaszkodott. Az ezekből nyert számértékek és tapasztalati adatok szolgáltak alapul a modellbeállítások finomhangolásához, törekedve a lehető legpontosabb közelítésre (6. táblázat).

6. táblázat. A HEC-HMS CN, valamint Green&Ampt lefolyásmodellek bemeneti paramétereit
Table 6. Input parameters of HEC-HMS CN, Green&Ampt models

Modell típusa					
CN		Green & Ampt			
Kezdeti vízvisszatartás – initial abs.	0,35	Elfolyási veszteség – initial cont.	0,20	Tárolási együttható (h) -Storage coeff.	0,7
Görbeszám - CN	84	Telített nedvesség tartalom – saturated cont.	0,40	Lefolyás hossza (m) - route	1 500
Burkolt felület – impervious perc. (%)	0	Kapilláris szívóerő Suction (mm)	130	Lejtés (m/m) - slope	0,0717
Csúcsvízhozam számítás módszer	Peak rate 600	Hidraulikus vezetőképesség (mm/h)	0,15	Manning-féle érdességi tényező (n)	0,035
Késleltetési idő (min) - lag time	28,64	Kezdeti felszíntárolás – simple surface-initial cont. (mm)	0,5	Alszakaszok-Subreaches	10
Lefolyási görbe típusa	SCS egységárhullám	Maximális felszíntárolás – max storage (mm)	8	Árhullám sebesség – celerity (m/s)	5
Folyószakasz árhullám levezetési módszer - reach routing method	Kinematikai árhullám – kinematic wave	Hidrográf típusa	Clark-egység árhullám	Mederszélesség (m) – Bottom	1
		Összegyülekezési idő (h) – time of concent.	1,04	Oldallejtő arány – side ratio	1

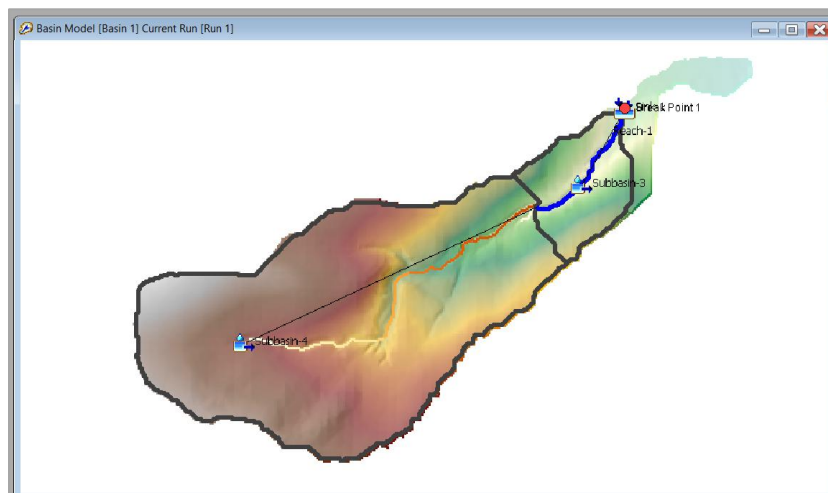
A terület felszíne döntően vályog és agyagos-vályog textúrájú, amelyet jelentős felszíni erózió jellemez. A felszínborítottság tekintetében a nyílt, gyéren fedett területek dominálnak, körülbelül 70%-os arányban az erdős állományokkal szemben, amelyek mintegy 30%-át fedik le a vízgyűjtőnek. A völgy alapvetően egy száraz völgyben helyezkedik el, nem rendelkezik állandó vízhozamú vízfolyással, medre közepesen durva (homokos, kavicsos) természetesen jellegű meder, így a modell további bemeneti paramétereinek számítása ezek figyelembevételével történt (*URL2*).

A vízgyűjtő kis területe ($\sim 0,76 \text{ km}^2$) és közepes lefutási hossza ($\approx 1,5\text{--}1,9 \text{ km}$) egyoldalú, gyors lefolyási potenciált jelez, ez konzisztens azzal, hogy a modellben a kinematikus/Clark-féle lefolyási úthoz viszonylag nagy tárolási, 0,7 h együtthatót és egy 1,04 h-os összegyűlekezési időt adtunk meg. A laboratóriumi szemeloszlás adatok nagyobb finomfrakció-arányt mutatnak (sok rétegben $>30\%$ agyag/iszap tartalom), és a humusztartalom alacsony (0,4–2,1%), ami együtt a mért nagyon alacsony telített vezetőképességgel (0,05–0,24 mm/h; a Green & Ampt-ban alkalmazott paraméter $\approx 0,15 \text{ mm/h}$) magyarázza a felszíni lefolyásra való erős hajlamot. Ennek megfelelően az SCS–CN magas, 84-es értéke nem ellentmondó, amelyet az előző fejezetekben tárgyalt tömörödöttség is alátámaszt. Burkolt felület nem található a vízgyűjtőn, azonban a beszivárgási együtthatók vizsgálatai alapján megállapítható, hogy kifejezetten kedvezőtlen, közel betonfelszínű a talajok beszivárgása, amely tovább növelte a CN együttható alkalmazott értékét.

A Green & Ampt bemeneti adatai (telített nedvesség tart. $\approx 0,40$, kezdeti nedvesség $\approx 0,20$, kapilláris szívóerő $\approx 130 \text{ mm}$) a fizikai dinamikát írják le. Ezek az adatok meghatározóak a kezdeti beszivárgás mértékét és a beszivárgás gyors csökkenését az intenzív csapadék során, amelyek összhangban állnak a terepen tapasztaltakkal (5. táblázat). A mederleíró paraméterek (meredek, $\sim 7\%$ -os átlagos lejtő és 1 m széles keskeny meder) gyors áramlást eredményeznek, míg a Manning $n = 0,035$ érték természetes, vegetált mederviszonyokat jellemez. Ezek együtt magyarázzák, miért ad a vízmennyiség viszonylag gyors térbeli elvezetést, amely az áramlási sebesség (celerity) értékénél (5 m/s) is mutatkozik, amely magas érték fakadhat a meder fizikai tulajdonságainak bizonytalanságából is.

Összefoglalva, a magas CN és a Green & Ampt fizikailag definiált paraméterei egymást kiegészítik: az egyik empirikusan foglalja össze a terepi és labor eredményekből következő, nagy felszíni lefolyásra utaló jellemzőket, a másik pedig lehetővé teszi, hogy a mért hidraulikus vezetőképesség és kapilláris paraméterek hatása explicit módon kihat az eredményekre, amelyeket részletesebben a következő szakaszban tárgyalunk.

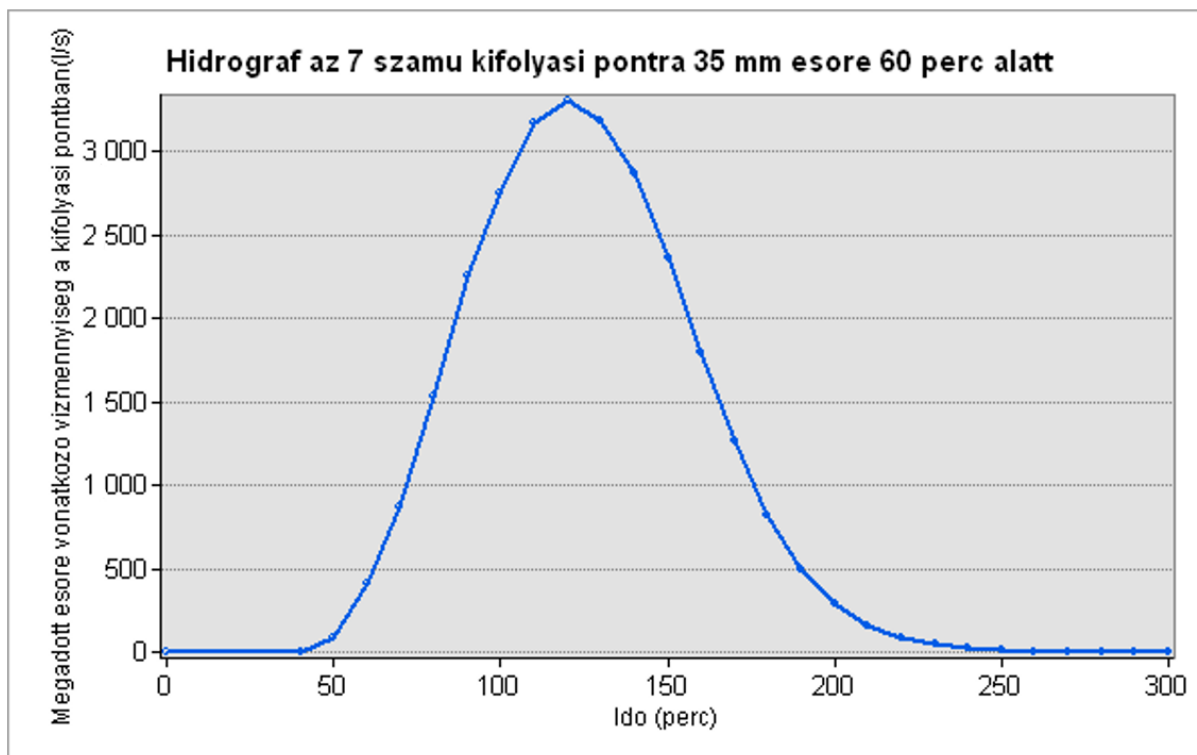
A modellezések közös adatai az egy órán belüli 35 mm/h csapadék intenzitás 10 perces időfelbontásban. A modellezés során a Cseres-völgyben a vízgyűjtő kifolyási pontját a még bolygatatlan területen jelöltük ki (17. ábra), mivel a terület tulajdonosa az árvíz elleni védekezés során jelentősen megváltoztatta (lefolyási útvonalba keresztbe tett beton elemek, újonnan kialakított lefolyási útvonal, betonáteresszel) a természetes lefolyási irányokat.



17. ábra. A Cseres vízgyűjtő a HEC-HMS modelljében
Figure 17. Cseres watershed in HEC-HMS

A vizsgálat során először a ME-Hydrograph modellt futtattuk le (18. ábra), majd az eredmény raszter attribútum táblája alapján trapéz integrál módszerrel kiszámoltuk a teljes vízhozamot. Az ábrán látható, hogy a 40. percig nem jelentkezik víz a kifolyási pontnál, ez azt jelenti, hogy a vegetáció legfelső rétegétől (lombkoronaszint) a talaj pórusteréig terjedő rendszernek ennyi időre van szüksége ahhoz, hogy a beérkező csapadék a felszínre jusson, majd a talaj telítődjön és elinduljon a fel-

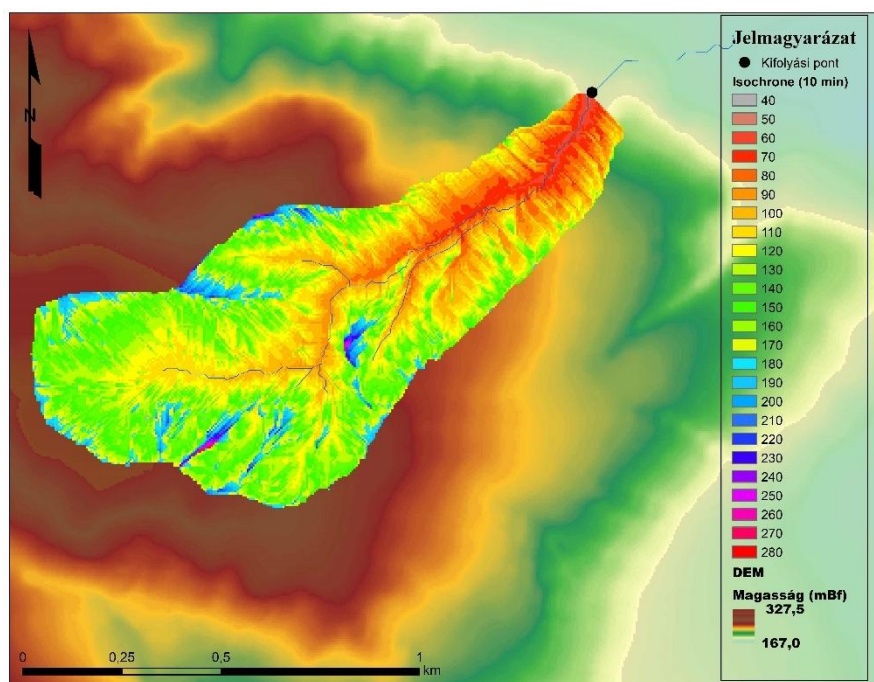
színi lefolyás. Ez a részeredmény egyezik a valós vilámárvíz elleni védekezés alapján megfigyelt „félórás” szabállyal, mely szerint a vihar kezdetétől számított kb. harminc percen belül még nem jelentkezik árhullám. A vízgyűjtőre számított teljes vízhozam $17\,820 \text{ m}^3$ volt. A lehullott csapadék mennyisége 22,6 mm, amelynek mintegy 67%-a alakult át felszíni lefolyássá, jelezve a vízgyűjtő gyors reakciókészségét és korlátozott beszivárgási kapacitását.



18. ábra. Az ME_Hydrograph eredménye
Figure 18. Result of ME-Hydrograph

Az árhullám a csapadékeseményt követően viszonylag gyorsan, mintegy 40 perc elteltével indult el, és 1 óra 50 percnél érte el a csúcspontját, melyhez 3,6 m³/s-os csúcsvízhozam társult. A csúcsvízhozam eléréséhez szükséges idő 65 perc volt, míg az árhullám teljes időtartama megközelítőleg 3 órát tett ki. Ezek az adatok jól tükrözik a vízgyűjtő gyors lefolyású, árhullámképző típusát, amelyet a meredek lejtés, a tömődött, erodált barna erdőtalajok, va-

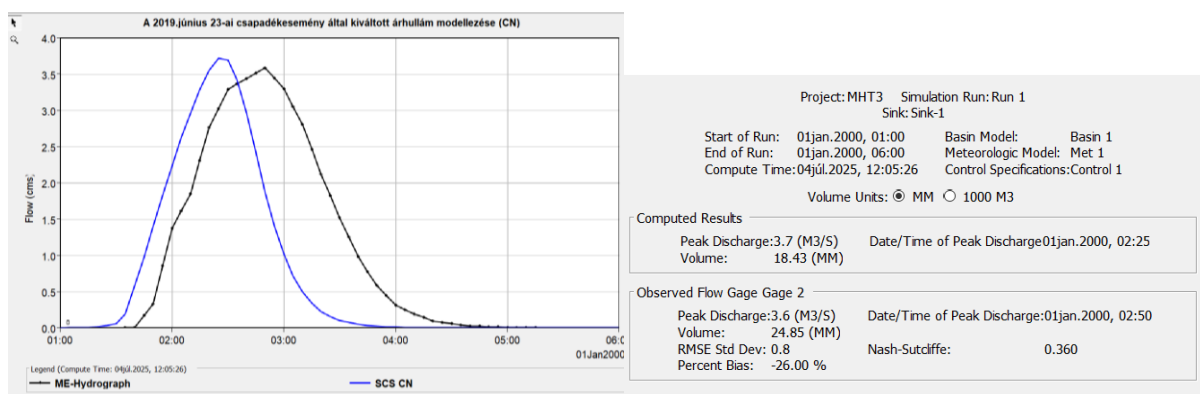
lamint a korlátozott vízbefogadó képesség együttesen határoznak meg. A modell futása során létrehozott raszterek közül kiemeltnék a korábban tárgyalt 10 perces időintervallumra osztályozott izokron térképet (19. ábra), amely különösen releváns a villámárvizek modellezése és a kockázátértékelés szempontjából, hiszen jól érzékelteti a kisvízgyűjtők időbeli lefolyási dinamikáját és az extrém csapadékeseményekre adott válaszaik gyors lefutását.



19. ábra. A talaj és felszíni tulajdonsággal súlyozott izokron térkép
Figure 19. Isochrone map weighted by soil and surface properties

A további vizsgálatok könnyebb összehasonlíthatósága érdekében a vízhozam adatait adtuk meg a HEC-HMS megfigyelési (observed flow) vízhozamnak. Az SCS Curve Number (CN) és Green & Ampt modell korábban ismertett input adatainak futtatása során az alábbi eredményeket kaptuk (20-21. ábra). A Curve Number (CN) modell alkalmazása során kapott eredmények, SCS CN_1 (20. ábra) alapján a rendszer numerikusan stabilnak és hidrológiailag konzisztensnek tekinthető. Az almedencékhez tartozó térfogat értéke 0,999 mm gyakorlatilag az elméleti 1 mm-rel egyezik meg, ami azt jelzi, hogy a csapadék-lefolyás transzformáció térfogati egyensúlya jól érvényesül, a hidrográf időbeli feloszlása nem torzult és a modellezett árhullám mennyisége megfelel a csapadék inputnak. A kinematikus hullám levezetés során a lefolyási szakaszra vonatkozó térfogatellenőrzés is megfelelő egyensúlyt mutat: a befolyó és kifolyó vízmennyiség között mindössze 3 m³ különbség van, amely - 0,03%-os relatív hibát jelent. Ez a minimális eltérés, valamint a közel megegyező vízáramlási értékek – 4,9 m/s és 5 m/s – alapján megállapítható, hogy a levezetés fizikai és numerikus megközelítése megfelelő. A két árhullám vízhozamcsúcsa hasonló, azonban össztérfogatukban jelentős különbség (4 500 m³) tapasztalható, ez a különbség utalhat a nem megfelelő csapadékintenzitás vagy a talaj víztelítettségi ál-

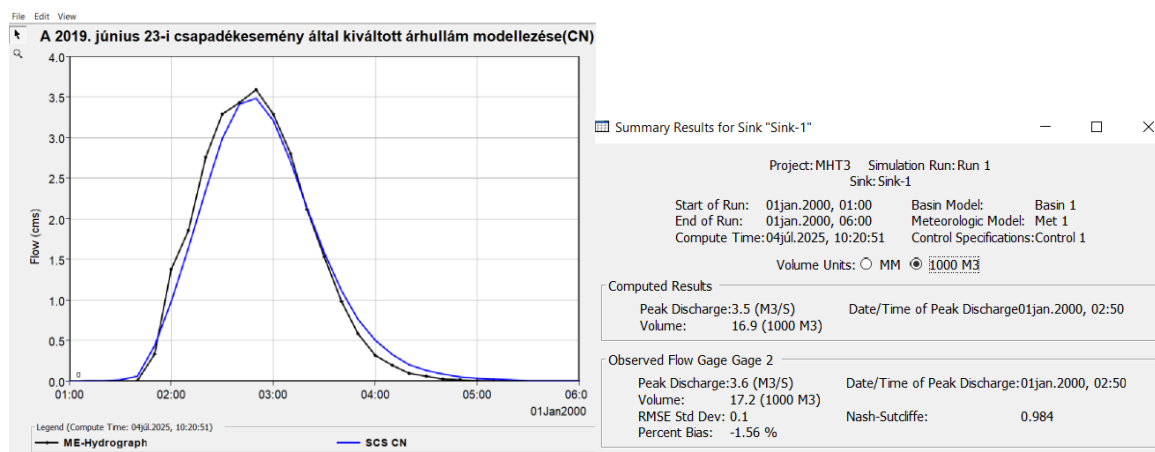
lapotának beállításának hibájára is. A modellek a valós térben bekövetkező árhullámokról származó mért adatok hiányában elsősorban a paramétereizhetőség adta lehetőségeket képesek kihasználni a hidrológiai konzisztencia keretein belül, valamint téradat-alapú optimalizációs eljárásokra (pl. terepi mérések, domborzatmodellek, felszínborítási adatok) hagyatkozhatnak. Ezen módszerek kockázata, hogy az eredmények a hidrológiai folyamatok kvalitatív értelmezésére, mintsem kvantitatív előrejelzésre alkalmasak, ugyanakkor értékes információt nyújtanak a rendszer fizikai működéséről és a paraméterérzékenység irányairól. Jelen teoretikus modellezési állapotban csupán a modellek egymáshoz viszonyított teljesítménye értékelhető, amely minősítésre alkalmazott statisztikai mutatók közül az átlagos négyzetes hiba gyöke (RMSE) 0,8 értéke mérsékelt illeszkedésre utal. A Nash-Sutcliffe hatékonysági együttható (NSE) 0,36-os értéke viszont azt mutatja, hogy a modell ugyan képes visszaadni az árhullám általános alakját és trendjeit, de jelentős pontatlanságokkal. Az NSE értéke ideálisan 0,5 felett van, a 0,36 pedig a közepes–gyenge kategóriába esik. A -26%-os relatív hiba (percent bias) arra utal, hogy a CN modell az összlefolyást jelentősen alábecsüli, ami gyakori jelenség túl erős beszívargási paraméterezés, alulbecsült CN-értékek, vagy túlzott talajvíz-visszatartás esetén.



20. ábra. Az SCS CN_1 hidrográfja és összefoglaló táblázata
Figure 20. The hydrograph and summary report of SCS CN_1 model

Összességében megállapítható, hogy a modell fizikailag stabil eredményeket szolgáltat, a lefolyási volumenek és áramlási paraméterek térfogat eredményei egyensúlyban vannak. Ugyanakkor a statisztikai illeszkedés alapján a modell még nem ad pontos előrejelzést, különösen a térfogatot tekintve. Teljes illeszkedés a CN növelésével és a kezdeti talajnedvesség állapotok módosításával sikerült (21. ábra). Ekkor az árhullámgörbék (SCS CN_2) egyezést mutattak, amit a főbb lefolyási paraméterek és statisztikai mutatók is alátámasztottak. Ekkor a modell által számított csúcsvízhozam 3,5 m³/s volt, amely csupán 0,1 m³/s eltérést mutat a megfigyelt 3,6 m³/s-hoz képest, míg az összes lefolyt vízmennyiség tekintetében a különbség elhanyagolható volt (300 m³). A modell teljesítményét jellemző Nash–Sutcliffe hatékonysági együttható értéke 0,984, ami a gyakorlatban szinte tökéletes illeszkedést je-

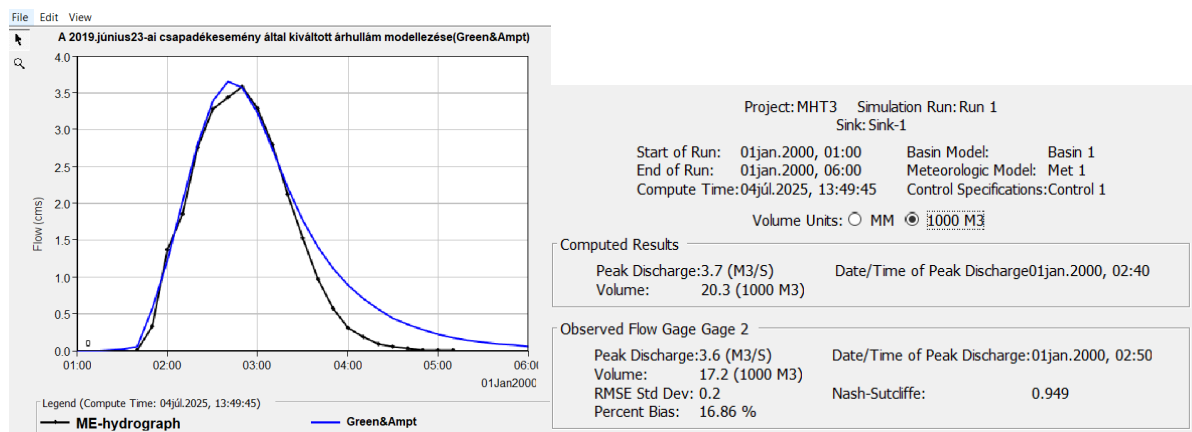
lent, míg a százalékos torzítás -1,56% volt, ami minimális alábecsülésre utal. Az RMSE szórása 0,1 értékkel szintén a kis hibaszintet igazolja. A CN modell erőssége tehát az egyszerűsített empirikus megközelítés ellenére is megmutatkozott, mivel a vizsgált kisvízgyűjtő gyors lefolyású és viszonylag homogén felszínborítás és talajtani viszonyok mellett képes volt nagy pontossággal visszaadni a lefolyási dinamikát. Fontos megjegyezni, hogy a bemenő paraméterek (CN az agyag talajnak felel meg) alapján a modell szélsőértékekkel számol. Az SCS CN_1 és CN_2, valamint a ME-Hydrograph összehasonlításának elsődleges célja a GIS- és távérzékelési módszertanokból származó input adatok ellenőrzése, továbbá a hidrográf vizuális értékelése, az árhullám kilépési pontjához tartozó időpont meghatározása, valamint az árhullámcsúcs eltolódásának mértékének vizsgálata volt.



21. ábra. Az SCS CN₂ hidrográfja és összefoglaló táblázata
Figure 21. The hydrograph and summary report of SCS CN₂ model

A Green & Ampt esetében már sokkal részletesebb input adatok kerültek megadásra, amely az eredményen is megltáztott (21. ábra). A modellfutás során kapott eredmények hidrológiailag koherens és numerikusan stabil viselkedést mutattak. Az almedencékhez rendelt válaszfüggvény megfelelően reprezentálta az egységnyi csapadékhoz tartozó lefolyástérfogatot, és a rendszer volumetrikus egyensúlyban van. A kinematikus árhullám levezetés vizsgálata szerint a lefolyási szakaszon a bemenő (inflow) és kimenő (outflow) közötti különbség minimális, mindössze 0,42%-os relatív hibával, amely a modellezés pontosságát és a térfogatomegmaradás teljesülését támasztja alá. A lefolyási sebesség értéke – 5 m/s alkalmazott és 4,9 m/s becsült – csak 2%-os eltérést mutat, ami szintén azt jelzi, hogy az áramlás idő számítása jól illeszkedik a levezetett vízmennyi-

ség dinamikájához. Az árhullám csúcseredménye 3,7 m³/s volt, amely csak 0,1 m³/s-al haladja meg a ME-Hydrograph 3,6 m³/s értékét, vagyis a csúcszham pontos becslését adja. A volumenek közötti eltérés megmaradt (3 100 m³), már kevesebb, mint az SCS CN esetében, tehát a statisztikai értékelés alapján ez az eltérés nem tekinthető jelentős torzulásnak. A százalékos torzítás 16,8%-os pozitív értéke mérsékelt túlbecslést jelez, ami elsősorban a beszivárgási vagy felszínborítási paraméterek további finomhangolásával csökkenthető. A Nash–Sutcliffe hatékonysági együttható 0,94, amely kiváló illeszkedést jelent, és azt mutatja, hogy a modell a megfigyelt időbeli változásokat jól képes visszaadni. Az alacsony RMSE (0,2 m³/s) szintén alátámasztja a pontosságot, mivel ez a hibaszint messze a napi vízhozam-ingadozások alatt marad.



22. ábra. A Green&Ampt hidrográfja és összefoglaló táblázata
Figure 22. The hydrograph and summary of the Green&Ampt model

Általánosságban megállapítható, hogy egyes elemekben találkozik a két modell, azonban mind a megjelenő vízmennyiség, mind az árvízcsúcs, valamint a görbe lefutásában vannak eltérések, fontos tapasztalat volt továbbá, hogy a talajparaméterek (Simple surface method: initial és max content) beállításáig az árvízcsúcsot magasabbra becsülte a modell, tehát a talajparaméterek ismerete döntő egy ilyen csapadékeseményből származó árhullám esetében. A két modell összehasonlításának célja a bővebb paramétereizhetőség adta lehetőségek alkalmazása volt a talaj adatokat illetően.

Az összes vizsgált lefolyásmodell eredményei alapján megállapítható, hogy mind az SCS Curve Number (CN), mind a Green & Ampt modell jól reprezentálja a vizsgált vízgyűjtő árhullám-dinamikáját, azonban számottevő különbségek mutatkoznak a becsült vízhozamok és lefolyási arányok tekintetében (7. táblázat). A számított teljes víztérfogat a Green & Ampt modell esetében volt a legmagasabb (20 030 m³), míg a legalacsonyabb értéket az SCS Curve Number 2 variáns adta (16 900 m³), ami azt jelzi, hogy a Green & Ampt a lefolyás volumenét jelentősebbre becsülte,

valószínűsíthetően a magasabb beszivárgási telítettségi állapot és a paraméterérzékenység miatt. A lefolyási arány is ezt támasztja alá: míg a CN-alapú mo-

dellek 67-70% körüli arányt jeleznek, a Green & Ampt esetében ez a mutató elérte a 84,5%-ot, ami intenzívebb felszíni lefolyást jelez.

7. táblázat. A tesztelt lefolyásmodellek eredményeinek összefoglalója

Table 7. Summary of the results of the tested runoff models

Vízgyűjtő név: Cseres		Vízgyűjtő mérete: 0,76 km ²		
Vízhozam számítás eredmények				
	ME-Hydrograph	SCS Curve Number 1	SCS Curve Number 2	Green&Ampt
Vízgyűjtőre számított teljes víztérfogat (m ³),	17 820	18 430	16 900	20 030
Árhullám kezdete (h:min)	0:40	0:45	0:45	0:40
Árhullám csúcs (h:min)	1:50	1:50	1:50	1:40
Csúcs vízhozam (m ³ /s)	3,6	3,7	3,5	3,8
Eltelt idő a csúcsvízhozamig (min)	65	65	65	65
Árhullám időtartama (h)	3	6	6	6
Lefolyási arány (%)	~ 67	~ 70	~ 70	~ 84,5

Az árhullámok időbeli jellemzői viszonylag jól egyeznek a modellek között: a csúcs hozam minden esetben 65 perccel az esemény kezdete után következett be, és a csúcsok közötti eltérés csak $\pm 0,2$ m³/s tartományban mozgott. A Green & Ampt modell némileg hamarabb generált csúcsot (1:40), amely a gyorsabb felszíni válaszreakcióra utal. Az árhullám időtartama az SCS CN₁ modell kivételével minden esetben 6 óra volt, míg az ME-Hydrograph csupán 3 órás árhullámot szimulált, ami rövidebb lefolyási folyamatot és koncentráltabb csapadéklefolyást feltételez.

A Green & Ampt modell érzékenyebb a talaj fizikai jellemzőire és a kezdeti nedvességi állapotra, ami nagyobb árhullám-volumen eredményezett, így elsősorban extrém események modellezéséhez vagy érzékenységi elemzésekhez lehet hasznos. A modellek közötti különbségek rámutatnak arra, hogy a kiválasztott beszivárgási algoritmus jelentősen befolyásolja a lefolyási becsléseket, ezért alkalmazási céltól és helyszíni adottságoktól függően indokolt a megfelelő modell kiválasztása.

KÖVETKEZTETÉSEK

Az intenzív csapadékesemények következtében várhatóan fokozódó villámárvíz-kockázat miatt kiemelt fontosságú a kevésbé ismert kisvízgyűjtők részletes jellemzése. Ennek ma már kulcsfontosságú eszközei az ingyenesen vagy alacsony költséggel hozzáférhető távérzékelési és GIS-adatok (Sentinel-műholdképek, vegetációs indexek, felszínborítási térképek, nagyfelbontású domborzati állományok), amelyek automatizált feldolgozással közvetlenül integrálhatók lefolyásmodellekbe. A geostatistikai és gépi tanulási alapú térbeli kiterjesztések (pl. Random Forest) lehetővé teszik, hogy a paraméterezés ne pontszerű, hanem pixelenként, területre értelmezve történjen. A talajtani paraméterek (beszivárgási kapacitás, pórustér, szerkezet) továbbra is a legkritikusabb és legösszetettebb modell bemeneteket jelentik, ezért a célzott terepi mérések (például penetrométeres vizsgálatok) lényegesen csökkentik a predikciós bizonytalanságot. A talajtani paraméterek terepi meghatározása, valamint a digitális talajtérkép létrehozása elsőre bonyolultnak és magas költségvetésűnek tűnhet, azonban a kockázati térképi adatbázisok felhasználásával a magas kockázatú területek könnyen meghatározhatók.

Ezen területeken mezőgazdasági művelés esetén jogszabályban foglalt (61/2009. (V. 14.) FVM rendelet) kötelezettség az 5 hektáronkénti talajmintavételezés, amely már megfelelő felbontású háttér adatot biztosíthat.

Jelen kutatásban a terepi és digitális téradatokon alapuló ME-Hydrograph modellt hasonlítottuk össze a HEC-HMS keretrendszer SCS-CN és Green & Ampt moduljaival. A felmérés valós csapadékesemény adataira alapozott, és elméleti szinten modellezte a 2019. júniusában bekövetkezett eseményt. A vizsgálat célja nem csupán a modellek kalibrációja volt, hanem a bemenő adatok, különösen a talajtani paraméterek bemutatása, minőségértékelése és statisztikai elemzése is. A koncepcionális jellegű összevetésre részben az ÉMVIZIG területén hiányzó vízmérési referenciaadatok miatt volt szükség. Ennek ellenére a modellek közötti eltérések világosan rámutattak arra, hogy a talajparaméterek (különösen a kezdeti telítettség és a beszivárgási jellemzők) bevezetése és finomhangolása döntő hatása a vízhozambecslések pontosságára. A lefolyásmodellek teljesítménye összetett képet mutat: a HEC-HMS keretében futtatott SCS CN és Green & Ampt modellek fizikailag koherens és stabil eredményt adtak. Az első SCS CN-paraméterezés mérsékelt illeszkedést mutatott (NSE $\approx$ 0,36; RMSE $\approx$ 0,8 m³/s; PBIAS $\approx$ -26%), ami a túl magas beszivárgási értékekre vagy az alacsony kezdeti talajtelítettségére utalhat. A CN-érték és a kezdeti nedvesség finomítása után a modell teljesítménye jelentősen javult: a kalibrált beállításokkal a szimulált csúcsvízhozam és a kifolyt vízmennyiség gyakorlatilag pontosan egyezett a megfigyelt értékekkel (NSE $\approx$ 0,984; RMSE $\approx$ 0,1 m³/s; PBIAS $\approx$ -1,6%). A fizikai Green & Ampt módszerrel alapfelületben is kiemelkedően pontos eredményt kaptunk (NSE $\approx$ 0,94; RMSE $\approx$ 0,2 m³/s), a csúcs hozamot pontosan jelezte előre, bár a teljes volumenben egy kis eltérés maradt (~3 100 m³; PBIAS $\approx$ +16,8%).

Az ME-Hydrograph előnye, hogy egyszerre több kifolyási pontot képes kezelni, és nem igényel olyan mértékű szakértelmet, mint a HEC-HMS modulok. Emellett a vízgyűjtő kijelöléséhez és a hidrológiai modellezéshez szükséges részfeladatokat – például a kifolyási pont meghatározását, a domborzati egyenetlenségek simítását és a csapadékadatok integrálását – automatikusan elvégzi, szemben a HEC-HMS manuálisan paraméterezendő folyamata-

ival. A létrejövő raszteres állományok, például az izokron térkép, jól értelmezhető és térben vizualizálható információt nyújtanak a lefolyási folyamatokról, továbbá lehetővé teszik a távérzékelési adatok integrálását is. Előnye, hogy részletes térképi talajadatok felhasználásával, alacsony terapi kalibráció mellett is a többi modell eredményeivel összevethető, hasonló végeredményt produkál, mind a csúcsvízhozam nagyságában, mind a megjelenés időpontjában. A talaj vízvisszatartó képességét és kezdeti telítettségét figyelembe vevő modell így elfogadható árhullám-görbéket generál, lehetővé téve a felszín- és talajadottságok részletes leképezését. A modell hátránya, hogy nem képes nagyméretű csapadékvíz adatsorok feldolgozására, és a kimeneti adatok megjelenítése – például a csapadék-adatok együttes ábrázolása a vízhozamgörbével – jelenleg továbbfejlesztést igényel a későbbi alkalmazásokhoz. A vizsgált vízgyűjtőn alkalmazott ME-Hydrograph domborzi és felszínborítási adatainak feldolgozása statisztikailag megalapozott interpolációs módszerekkel történt, ugyanakkor jövőbeli célként indokolt a modell ismert vízhozammal rendelkező referencia-területen történő tesztelése, a modell pontosságának validálása érdekében, mivel jelenleg csak az egyes megközelítésű modellek eredményeinek összehasonlítása lehetséges.

A további kutatási irányok szorosan kapcsolódnak a kockázati térképezéshez, amely fejlesztésre szorul a TWI és NDVI értéktartományait illetően (Sarkadi és társai 2022, Dobai és Dobos 2025), továbbá szükséges lenne a hazai jellemző, de regionálisan eltérő kockázati kitettségű térségekre (Mecsek, Tokaj) értelmezve létrehozni a jelen kutatás eredményeit (várható vízhozam, digitális talajtérkép stb.) is. Ezen feladatok elvégzésével megfelelő adatbázis jönne létre, amely megalapozhatná a mesterséges intelligencia (AI) alapú, országos léptékű, komplex hidrológiai viszonyok elemzéseit.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás a 2020-1.1.2-PIACI-KFI: „Piac vezérelt kutatási, fejlesztési és innovációs projektek támogatása - ICT-platform kialakítása a talajinformáció-vezérelt mezőgazdaság támogatására a mezőgazdasági termelés irányítására és optimalizálására. és a talajrendszerre gyakorolt hatások monitorozása”, támogatásával valósult meg. Külön köszönjük Vadnai Péter József munkáját a vizsgált lefolyásmodell létrehozásához.

IRODALOMJEGYZÉK

Aaron, C., Venkatesh, M. (2009). Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping, *Journal of Hydrology*, Vol. 377, Issues 1-2, 2009, pp 131-142. ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.015>

Amon, G., Bene, K., Ray, R., Gribovszki, Z., Kalicz, P. (2024). Improving Flash Flood Hydrodynamic Simulations by Integrating Leaf Litter and Interception Processes in Steep-Sloped Natural Watersheds. *Water*, 16(5), 750. <https://doi.org/10.3390/w16050750>

ACQUIS (2020). Kondó községben 2019. június 23-án bekövetkezett vis maior esemény okozta károsodások helyreállítása, ACQUIS Bt. Ebr: 454 528, tervszám: K-

12/2020. Kondó település Polgármesteri Hivatalának adatára, pp 3-27.

B.A.Z. MKI (2021). Borsod-Abaúj-Zemplén Megyei Katasztrófavédelmi Igazgatóság „A”, jelű Előzetes Helyszíni vizsgálat jegyzőkönyvei 2010–2020. Kondó település Polgár Mesteri Hivatalának adattára, pp 4-5. 94/2015 (XII.23) FM rendelet – az elháríthatatlan külső ok (vis maior) esetén alkalmazandó egyes szabályokról és a vis maiorral összefüggő egyes miniszteri rendeletek módosításáról.

Chow, V. T. (1959). *Ppen-channel hydraulics*. McGraw-Hill. New York. pp. 680-684.

Czigány, S., Pirkhoffer, E., Geresdi, I. (2009). Environmental impacts of flash floods in Hungary. In *Flood Risk Management: Research and Practice.*, Taylor & Francis Group, pp. 1439-1447. <https://doi.org/10.1201/9780203883020.ch169>

Daróczy S., Lelkes J. (1999). A szarvasi PENETRONIK talajvizsgáló nyomószonda alkalmazása. *Gyakorlati Agrofórum. Különszám a talajművelésről.* 10. 7. pp. 16-18.

Deák T., Dobai A., Kovács Z. K., Molnár F., Dobos E. (2024). Spatial extension of soil water regime variables derived from soil moisture values using geomorphological variables in Hungary. *Hungarian Geographical Bulletin*, 73(4), pp. 337-353. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.73.4.1>

De Rosa, P., Fredduzzi, A., Cencetti, C. (2019). Stream Power Determination in GIS: An Index to Evaluate the Most 'Sensitive' Points of a River. *Water*, 11(6), 1145. <https://doi.org/10.3390/w11061145>

Dexter, A.R.; Czyz, E.A., Gate, O.P.A (2007). Method for prediction of soil penetration resistance. *Soil Till. Res.*, 93. pp. 412-419, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.05.011>

Dobai A., Dobos E. (2022). Hegy és dombvidéki kisvízgyűjtőkön kialakuló árhullámok elleni védekezés támogatása térinformatikai módszerekkel. *Debreceni Egyetem, Térinformatikai Konferencia és Szakkiállítás kiadványa*, pp. 109-117. <https://doi.org/10.35925/j.multi.2022.2.8>

Dobai, A., Vágó, J., Hegedűs, A., Kovács, K.Z., Pecsmány, P., Seres, A., Dobos, E. (2024). GIS and soil property-based development of runoff modeling to assess the capacity of urban drainage systems for flash floods, *Hungarian Geographical Bulletin*, 73(4), pp. 379-394. <https://doi.org/10.15201/hungeobull.73.4.3>

Dobai A., Dobos E (2025). A villámárvíz kockázati térképezési módszertan fejlesztése Észak-Magyarországi dombsági területeken. *Hidrológiai Közöny*, 105(2), pp. 24-37. <https://doi.org/10.59258/hk.19231>

Dobos, E., Daroussin, J. (2005). The derivation of the potential drainage density index (PDD). In *An SRTM-Based Procedure to Delineate SOTER Terrain Units on 1:1 and 1:5 millions scales*. By Dobos, E., Daroussin, J. and Montanarella, L., Luxemburg, Office for Official Publications for the European Communities, Luxemburg, pp. 40-45.

- Emery, C.M., Larnier, K., Liquet, M., Hemptinne, J., Vincent, A., Peña Luque, S. (2021). Extraction of roughness parameters from remotely-sensed products for hydrology applications, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/hess-2021-551>
- ÉMKTVF (2013). Észak-Magyarországi Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség – 2625-10/2012.sz vízjogi létesítési engedély számú, Kondó záportározó jogerős határozata; 2013. 4 p. Kondó település Polgár Mesteri Hivatalának adataira.
- Ennaji, N., Ouakhr, H., Halouan, S., Abahrour, M. (2022). Sediment Transport Index (STI) modeling using the GIS at Small Agricultural Catchment. *International Journal of Novel Research in Engineering & Pharmaceutical Sciences*. 2. ISSN: 2583-1658.
- Feldman, A.D. (2000). Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual; [www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical_Reference_Manual_\(CPD-74B\).pdf](http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/documentation/HEC-HMS_Technical_Reference_Manual_(CPD-74B).pdf)
- Ficklin, D., Zhang, M. (2013). A Comparison of the Curve Number and Green-Ampt Models in an Agricultural Watershed. *Transactions of the ASABE*. 56. pp. 61-69. <https://doi.org/10.13031/2013.42590>
- Galgóczy Zs. (2004). Morfometriai paraméterek vizsgálata a Nagy-Szamos forrásvidékén. *Földrajzi Közlemények* 128/1-4, pp. 89-103
- Gyalog L. (1996). A Földtani térképek jelkulcsa és a rétegtani egységek rövid leírása – MÁFI kiadvány, Budapest, p. 187.
- Harangi, Sz. (2001). Neogene to Quaternary Volcanism of the Carpathian-Pannonian Region. *Acta Geologica Hungarica*, 44 (2-3). pp. 223-258.
- Karagull, D., Frye C., Sayre R., Breyer S., Aniello P., Vaughan, R. Wright, D. (2017). Modeling global hammond landform regions from 250-m elevation data: Karagulle. *Transactions in GIS*. 21. <https://doi.org/10.1111/tgis.12265>
- Kibirige, D., Dobos, E. (2021). Off-site calibration approach of EnviroScan capacitance probe to assist operational field applications. *Water* 13. (6): 837. <https://doi.org/10.3390/w13060837>
- Knebl M.R., Yang, Z.-L., Hutchison, K., Maidment, D.R. (2005). Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event, *Journal of Environmental Management*, Vol. 75, Issue 4, 2005, pp. 325-336, ISSN 0301-4797. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.024>
- Koris K. (2002). A hazai hegy- és dombvidéki kisvízgyűjtők árvízhozamainak meghatározása. *Vízügyi Közlemények* 84(1). pp. 64-77.
- Koris K. (2021). Magyarország kisvízfolyásainak árvi-zei. (Elektronikus változat.) 1-756 o. Országos Vízügyi Főigazgatóság Budapest. https://vpf.vizugy.hu/reg/ovf/doc/koris_bala-tonyi.pdf
- Kozák, M., Püspöki, Z. (1995). Correlative relationship between denudational periods and sedimentation in the forelands of the Bükk Mts. (NE Hungary). In CBGA XV. Congress. Athen, CBGA, pp. 340-345.
- Kozák, M., Püspöki, Z., Piros, O., László, A. (1998). The structural position of the Bükk Mountains based on tectono- and pebble stratigraphic analyses. In CBGA XVI. Congress. Wien, CBGA, 303.
- Luong, T.T., Pöschmann, J., Kronenberg, R., Bernhofer, C. (2021). Rainfall Threshold for Flash Flood Warning Based on Model Output of Soil Moisture: Case Study Wernersbach, Germany. *Water* 2021, 13. <https://doi.org/10.3390/w13081061>
- Michéli E., Fuchs M., Láng V., Csorba Á., Dobos E., Szegi T., Kele G. (2024). A diagnosztikus szemléletű hazai talajosztályozási rendszer. Útmutató. Második közzététel. Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Gödöllő.
- Mohamed, M.A. (2020). Classification of Landforms for Digital Soil Mapping in Urban Areas Using LiDAR Data Derived Terrain Attributes: A Case Study from Berlin, Germany. *Land*, 9(9), 319. <https://doi.org/10.3390/land9090319>
- OVF (2024a). Országos Vízügyi Főigazgatóság - 46 /2024 számú utasítása az Országos Vízügyi Főigazgatóság és a Vízügyi Igazgatóságok racionális méretezési módszer és országos csapadékkintenzitási adatok kötelező alkalmazására vonatkozó tervezési előírásairól
- OVF (2024b). Országos Vízügyi Főigazgatóság - 47 /2024 számú utasítása az Országos Vízügyi Főigazgatóság és a Vízügyi Igazgatóságok Magyarország hegy- és dombvidéki kisvízfolyásainak árvízszámítási segédletének használatáról
- Palicz N., Makkay J. (1978). Linieamman Keramia, magyar régészet az ezredfordulón, neolitikus szakasz 2003, pp. 205-210.
- Pásztor, L., Szabó, J. Bakacsi, Zs. (2010). Application of the Digital Kreybig Soil Information System for the delineation of naturally handicapped areas in Hungary. *Agrokémia és Talajtan*. 59. p. 47-56. <https://doi.org/10.1556/agrokem.59.2010.1.6>
- Pedrotti, A., Edrotti, A., Pauletto, E.A., Crestana, S., Ferreira, M.M., Dias Jr., M.S., Gomes A.S., Turatti, A.L. (2001). Resistência mecânica à penetração de um Planosolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. *R. Bras. Ci. Solo*, 25. pp. 521-529. 2001. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832001000300001>
- Sabeti, R., Stamatakis, I., Kjeldsen, T. R. (2024). Reconstructing the 1968 River Chew flash flood: merging a HEC-RAS 2D hydraulic modelling approach with historical evidence. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 15(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2377655>
- Sarkadi, N., Pirkhoffer, E., Lóczy, D., Balatonyi, L., Geresdi, I., Fábrián, Sz., Varga, G., Balogh, R., Gradwohl-Valkay, A., Halmai, Á., Czigány, Sz. (2022). Generation of a flood susceptibility map of evenly weighted conditioning factors for Hungary. *Geographica Pannonica*, 26(3), pp. 200-214. <https://doi.org/10.5937/gp26-34866>
- Szőllősi I. (2003). Talajok tömörödöttségi állapotának jellemzése penetrométeres vizsgálatokkal, doktori (PhD) értekezés, Debreceni Egyetem, <https://dea.lib.unideb.hu/server/api/core/bitstreams/575d22ea-ba21-47b8-8bac-1f9be5e2b560/content>.

Zsuffa I. (1997). Műszaki hidrológia II., 4.4 – A vízjárás területi alakulásának vizsgálata, 235 p. Műegyetemi Kiadó.

Vágó J. (2012). A kőzetminőség szerepe a Bükkalja völgy- és vízhálózatának kialakulásában, PhD értekezés Miskolc, pp 18-20.

Várallyay Gy., Főrizs J. (1966). A helyszíni talajfelvételezés módszertana (Methodology of in situ soil survey). In A genetikus üzemi talajtérképezés módszerkönyve. Ed.: Szabolcs, I., Budapest, Táncsics Könyvkiadó, 19-164.

Wilcox, B.P., Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., Wright, J.R. (1990). Predicting runoff from rangeland catchments: A comparison of two models. *Water Resources Res.* 26(10): pp. 2401-2410. <https://doi.org/10.1029/WR026i010p02401>

Xiaowei, Z., Warren, C.J., Spiers, G., Paul, V. (2024). Comparison of the integral suspension pressure (ISP) and the hydrometer methods for soil particle size analysis, *Geoderma*, Volume 442, 2024, 116792, ISSN 0016-7061. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2024.116792>

61/2009. (V. 14.) FVM rendelet az Európai Mezőgazdasági Vidékfejlesztési Alapból nyújtott agrár-környezetgazdálkodási támogatások igénybevételének részletes feltételeiről

URL1: penetronik.hu – A Penetronik elektronikus talajvizsgáló nyomószonda használati útmutatója, E.N.S Informatikai és Rendszerintegrációs Zrt.

URL2: [hec.usace.army.mil-
https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/6.1/overview-of-optional-capabilities/modeling-precipitation-and-infiltration/green-ampt](https://www.hec.usace.army.mil/confluence/rasdocs/ras1dtechref/6.1/overview-of-optional-capabilities/modeling-precipitation-and-infiltration/green-ampt)

URL3: Meter-Pario manual: <https://www.labcell.com/media/136896/pario%20manual%20-%20email.pdf>

URL4: https://www.esri.com/arcgis-blog/products/analytics/analytics/predict-floods-with-unit-hydrographs?utm_source=chatgpt.com

URL5: <https://www.enfo.hu/keptar/1461>

URL6: <https://www.met.hu/>

A SZERZŐK



DOBAI ANDRÁS 1988-ban született Miskolcon, 2012-ben diplomát (MSc) szerzett a Miskolci Egyetem Műszaki Föld- és Környezettudományi Karán, térinformatikából. 2019-2021 között az Észak-Magyarországi Vízügyi Igazgatóság, Miskolci Szakasztechnológiai Osztály vezetője, mint területi felügyelő. Jelenleg a Mikoviny Sámuel Földtudományi Doktori Iskola doktori képzésében vesz részt, kutatási területe a hegy és dombvidéki területeken jelentkező villámárvizek vizsgálata. Tagja a Magyar Hidrológiai Társaságnak.



BÍRÓ TIBOR Okleveles agrármérnök, környezetvédelmi szakmérnök. A Debreceni Egyetemen kezdte felsőoktatási pályafutását, majd a Károly Róbert Főiskola dékányi és rektorhelyettesi, valamint a Szent István Egyetem dékányi pozícióit töltötte be. Később az NKE Víz- és Környezettudományi Karának dékányja. Az MHT alelnöke. Szakterülete a belvízrendezés, az öntözés, a hullámterek állapotértékelése és a távérzékelés vízgazdálkodási célú alkalmazásai. Számos kintutetés birtokosa, közte a Schafarzik Ferenc Emlékérem, a Köz Szolgálatáért Érdemjel Aranyfokozata, a Gátörkard elismerés, valamint a Környezet Védelméért díj. Több mint 230 publikáció szerzője.



DOBOS ENDRE 1968-ban született, Miskolcon. 1993-ban szerzett agrármérnöki diplomát a Gödöllői Agrártudományi Egyetemen, majd 1996-ban térinformatikai és környezetvizsgálati szakmérnöki végzettséget a Budapesti Műszaki Egyetem, Építőmérnöki Karán. PhD címét 1998-ban, az Amerikai Egyesült Államokban, a Purdue Egyetemen szerezte digitális talajtérképezés és kis méretarányú talajtani adatbázisok vizsgálatának témakörében, amely jelenleg is a kutatási területét képezi, kiegészülve a digitális talajtérképezési eljárásokkal. 2021-ben habilitált a Miskolci Egyetemen. Egyetemi tanár, intézeti tanszékvezető, a Miskolci Egyetem, Műszaki Föld- és Környezettudományi Kar, Földrajz-Geoinformatika Intézet, Természetföldrajz-Környezettan Intézeti tanszékén. 2022-től a Magyar Talajtani Társaság elnöke. A Magyar Hidrológiai Társaság Tudományos Bizottságának tagja.



DEÁK TAMÁS 1993-ban született, BSc (2016) és MSc (2018) diplomáját geográfusként szerezte a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karán. 2020-tól a MÁV Zrt. Miskolc Pályavasúti Területi Igazgatóságának Pályafenntartási Osztályán dolgozott. 2021 szeptemberétől a Miskolci Egyetem Földrajz-Geoinformatika Intézetének PhD-hallgatója és tudományos segédmunkatársa. Doktori kutatásának középpontjában egy talaj és térinformatikai alapú, döntéstámogató rendszert fejleszt a precíziós mezőgazdaság igényeinek megfelelően, szántóföldi öntözés céljából. A TalajGuru szoftver precíziós mezőgazdasági szolgáltató alapítója.