



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

CSAPADÉKESEMÉNYEK SZABAD FELSZÍNŰ VÍZTARTÓKRA ÉS PRÓBASZIVATTYÚZÁSRA GYAKOROLT HATÁSA

TDK Dolgozat

2020

KÉSZÍTETTE:

HEGEDŰS NOÉMI

IV. éves építőmérnök hallgató

KONZULENSEK:

FARKAS DÁVID

DR. FARKAS-KARAY GYÖNGYI

TARTALOMJEGYZÉK

| | |
|---|----|
| Ábrajegyzék | 3 |
| Táblázatjegyzék..... | 4 |
| Képjegyzék..... | 4 |
| 1. Bevezetés | 5 |
| 2. Csapadék és a felszín alatti víz kapcsolata | 5 |
| 3. A kismintavizsgálatok elmélete | 6 |
| 3.1. Hasonlóságok..... | 6 |
| 3.2. Mosonyi-Kovács modelltörvény | 8 |
| 4. Fizikai modell bemutatása | 9 |
| 4.1. A kismintamodell paramétereinek ismertetése..... | 9 |
| 4.2. Korábbi mérésekből adódó problémák..... | 11 |
| 4.3. Talajminta szemcseméret-eloszlásának vizsgálata | 13 |
| 5. Szakirodalmi áttekintés | 16 |
| 6. Elméleti összefüggések bemutatása | 18 |
| 6.1. Felszín alatti vízmozgás áramlási viszonyainak jellemzése | 18 |
| 6.2. Szivárgási tényező meghatározása próbaszivattyúzással – Dupuit-módszer | 20 |
| 6.3. Darcy-törvény sekélyvizi közelítéssel – Dupuit-Boussinesq elmélet..... | 21 |
| 7. Mérési módszertan bemutatása | 23 |
| 7.1. Mérések folyamatának ismertetése..... | 23 |
| 7.2. Vízhozamok mérési és kiértékelési módszere | 24 |
| 7.3. Vízszintek mérési és kiértékelési módszere | 26 |
| 8. Eredmények bemutatása | 29 |
| 8.1. Kezdeti mérések tapasztalatai..... | 29 |
| 8.2. A Modell és a mérések elvének módosítása | 33 |
| 8.3. Módosított mérések I. | 33 |
| 8.4. Módosított mérések II..... | 37 |

| | | |
|------|---|----|
| 8.5. | Vízhozam-idősor kezdeti szakaszának vizsgálata | 41 |
| 8.6. | Vízhozam-idősor csapadék utáni szakaszának vizsgálata | 46 |
| 8.7. | További tervek a csapadékesemények hatásának vizsgálatára | 50 |
| 9. | Összefoglalás | 50 |
| | Felhasznált irodalom | 53 |
| | Köszönetnyilvánítás | 56 |

ÁBRAJEGYZÉK

| | | |
|-----------|--|----|
| 1. ábra: | Felső peremen növekvő vízszintek | 12 |
| 2. ábra: | A minták 0,5 mm lyukátmérőn fennmaradt százalékos értékei | 15 |
| 3. ábra: | A minták 0,25 mm lyukátmérőn fennmaradt százalékos értékei | 15 |
| 4. ábra: | A minták 0,125 mm lyukátmérőn fennmaradt százalékos értékei | 15 |
| 5. ábra: | A minták 0,063 mm lyukátmérőn fennmaradt százalékos értékei | 15 |
| 6. ábra: | A minták 0,063 mm lyukátmérőn átesett százalékos értékei | 15 |
| 7. ábra: | Szakirodalomban alkalmazott modell vázlatrajza (Guérin A. et al 2014) | 17 |
| 8. ábra: | Laborkísérlet eredményei: intenzitás és vízhozam idősor görbe (Guérin A. et al 2014) | 18 |
| 9. ábra: | 3 percig tartó csapadék intenzitása az idő függvényében..... | 30 |
| 10. ábra: | 3 perces csapadékesemény árhullámképe | 30 |
| 11. ábra: | 3 perces csapadékesemény árhullámképe 1 nap után..... | 32 |
| 12. ábra: | 3 perces csapadék árhullámképe pár perc különbséggel | 32 |
| 13. ábra: | 1 percig tartó csapadék intenzitása az idő függvényében..... | 34 |
| 14. ábra: | 1 perces csapadékesemény árhullámképe | 34 |
| 15. ábra: | 1 perces csapadék hatására kialakuló vízszintek a megfigyelőkutakban | 35 |
| 16. ábra: | Anyakút palástján elhelyezett piezométerekben kialakuló vízszint az 1 perces csapadékesemény hatására | 36 |
| 17. ábra: | Fél percig tartó csapadék intenzitása az idő függvényében | 38 |
| 18. ábra: | Fél perces csapadék árhullámképe | 38 |
| 19. ábra: | Fél perces csapadék hatására kialakuló vízszintek a megfigyelőkutakban | 40 |
| 20. ábra: | Fél perces csapadék hatására kialakuló tetőző vízszintek a 4-9. megfigyelőkutakban | 40 |

| | |
|--|----|
| 21. ábra: Anyakút palástján elhelyezett piezométerekben kialakuló vízszint fél perces csapadékesemény hatására | 41 |
| 22. ábra: Laborvizsgálat által kimutatott vízhozam lineáris változása (Guérin A. et al. 2014) | 42 |
| 23. ábra: 3 perces csapadékesemény kezdeti szakasza..... | 43 |
| 24. ábra: 1 perces csapadékesemény kezdeti szakasza..... | 44 |
| 25. ábra: Fél perces csapadékesemény kezdeti szakasza | 45 |
| 26. ábra: Csapadékesemény utáni vízhozam idősor Guérin A. et al kiértékelése alapján | 46 |
| 27. ábra: 3 perces csapadékesemény utáni árhullámkép és az $1/t^2$ függvény kapcsolata | 48 |
| 28. ábra: 3 perces csapadékesemény utáni árhullámképre illesztett hatványgörbe..... | 49 |

TÁBLÁZATJEGYZÉK

| | |
|--|----|
| 1. táblázat: Mosonyi-Kovács modelltörvény arányszámái (Mosonyi és Kovács 1952) | 9 |
| 2. táblázat: A talajminták szitálásból kapott szemeloszlási eredményei | 14 |
| 3. táblázat: Párolgásmérés adatai | 26 |

KÉPJEGYZÉK

| | |
|---|----|
| 1. Kép: Megfigyelőkutak beépítése..... | 10 |
| 2. Kép: A modell homokkal való feltöltése..... | 10 |
| 3. Kép: Kismintamodell felett elhelyezett szórófejek | 11 |
| 4. Kép: Kismintamodell takarítása a talajminta és a fémrács eltávolítása után | 13 |
| 5. Kép: Korrodált fémlemez tisztítása..... | 13 |
| 6. Kép: Hagyományos vízmennyiségmérő..... | 25 |
| 7. Kép: Gardena digitális vízmennyiségmérő | 25 |
| 8. Kép: Videófelvételtől egy kinyert torzított kép..... | 27 |
| 9. Kép: Videófelvételtől egy kinyert kép torzítatlan változata..... | 28 |

1. BEVEZETÉS

Csapadék hatására a vízgyűjtők vízrajza, a talajvízszint megváltozik. Ez a változás kezdetben meredek növekedést mutat az idő függvényében, míg a csapadékesemény utáni időszakban a vízszint lassan csökken (Sefton et al, 1995). A víztartók kezdetben tárolják a vizet, majd továbbadják a vízfolyásoknak, melyek elvezetik egy befogadóba (Harman & Sivapalan, 2009; Kirchner, 2009). A csapadékesemények helyszíni és laborkísérleti módszerekkel való vizsgálata széles körben elterjedt.

A felszín alatti víztartókkal és kúthidraulikával kapcsolatos kisminta modellel végzett kutatásomat 2018 júliusában kezdtem a BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszékén. Eredményeimet korábbi években két TDK dolgozat formájában ismertettem. Eddigi munkám során a 2011-ben épült fizikai modell fejlesztésével is foglalkoztam, így a mérésekből származó adatok felhasználhatóságának palettája folyamatos bővítés alatt állt.

Jelen dolgozatom keretein belül ismertetem a kisminta modellen eszközölt azon átalakításokat, amikkel vizsgálni kívántam a csapadékesemények felszín alatti szabad felszínű víztartók vízháztartására, valamint a kutak hozamára gyakorolt hatásait. Ily módon különböző mérőszámokkal leírható csapadékok hatását tudom majd tanulmányozni mind a víztartó réteg, mind pedig a kutak vízádóképeségének tekintetében. Ezzel együtt kimutathatóvá teszem a csapadékesemények próbaszivattyúzásra gyakorolt hatását, így képet kaphatunk arról, hogy a meteorológiai körülmények hatására a mérések eredményei milyen mértékben változnak.

2. CSAPADÉK ÉS A FELSZÍN ALATTI VÍZ KAPCSOLATA

A felszín alatti vízkészlet az élet fennmaradásához létfontosságú elem. Ez a Föld legnagyobb víztározója, mely körülbelül hetvenszer annyi vízmennyiséget jelent, mint a felszíni vízkészletek (Fetter, 2001). Magyarországon a felszín alatti vizek jelentősége az ivóvízellátásban kiemelkedő, hisz ivóvízkészleteink 95%-a felszín alatti vizekből származik. A szélsőséges időjárási viszonyok már számos esetben okoztak problémát az ivóvízellátásban. A nyári száraz időszakokban csökkent a vízkészlet és az ezzel egyidejűleg jelentkező magasabb vízigény hatására egyes területeken vízhiány alakult ki. Más esetben a csapadékos időjárás hatására nagy árvizek jelentkeztek (Rotárné et al. 2015). Továbbá a felszín alatti vízkészlet nem termelhető ki korlátlanul, környezeti következmények kockázata nélkül. A talajvíz túlzott kitermelése süllyedéssel kapcsolatos problémákat is okozhat (Narasimhan 2009).

A felszín alatti ivóvízbázisokat alkotó földtani közegekből, víztartókból kitermelhető vízmennyiséget főként a talaj szemcsetámérője határozza meg, mely szoros összefüggésben van a szivárgási tényezővel. A kitermelhető víz mennyiségéről, a vízáadó tulajdonságairól pontosabb információt próbaszivattyúzás elvégzésével lehet megtudni. A próbaszivattyúzás a mérnöki gyakorlat egyik széleskörűen használt terepi módszere, melynek célja, hogy a vizsgált víztartó talajfizikai és vízföldtani paramétereit meghatározzuk. A vizsgálatokkal foglalkozó szakirodalmak a mérések alatt előfordulható különböző hibaforrásokat jelölnék meg, melyek hatásai később az adatok kiértékelésekor a végeredményeket terhelhetik. Az egyik ilyen hatás a felszín alatti vizek gyarapodását segítő csapadékesemények. Több szabvány és szakmai ajánlás kiemeli a próbaszivattyúzás alatti csapadékmérés fontosságát, viszont torzító hatására vonatkozó összefüggéseket nem közölnek. (Farkas, 2020)

A felszín alatti vizek nagymértékben hozzájárulnak a felszíni vízfolyásokhoz, vízkészletekhez, így nem csak vízellátás céljából fontosak, hanem befolyásolják a felszíni vizek mennyiségét is (Genereux, Hooper, 1998). Csapadékesemény során az esővíz egy része a talaj felszínén maradván lefolyásként távozik, míg a fennmaradó hányad jelentős része beszivárog a porózus talajba (Horton 1945, McDonnell 1990, Neal & Rosier 1990, Kirchner, Feng & Neal 2000). A gravitáció hatására beszivárgó víz eljut a víztartóhoz és megemeli annak felszínét. A beáramló víz nyomásnövekedése miatt a talajban áramlás indul meg (Sanford, Parlange & Steenhuis 1993, Szilágyi & Parlange 1998, Andermann et al. 2012, Devauchelle et al. 2012).

3. A KISMINTAVIZSGÁLATOK ELMÉLETE

A hidromechanikai kismintavizsgálatok elméletének alapfogalma a rendszerek, folyamatok, jelenségek hasonlósága. Hasonlónak nevezzük azokat a hidromechanikai folyamatokat, amelyekben az egymásnak megfelelő jellemző mennyiségek viszonya állandó (Ivicsics 1968).

3.1. HASONLÓSÁGOK

Ez az eset a hasonlóság legegyszerűbb esete. Ha a vizsgált rendszerben pontnak pont, egyenesnek egyenes úgy felel meg, hogy a megfelelő távolságok aránya állandó, a rendszereket geometriailag hasonlónak mondjuk. Az egymásnak megfelelő pontok távolságának viszonyát (C) nevezzük méretaránynak. Ennek értékét zérus és végtelen határok között elvileg tetszőlegesen vehetjük fel, kivéve természetesen a két határértéket, vagyis meghatározott

geometriai rendszernek tetszőleges méretarányban nagyított vagy kicsinyített megfelelőjét vizsgálhatjuk (Ivicsics 1968).

Ha az összehasonlított rendszerek mozognak, megvizsgálhatjuk, hogy azok a mozgások lefolyása szempontjából, vagyis kinematikailag hasonlók-e. A rendszereket kinematikailag hasonlóknak akkor nevezzük, ha bennük a mozgási folyamatok úgy játszódnak le, hogy lefolyásuk egymásnak megfelelő időtartamai kielégítik a $\frac{t'}{t''} = C_t$ egyenletet. Ezt az arányszámot, éppúgy, mint a megfelelő geometriai méretek viszonyát, szabadon választhatjuk. Ha C és C_t értékeit megválasztottuk, a hosszúságból és az időből összetett dimenziójú mennyiségek viszonya már nem állapítható meg önkényesen, az csak is meghatározott érték lehet (Ivicsics 1968).

Az összehasonlított rendszereket megvizsgálhatjuk abból a szempontból is, hogy erőtanilag, dinamikailag hasonlók-e. A dinamikai hasonlóság feltétele a $\frac{P'}{P''} = C_F$ arány állandósága. A C_F értékét, éppúgy, mint a C és a C_t értékét, szabadon választhatjuk. Azonban ezzel már meghatározzuk mindazoknak a mennyiségeknek a viszonzszámát, amelynek dimenziója a hosszúság, idő, erő (vagy tömeg) alapidimenziókból származtatható le (Ivicsics 1968).

A C , C_F , C_t paraméterek dimenziója 1. Ez érthető, hiszen mindhárom, mint azonos dimenziójú mennyiségek viszonyát értelmezzük. Ennek eredményeképpen bármely mértékegységben is fejezzük ki azokat a mennyiségeket, amelyeknek viszonyaként a C , a C_F és a C_t mennyiségeket értelmezzük, ha mind a számlálóban mind a nevezőben ugyanazon mértékegységben kifejezett mennyiségek szerepelnek, a törtek értéke változatlan marad. Vagyis a C , a C_F és a C_t értéke változatlan, akár a kismintára, akár pedig a nagyméretű jelenségre vonatkozó mennyiségeket helyettesítjük a számlálóba és a nevezőbe. Ezeket a mennyiségeket invariánsoknak nevezzük (Ivicsics 1968).

Invariánsokat, vagyis olyan mennyiségcsoportokat, amelyeknek számértéke nem változik meg, bármilyen mértékegységben is fejezzük ki a bennük szereplő mennyiségeket, feltételezve, hogy egy-egy behelyettesítés - sorozatban ugyanazok az alapidimenziók szerepelnek, nemcsak két, hanem több mennyiségből is alkothatunk. A mennyiségek számértékének invarianciája lehetővé teszi azt, hogy a különböző méretekből lejátszódnó folyamatok egymásnak megfelelő jellemző mennyiségei közötti kapcsolatot matematikailag egyértelműen kifejezhessük. Ezért gyakran kismintatörvényeknek is nevezik ezeket a mennyiségcsoportokat. (Ivicsics 1968).

3.2. MOSONYI-KOVÁCS MODELLTÖRVÉNY

Mosonyi Emil az átszámítási tényezők meghatározása során a nehézségi és belső súrlódásból származó erők egyenlőségéből indult ki, és a nagyméretű szivárgási folyamat, valamint kicsinyített megfelelője esetére az

$$I' \gamma' l' z'^2 \pi = 2 \pi z' l' \frac{dv'}{dz'} \eta' \quad [1]$$

és az

$$I'' \gamma'' l'' z''^2 \pi = 2 \pi z'' l'' \frac{dv''}{dz''} \eta'' \quad [2]$$

egyenleteket írta fel, ahol:

- I a hidraulikus gradiens [-]
- η a dinamikai viszkozitás [Ns/m²]
- γ a víz térfogatsúlya [N/m³]
- z a geodéziai magasság [m]
- l a szivárgási hossz [m]
- v a szivárgás sebessége [m]

Ezek alapján:

$$\frac{v'}{v''} = 1 \quad [3]$$

egyenletet határozta meg. Feltételezve, hogy a Darcy-képlet érvényes, felírható a

$$k' I' = k'' I'' \quad [4]$$

egyenlőség, ennek alapján pedig, feltételezve, hogy a kismintavizsgálatok esetén ugyanolyan a talaj, mint amelyben a nagyméretű szivárgási folyamat lejátszódik, és így

$$k' = k'' \quad [5]$$

végeredményül az

$$I' = I'' \quad [6]$$

egyenlőségre jutunk (Ivicsics 1968).

A 2. táblázatban összefoglaltam az általam használt kisminta esetében alkalmazandó arányszámok értékeit. A Mosonyi-Kovács törvény értelmében a talaj szemcsenagyságát is az

arányzámnak megfelelően kicsinyíteni kéne. Azonban mivel a modellben és a valóságban lezajló folyamatokat úgy tekintjük hasonlóknak, hogy feltételezzük a Darcy-törvény érvényességét, így ugyanazon szemcsemérettel jellemezhető talaj alkalmazása esetén a szivárgó mozgás során hasonló hidraulikus gradiensek és hasonló szivárgási sebességek fognak adódni. hogy a modellben és a valóságban mivel ugyanazon talajok a modellbeli és a valós szemcsenagyságok megegyeznek, ezért a szivárgási tényező értékek is egyenlők lesznek (Mosonyi 1955).

1. táblázat: Mosonyi-Kovács modelltörvény arányszámjai (Mosonyi és Kovács 1952)

| Fizikai mennyiség | Mosonyi-Kovács törvény arányszorzói | | | |
|-------------------|-------------------------------------|-------|-----------------|-------|
| | Torzítatlan | | Torzított | |
| Hossz | C | 9,41 | C | 9,41 |
| Terület | C ² | 88,5 | C ² | 88,5 |
| Térfogat | C ³ | 833 | C ³ | 833 |
| Idő | C ⁻¹ | 0,106 | C | 9,41 |
| Sebesség | C ² | 88,5 | C ⁰ | 1,00 |
| Gyorsulás | C ³ | 833 | C ⁻¹ | 0,106 |
| Hozam | C ⁴ | 7840 | C ² | 88,5 |

4. FIZIKAI MODELL BEMUTATÁSA

4.1. A KISMINTAMODELL PARAMÉTEREINEK ISMERTETÉSE

A kitűzött vizsgálatok elvégzésére a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék laboratóriumában található kismintamodell adott lehetőséget.

A modell körcikk alaprajzú. A két oldalfal által közbezárt szög 90°. A kísérleti tér a kút tengelyvonalától 133,5 cm-re helyezkedik el, ez a modell teljes sugarának felel meg. A teljes víztérig tartó hossz, azaz a víztérig tartó sugár 128 cm. A modell teljes magassága 100 cm, tömege 100 kg, térfogata 1,4 m³.



1. Kép: Megfigyelőkutak beépítése



2. Kép: A modell homokkal való feltöltése

A valóságban a próbaszivattyúzások hengerszimmetrikus leszívási folyamatot eredményeznek, így a kismintamodell esetében megengedett a negyed körcikk alakú modell használata, mert korábban már bebizonyították, hogy a vizsgálatok eredményeit a modell alakja nem torzítja (Barta et al. 2012; Szabó et al. 2012). Korábbi mérésekkel igazolták azt is, hogy a kismintamodell alkalmas a szivárgási tényező meghatározására, ugyanis a kapott értékek megfelelnek a szakirodalmi adatoknak (Barta et al. 2012).

A modell megépítésekor mind a vízbevezetésnél és a vízkivezetésnél is bukó lett beépítve a modellbe, így a leszívást a két bukó szintkülönbsége generálta. Ezzel biztosította az egyenletes vízkivételt. A mérések során a vízkitermelés hatására létrejött leszívási görbék mérését a modell fenék- és oldallemezén kialakított 10-10 darab piezométerrel regisztráltam. A fenéklemezen lévő piezométerek sugárirányban, míg az oldallemezen található piezométerek 2 oszlopban egymás alatt 5 centiméterenként helyezkednek el. Az oldalfalon elhelyezett piezométerek segítségével a kút közvetlen környezetében kialakuló nyomásviszonyokról több információt lehet gyűjteni.

Az alkalmazott termelőkút 17 mm átmérővel rendelkezik, mely biztosítani tudja a kellő mértékű leszívást. A kút 45 fokban szűrőzött annak érdekében, hogy a szívás ne csak egy adott ponton, például a kút alján alakuljon ki, hanem a kút teljes hosszán. Az anyakúttal azonos átmérővel beépítettem 10 darab megfigyelőkutat az oldalfaltól: 8, 12, 17, 27, 37, 50, 63, 76, 90 és 105 cm-es távolságra (1. kép). Egy 11. „megfigyelőkutat” hoztam létre azért, hogy a felső peremet alkotó víztérbe helyeztem egy flexibilis piezométer csövet és bekötöttem a piezotáblába. Ezzel egyúttal azt is ellenőrizni tudtam a 10. piezométer adataival összevetve, hogy a felső perem a teljes hengerfelület mentén egyenletes marad. Ezek a kutak vonalmenti megfigyelőként viselkedtek. Minden megfigyelőkút és a termelőkút is perforált PVC anyagú csövek, melyek geotextíliába burkoltak, hogy megelőzze a finom frakció bemosódását.

A vízteret geotextíliával burkolt fémrács választja el a talajjal megtöltött modelltéről. A fémrács a fizikai elhatárolást biztosítja, ez különíti el a modellteret a felső peremtől, a geotextília az apró szemcsék szűrésére szolgál, hogy azok ne mosódjanak a vízterbe.

Ahhoz, hogy az eddig próbaszivattyúzás tanulmányozására használt modellt csapadékesemények vizsgálatára alkalmassá tegyem, a modellen kiegészítéseket kellett eszközölnöm. Szükségem volt egy csapadékot imitáló berendezésre, melyet két szórófej és vízhálózatra rákötött tömlőkkel oldottam meg. Ez a berendezés a modell fölé körülbelül 1 méterrel rögzítve biztosította a vízrávezetést, mely a csapadékot szimbolizálta (3. kép). A szórófejek beállításánál törekedtem arra, hogy a modellter minden pontjára eljusson a csapadék, de a teljesen homogén eloszlás nagy valószínűséggel nem teljesült.

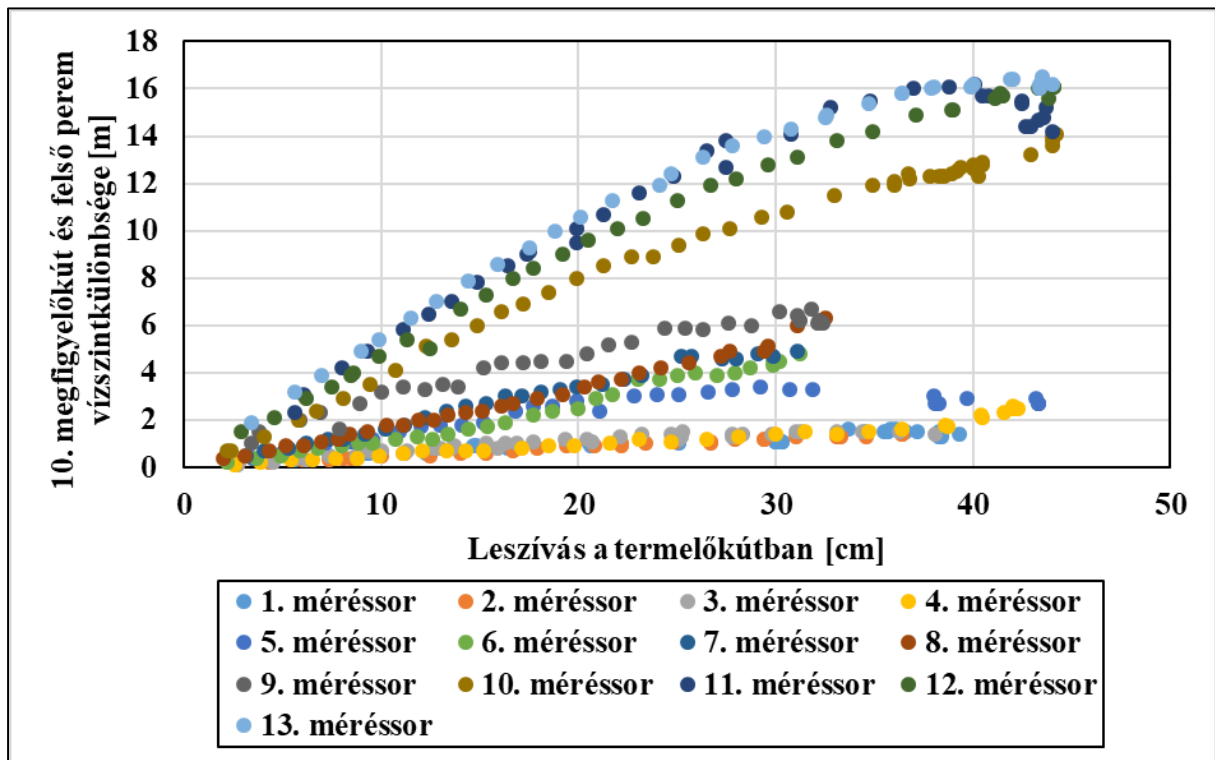


3. Kép: Kismintamodell felett elhelyezett szórófejek

4.2. KORÁBBI MÉRÉSEKBŐL ADÓDÓ PROBLÉMÁK

A 2018 augusztusától 2019 októberéig tartó mérésorozat alatt a felső perem, illetve az ehhez legközelebb eső, a termelőkúttól legtávolabb elhelyezkedő 10. számú megfigyelőkút közötti vízszintkülönbségek folyamatosan nőttek annak ellenére, hogy az előállított leszívások tartománya nem változott. A 1. ábrán látható a jelenség, mikor is az idő előre haladtával adott leszíváshoz rendre nagyobb szintkülönbségeket mértem a különböző mérésorokkor. Látható, hogy például a 30 cm-es leszívásokhoz tartozó, kezdetben körülbelül 1 cm-t kitevő felső perem és 10. megfigyelőkút közötti szintkülönbség a 13. méréssornál már 14 cm-re nőtt. A

piezométerek és megfigyelőkutak adatai alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a modellteret és vízteret elválasztó perforált lemez vagy a hozzáérősített geotextília felülete válhatott kevésbé vízáteresztővé, ez okozhatta a helyi jellegű, jelentős modelltérbe történő belépési veszteséget.



1. ábra: Felső peremen növekvő vízszintek

Az új mérések megkezdése előtt mindenképpen szükség volt a felső peremet érintő probléma kiküszöbölésére, amihez a modellben lévő talajmintát is ki kellett termelni. A talajminta kiemelését követően tisztázódott a nyomásvesztés eredete. 2018 augusztusában a perforált lemezen már láthatók voltak a korrózió nyomai, hiszen a lemez 2011 óta szinte folyamatosan víz alatt volt. Ekkor a felületi rozsdá nagy része eltávolításra került, majd a lemez egy új geotextíliaréteg borítást kapott. Ahogy az az 5. képen látható két évvel később a korrózió jelentős méreteket öltött a lemezen, melynek folyamányaként a geotextília réteg „belekötött” a perforált lemezbe, így egy nagyon rosszul áteresztő felület alakult ki a felső peremen.

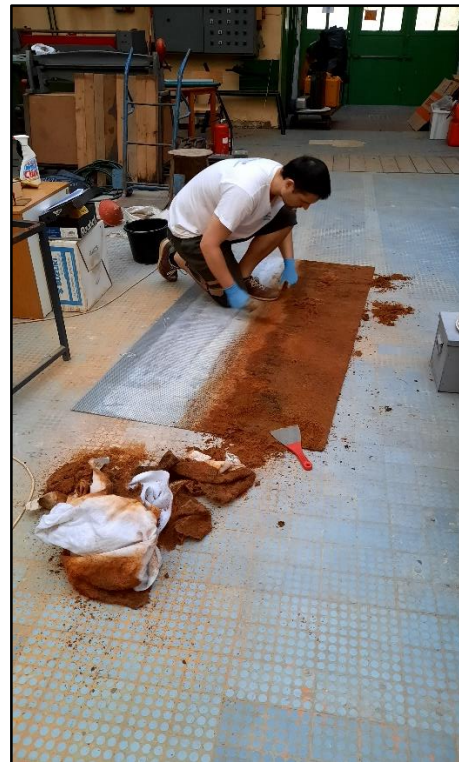
Ennek javítására Ro 55 folyadékot használtam, mely segítette a felületet jó állapotra hozni. A folyadékot a fémrács felületére ecsettel vittem fel, kicsit állni hagytam, majd hosszú idejű drótkéféssel távolítottam el a felületi rozsdá jelentős részét. Ezt a folyamatot többször meg kellett ismételni a rozsdátlanítás érdekében. Azért, hogy a későbbiekben a korrózió ne okozzon problémát a felület csiszolására és lefestésére volt szükség, melyben a laborban dolgozó kollegák nyújtottak segítséget.

A beépített fémrács 1 méter magas, a vizsgált talajréteg vastagsága 50 cm, így a rácson átáramló víz körülbelül a modell fenekétől számítva maximum 55 cm magasságig volt jelen. Emiatt a rács azon része, mely nem volt folyamatos vizes közegnek kitéve jóval kevésbé, szinte semennyire nem volt korrodálva. Természetesen a rozsdá eltávolítását és a felületi kezelést a lemez teljes egészén elvégeztem, ennek ellenére beépítéskor a rácsot 180°-ban elforgattam, így a korábban berozsdált rész most nem került víz alá, ezzel is csökkenteni kívántam a korrozio újabb kialakulásának esélyét. A felső peremre új geotextília borítást helyeztem, így visszakaptam a kezdeti, ép állapotát.

A perforált rács mögött elhelyezkedő víztér falai, valamint a távtartóként szolgáló függőleges PVC csöveket a rozsdás víz elszínezte, így ezeknek a megtisztítását is elvégeztem (4. kép). A modell karbantartási munkáinak végeztével a talaj visszatermelésre került.



4. Kép: Kismintamodell takarítása a talajminta és a fémrács eltávolítása után



5. Kép: Korrodált fémlemez tisztítása

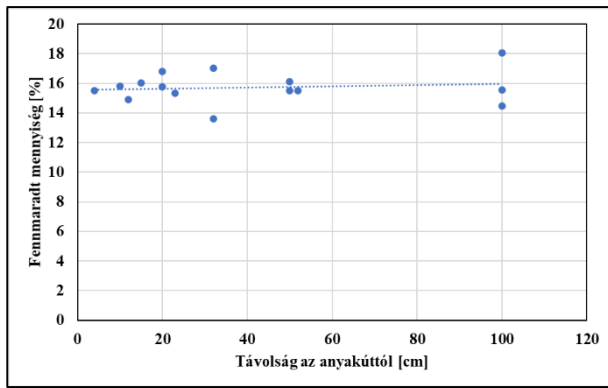
4.3. TALAJMINTA SZEMCSEMÉRET-ELOSZLÁSÁNAK VIZSGÁLATA

A kismintában vizsgált talajminta 2018 augusztusa óta szinte folyamatosan vizsgálat alatt állt, különböző peremfeltételek mellett, de áramló víz hatásának volt kitéve. A fizikai modell karbantartását indokló talajminta kitermelését megelőzően 15 darab talajmintát vettem a modell különböző pontjaiból. A mintákat egyenként 5 cm átmérőjű PVC cső segítségével, kiszűrő

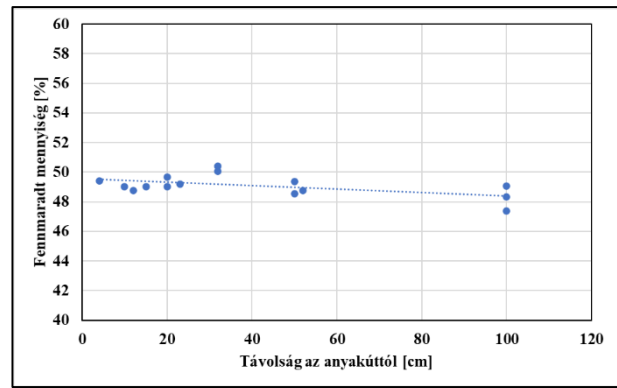
technikával vettem a talajminta teljes rétegvastagságából. A minták számát a rendelkezésemre álló gyűjtőedények korlátozták. A mintavétel célja annak vizsgálata volt, hogy az anyakúttól való távolság összefüggésben áll-e a kisebb átmérőjű talajszemcsék mennyiségével. Feltételeztem, hogy a kúttól távolodva a finomabb szemcsék nagyobb hányadát teszik ki a talajmintának. Ezt a szivárgási sebesség csökkenésével, illetve a talajszemcsék elmozdulásához kapcsolódó határsebességgel lehetne megmagyarázni. A 2. táblázatban foglaltam össze a talajminták szitasoros kiértékeléséből kapott értékeit, valamint feltüntettem a minták termelőkúttól számított távolságát. Az 2-5. ábrákon a különböző lyukátmérőjű szitákon fennmaradt mennyiségeket arányosítottam az egyes minták teljes tömegéhez. Ezzel megkaptam egy-egy mérethatárhoz tartozó szemcsék a teljes minta hány tömegszázalékát tették ki.

2. táblázat: A talajminták szitálásból kapott szemeloszlási eredményei

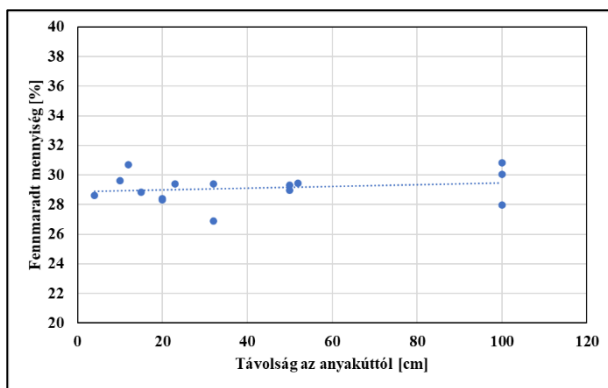
| Lyuk- átmérő [mm] | Minta sorszama | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 1. | 2. | 3. | 4. | 5. | 6. | 7. | 8. | 9. | 10. | 11. | 12. | 13. | 14. | 15. |
| 1.0 | 8.6 | 10 | 9.3 | 9.0 | 10.1 | 9.8 | 7.0 | 8.3 | 7.9 | 10.1 | 10.6 | 9.1 | 6.4 | 5.4 | 8.9 |
| 0.5 | 49.6 | 64.1 | 67.4 | 68.5 | 66.6 | 64.9 | 47.4 | 57.7 | 52.2 | 72.7 | 71.5 | 66.5 | 36.4 | 44.6 | 65.3 |
| 0.25 | 158 | 198.7 | 206 | 199.6 | 212.4 | 170.4 | 155.1 | 182 | 167.3 | 213.8 | 225 | 206.7 | 134.9 | 151.3 | 196.7 |
| 0.125 | 91.6 | 120 | 121.2 | 115.4 | 124.5 | 100.5 | 97.7 | 104 | 100 | 114.9 | 135.9 | 128.5 | 78.7 | 95 | 118.8 |
| 0.063 | 10.8 | 10.5 | 14.3 | 13.3 | 14.5 | 12.2 | 9.7 | 12.9 | 11.2 | 13.7 | 16.4 | 14.6 | 9.8 | 10.4 | 13.7 |
| 0.0 | 1.3 | 2.0 | 1.9 | 1.5 | 2.0 | 1.7 | 1.2 | 1.4 | 1.5 | 1.8 | 2.1 | 2.2 | 1.4 | 1.6 | 1.7 |
| Σ | 319.9 | 405.3 | 420.1 | 407.3 | 430.1 | 359.5 | 318.1 | 366.3 | 340.1 | 427.0 | 461.5 | 427.6 | 267.6 | 308.3 | 405.1 |
| Táv. a kúttól [cm] | 4 | 10 | 15 | 20 | 50 | 100 | 12 | 20 | 23 | 32 | 52 | 100 | 32 | 100 | 50 |



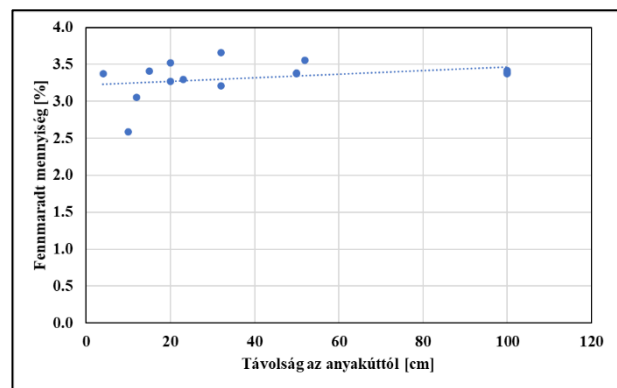
2. ábra: A minták 0,5 mm lyukátmérőn fennmaradt százalékos értékei



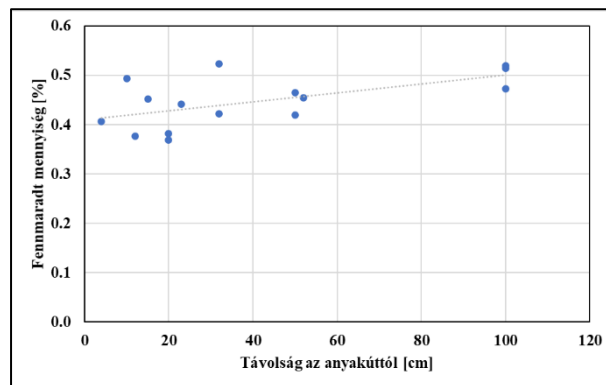
3. ábra: A minták 0,25 mm lyukátmérőn fennmaradt százalékos értékei



4. ábra: A minták 0,125 mm lyukátmérőn fennmaradt százalékos értékei



5. ábra: A minták 0,063 mm lyukátmérőn fennmaradt százalékos értékei



6. ábra: A minták 0,063 mm lyukátmérőn átesett százalékos értékei

Az 2-5. ábrákról leolvashatók, hogy a 0,063 mm lyukátmérőn fennmaradt, illetve átesett értékeknél megfigyelhető, hogy a kúthoz közelebb a minták szórása jóval nagyobb, mint a kúttól távolodva. Ez a jelenség nem figyelhető meg markánsan a 0,5 mm, 0,25 mm és 0,125 mm átmérők esetében. Mivel a kút környezetében több mintavétel készült, így teljes biztonsággal nem jelenthető ki, hogy a kúttól távolodva a finom szemcsék mintánkénti előfordulását kisebb szórás jellemzi. Ehhez a következőkben több mintát kell kiértékelni oly

módon, hogy a kúttól azonos távolságokból vett talajminták száma minél jobban megegyezzenek.

5. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

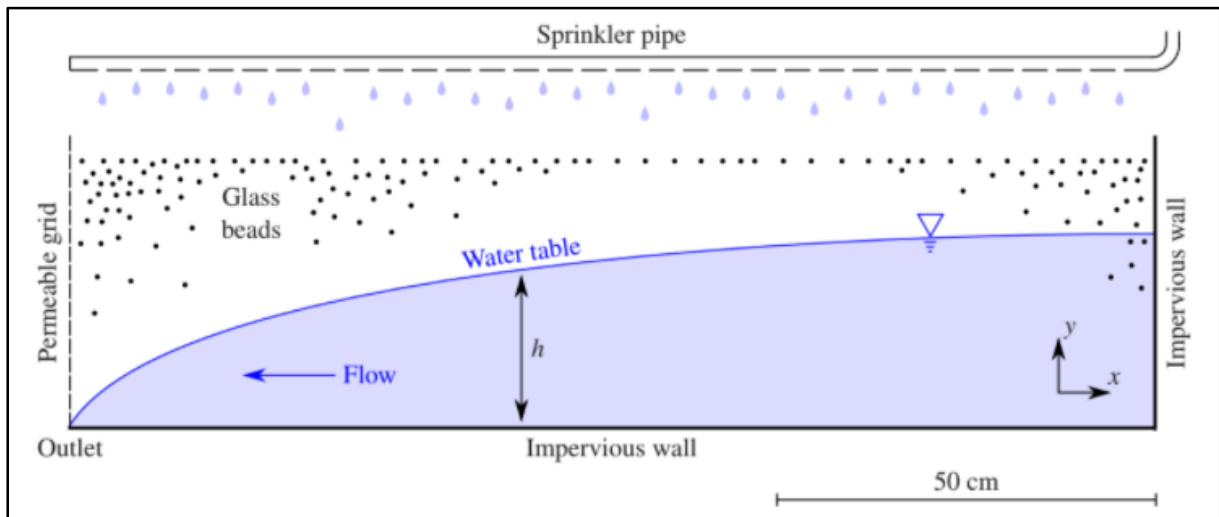
A csapadékesemények hatását vagy azzal összefüggésben lévő árvízi eseményeket vizsgáló több szakirodalom is kiemeli a Darcy-törvényen alapuló Dupuit-Boussinesq-egyenletet (6.3. fejezet) a vízhozam-idősorok elemzésére, mint jól használható elméleti összefüggést. Ebben a fejezetben röviden bemutatok három olyan egymástól eltérő kutatást, melyben az említett egyenlet jelentőséggel bírt. Ezek közül az egyiket részletesen ismertetem, hisz kiértékeléseimnél ezzel kapcsolatban tettem megállapításokat és irányt mutatott vizsgálataim elvégzésében.

Szilágyi József és Parlange Marc B. (1998) kutatásaik során az Amerikai Egyesült Állokban lévő négy darab vízgyűjtőterületre végeztek vizsgálatokat. Megfigyelésük 32 darab árvízi eseményre terjedt ki, melyek során digitális műszerrel mérték a kialakuló vízszinteket. A vízhozam értékeket burkológörbe segítségével származtatták a meglévő vízszint adatokból. Boussinesq-egyenlet alapján a folyó teljes vízhozamából az alapvízhozam leválasztására törekedtek. Kutatásaik során lépésenként meghatározták teljes árhullámképről az alapvízhozam leválasztásának elvét. Ezek a lépések számítógépes algoritmussá átalakíthatók.

A Guérin A. et al. (2019) árvízi események vizsgálatával foglalkoztak. Kutatásaik egy vízgyűjtőterületre terjedtek ki, ahol három éven keresztül folyamatosan mérték a területen kialakuló vízszinteket és a területről lefolyó vízmennyiséget. Kiértékelésük arra irányult, hogy megállapítsák, hogy a talajvíz és a lefolyás milyen gyorsan reagál a csapadékra, illetve, hogy a vízgyűjtő árvíz esetén hogyan viselkedik. Vizsgálataik során azt tapasztalták, hogy csapadék hatására a talajvíz és a lefolyó vízmennyiség percekben belül megemelkedik. Kiértékeléseikhez a Boussinesq-közelítést alkalmazták. Kutatásaik eredménye alapján arra a következtetésre jutottak, hogy a csapadékesemény idején a talajvíz változását a Boussinesq-egyenlet jó közelítéssel megadja, ettől eltérő időjárási viszonyok esetén az egyenlet nem ad megbízható eredményt.

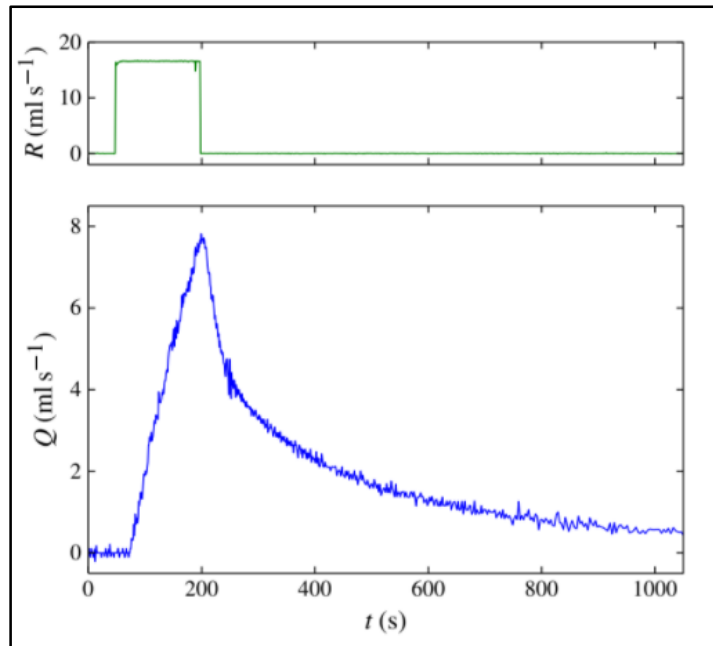
Guérin A. et al. (2014) laborkísérletekkel vizsgálták a csapadék víztartóra és vízkivételre gyakorolt hatását. Résmmodelljük 143 cm hosszú, 43 cm magas és 5 cm széles volt, melyet kezdetben 1 mm, majd 4 mm átmérőjű üveggolyókkal töltöttek fel. Az üveggolyók a vízvezető réteget alkotó ideális talajszemcséket reprezentálták, melyek gömb alakúak és vízfelvételük

nulla, a szemcséken keresztül nem történik áramlás. A kísérleteik alkalmával számított átlagos szivárgási tényező 1 mm-es golyók esetén $9,7 \cdot 10^{-3}$ m/s-ra, 4 mm-es gyöngyökkel $5,7 \cdot 10^{-2}$ m/s-ra adódott. A csapadékesemény szimulálásához egy permetcsövet használtak, mely egyenletesen osztotta el a vizet a modell teljes területén.



7. ábra: Szakirodalomban alkalmazott modell vázlatrajza (Guérin A. et al 2014)

Ahogy az 7. ábrán látható a modell alsó határa, illetve három függőleges fala vízzáró kivitellet készült, míg egyik rövidebb oldali falát perforációval látták el, mely teljesen átteresztőnek volt tekinthető. Vizsgálataikat teljesen üres víztartóra hullott 3 perc időtartamú, 36,7 ml/s, 16,8 ml/s és 8,3 ml/s intenzitású modellcsapadékokkal végezték, majd mérték a perforált oldallemezen folyamatosan távozó, időben változó hozamot. Az eredményeket ábrázolva egy árhullámhoz hasonló görbét kaptak, melyeknek a kezdeti meredeken emelkedő „áradó szakaszát” és kisebb meredekséggel rendelkező „apadó szakaszát” is megvizsgálták.



8. ábra: Laborkísérlet eredményei: intenzitás és vízhozam idősor görbe (Guérin A. et al 2014)

Eredményeik feldolgozásakor azt tapasztalták, hogy a csapadék kezdete után a vízhozam növekedés körülbelül 40 másodperc elteltével volt tapasztalható. A kezdeti növekvő szakasz közel lineáris volt, majd a „tetőzést” követő ellapuló jellegű görbe megközelítőleg visszatért a kezdeti 0 ml/s hozamra (8. ábra). A csapadék hozamnövelő hatását a Dupuit-Boussinesq összefüggés egydimenziós formája alapján közelítették (7. képlet).

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} \frac{k}{2} + \varepsilon = n \frac{\partial h}{\partial t} \quad [7]$$

6. ELMÉLETI ÖSSZEFÜGGÉSEK BEMUTATÁSA

6.1. FELSZÍN ALATTI VÍZMOZGÁS ÁRAMLÁSI VISZONYAINAK JELLEMZÉSE

A porózus közegben történő vízáramlás kvantitív tanulmányozása Henry Darcy francia hadmérnök kísérleteivel kezdődött. Ezen kísérletek eredményét 1856-ban publikálta, melyet ma már Darcy-törvényként ismerünk.

Vizsgálataiban az úgynevezett szivárgási vagy látszólagos szivárgási sebességet számította, mely a folytonossági egyenletből a vízhozam és a teljes, szemcséket tartalmazó keresztmetszeti felület hányadosából adódik. (A szivárgási sebesség az a sebesség, amely ugyanazt a vízhozamot szállítaná valamely teljesen szabad felületen keresztül, mint a tényleges v_x sebesség a talajszemcsékkel csökkentett felületeken át.) A tényleges középsebesség, ami a szemcsék

között létrejön nagyobb, mint a szivárgási sebesség. A kettő közötti kapcsolatot a hézagterfogat (n) adja meg, ami a talajban lévő hézagok terfogatának és a teljes terfogatnak hányadosa.

$$v_{sz} = n * v_{eff} \quad [8]$$

Darcy megállapítása szerint a szivárgás sebessége egyenesen arányos a hidraulikus gradienssel.

$$v = -k * \frac{dh}{dr} = -k * I \quad [9]$$

Ahol:

- v a szivárgás sebessége [m/s],
- k szivárgási tényező, arányossági tényező [m/s],
- $\frac{dh}{dr}$ mozgást létrehozó vízszintkülönbségek és szivárgási úthosszak hányadosa [-],
- I hidraulikus gradiens [-] (Kovács 1972).

A talajvíz áramlását elősegítő és fékező erők befolyásolják. Leggyakoribb gyorsító hatás a gravitáció, ezzel szemben fékező hatást fejt ki a súrlódási és a nehézségi erő (Kovács 1972, Juhász 2002). A szivárgó vízmozgás csoportosítását elsősorban a mozgást létrehozó erők alapján végezzük. A szivárgási tartományokat a domináns és elhanyagolható fékező erők szerint rendszerezük. Turbulens áramlásról beszélünk, ha a fékező erők közül csak a tehetetlenséget vesszük számításba. Ha emellett a súrlódással is számolunk, akkor az átmeneti szivárgás tartományában járunk. Lamináris szivárgás esetén csak a súrlódást tekintjük fékezőerőnek, míg mikroszivárgás esetén emellett szerepet kapnak a molekuláris erőhatások is (Kovács 1972).

A különböző szivárgási tartományokat dimenzió nélküli számokkal jellemezzük. A turbulens áramlás esetén fellépő fékező és elősegítő erők hányadosa, azaz a nehézség/gravitáció a Froude-féle számot adja meg. Az átmeneti tartomány határait a tehetetlenség és súrlódás hányadosával állapíthatjuk meg, melyet a Reynolds-szám fejez ki (Juhász 2002).

Az 1. táblázatban összefoglaltam néhány, a szakirodalomban fellelhető ajánlást a szivárgásra vonatkozóan lamináris, átmeneti és turbulens áramlási viszonyok határértékeire. Látható, hogy a különböző szerzők által javasolt határok tág határok között mozoghatnak. Ez főként az átmeneti és turbulens áramlási viszonyok közötti értékekre igaz.

6.2. SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ MEGHATÁROZÁSA PRÓBASZIVATTYÚZÁSSAL – DUPUIT-MÓDSZER

Mérnöki gyakorlatban elterjedt módszer Dupuit permanens szivárgásra szolgáló képlete (Dupuit 1863, Kovács 1972):

$$k = \frac{Q}{\pi} * \frac{\ln \frac{R}{r}}{H_1^2 - H_2^2} \quad [10]$$

- k: szivárgási tényező [m/s]
- Q: szivattyúzott vízhozam [m³/s],
- R: leszívás hatástávolsága [m],
- r: kút sugara [m],
- H: piezometrikus nyomásszint, vízoszlopmagasság [m].

Hasonlóképp számítható a szivárgási tényező, amennyiben két szomszédos megfigyelőkút leszívás adatait ismerjük (Kovács 1972):

$$k = \frac{Q}{\pi} * \frac{\ln \frac{x_1}{x_2}}{y_1^2 - y_2^2} \quad [11]$$

- x₁: távolabbi figyelőkút távolsága a szívott kúttól [m],
- x₂: közelebbi figyelőkút távolsága a szívott kúttól [m],
- y₁: távolabbi figyelőkútban a leszívást követő vízoszlopmagasság [m],
- y₂: közelebbi figyelőkútban a leszívást követő vízoszlopmagasság [m].

A Dupuit-féle egyenlet a következő geometria-, áramlási- és határfeltételek figyelembevételével alkalmazható:

- az áramlási tér homogén és izotróp,
- a vízvezető réteg alulról vízszintes síkkal határolt, felül fedetlen vagy vízszintes vízzáró réteg zárja le, azonban beszivárgás vagy párolgás a fedetlen felszínen át sem következik be,
- a kút távolhatása ismert R sugarú körrel jellemezhető, így a kút táplálása minden oldalról egyenletes és sugárirányú,
- a szivárgó vízmozgás az áramlási tér minden pontjában a Darcy-törvény érvényességi határán belül marad, szivattyúzás megkezdéséig a víztartóban lévő víz nyugalomban van,
- a vízmozgás permanens,

- Dupuit feltétel: a kúttengellyel koncentrikus minden hengerfelület potenciálfelület. A sebesség egy-egy ilyen henger mentén állandó és arányos a hengerfelület függőlegesében kialakuló felszíni eséssel. Ezek alapján Dupuit feltételezi, hogy az áramvonalak jó közelítésként vízszintesnek tekinthetők, a sebességvektorok függőleges összetevője elhanyagolható (Kovács 1972, Víg 2016).

Dupuit minden pontban vízszintes szivárgást feltételezett és nem vette figyelembe a kútpaláston kialakuló szakadást. Méréskor a kút belsejében létrejövő vízszinteket mérjük, ám ez általában nem egyezik meg a kútpalást külső felén létrejövő vízszinttel, hiszen erre csak hosszantartó szivattyúzás és nagy áteresztőképesség esetén van lehetőség. Ubell (1958) megállapításai szerint Dupuit képlete nem alkalmazható a leszívási görbe egészére. A valós és a Dupuit-féle leszívási görbe alakja közötti eltérés a szivattyúzott vízhozam növelésével nő, főleg a termelőkút közelében. A közbenső görbeszakasz is csak alakra egyezik meg a valóssal. Hibát jelent még a távolhatás mértékének bizonytalansága, melyet több megfigyelőkúttal csökkenthetünk (Jobbágy 2009). A leszívás hatástávolságának számítására általában Sichardt-féle empirikusösszefüggést használjuk:

$$R = 3000 * s * \sqrt{k} \quad [12]$$

s: leszívás a kútban [m].

6.3. DARCY-TÖRVÉNY SEKÉLYVIZI KÖZELÍTÉSSEL – DUPUIT-BOUSSINESQ ELMÉLET

Vizsgáljuk egy alul közel vízszintes vízzáró réteggel határolt, szabadfelszínű szivárgási tér egy elemi oldalhosszúságú hasábjában a vízmozgás kontinuitását. Jelölje egy kijelölt x, y, z koordináta-rendszerben $\zeta = \zeta(x,y)$ függvény az alsó vízzáró réteg határolófelületét, míg a $Z = Z(x,y)$ összefüggés a szabadfelszínű vízfelszínt. Ekkor a víznyomás a víztartó bármelyik pontjában számíthatóvá válik, a 13. képlet segítségével.

$$h = Z - \zeta \quad [13]$$

A vízmagasság megváltozása két pont között a következő (14.) egyenlettel számítható.

$$dh_L = dZ - d\zeta = \frac{\partial Z}{\partial x} dx + \frac{\partial Z}{\partial y} dy - \frac{\partial \zeta}{\partial x} dx - \frac{\partial \zeta}{\partial y} dy \quad [14]$$

ahol

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = -I_x ; \frac{\partial Z}{\partial y} = -I_y ; \frac{\partial \zeta}{\partial x} = -i_x ; \frac{\partial \zeta}{\partial y} = -i_y \quad [15]$$

azaz a felületek adott irányú esését adják meg a két felület x és y irányú differenciáljai (Kovács 1972).

Miután a vízmozgás nempermanens így a vízmélység hely és idő szerint is változik. Ez a változás a szabadfelszín változásával egyenlő, hisz a vízzáró réteg helyzete az időben állandó (Kovács 1972).

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial z}{\partial t} \quad [16]$$

Figyelembe véve a talajhasáb porozitását (n), valamint elhanyagolva a víz összenyomhatóságát, két időpont között eltelt Δt időtartam alatt a vizsgált rétegbe beáramló, illetve onnan távozó vízmennyiség különbségét kapjuk meg:

$$\frac{\partial h v_x}{\partial x} + \frac{\partial h v_y}{\partial y} \Delta x \Delta y \Delta t + n \frac{\partial h}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta t = \varepsilon \Delta x \Delta y \Delta t \quad [17]$$

ahol ε a felületi hatás [m/s], mely pozitív előjel esetén tápláló, negatív esetén megcsapoló jellegű (Kovács 1972).

A Darcy-törvényt érvényesnek tekintve, valamint a Dupuit-közelítéssel élve feltételezzük, hogy az áramlás közel horizontális, így a potenciálfelületek függőlegesek:

$$v_x = k I_x = -k \frac{\partial z}{\partial x}; \quad v_y = k I_y = -k \frac{\partial z}{\partial y} \quad [18]$$

Az 17. egyenletbe behelyettesítve a 18. egyenletben felsorolt tagokat a Boussinesq-féle összefüggés általános alakját kapjuk, síkáramlás esetére:

$$\frac{\partial h}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\partial z}{\partial y} = \frac{n}{k} \frac{\partial h}{\partial t} - \frac{\varepsilon}{k} \quad [19]$$

Amennyiben, ha a vízszintes viszonyításik megegyezik a vízzáró fekü réteggel, akkor a hasonlító síktól mért magasság megegyezik a vízréteg vastagságával ($Z=h$) a 20. egyenletet kapjuk:

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h^2}{\partial y^2} = 2 \frac{n}{k} \frac{\partial h}{\partial t} - 2 \frac{\varepsilon}{k} \quad [20]$$

Guérin A. et al. (2014) az egyenlet egydimenziós alakját az alábbi formában írták fel:

$$\frac{\partial^2 h^2}{\partial x^2} \frac{k}{2} + \varepsilon = n \frac{\partial h}{\partial t} \quad [21]$$

A Dupuit-Boussinesq egyenlet tehát leírja számunkra egy vizsgált talajhasábra vonatkozóan, hogy az idő függvényében, adott talajparaméterek (k , n) és felszíni hatás (ε) mellett hogyan változott a vizsgált térrész víztartalma a be- és kiáramló fajlagos hozamok különbsége alapján (Kovács 1972).

7. MÉRÉSI MÓDSZERTAN BEMUTATÁSA

7.1. MÉRÉSEK FOLYAMATÁNAK ISMERTETÉSE

Méréseimet a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási laboratóriumában végeztem. Méréseim fő célja a csapadék hatásának kimutatása a víztartó réteg vízszintjére, illetve a termelőkút vízhozamára. A szakirodalmi kutatás alapján arra a következtetésre jutottam, hogy a legcélszerűbb a vizsgálatok alatti adatrögzítésre videókamerák használata. A félvétel rögzítését két mobiltelefonnal végeztem, melyek közül az egyik a piezotábla elé lett helyezve, így a modellter pontjainak vízszintjeit ezzel az eszközzel tudtam nyomon követni. A másik eszköz a modell melletti vízelvező csatornába került, hogy a kifolyó vízhozamot mérőedénybe engedve követni tudjam a vízhozam változását. A feldolgozást és az eredmények kiértékelését a videók alapján hajtottam végre. Nagy felbontású felvételeket készítettem, feldolgozásuk ezáltal időigényesebb volt és tárhelyigényük is jelentős mértékű.

Minden mérésemre egyaránt jellemző volt az azonos intenzitású csapadékesemény, a különbséget közöttük a csapadék időtartama jelentette. Továbbá minden esetben a csapadékeseményt reprezentáló szórófejen keresztüli vízkibocsátást akkor engedték csak a talajmintára, ha a modellterben a leszívási vízfelszín elérte a permanens állapotot, tehát a mérőhengerbe engedett vízmennyiség egy adott időegység alatt konstans volt. Ebből következik, hogy a videó olyan időszakot is rögzített, amikor még a hozam nem állandósult, illetve amikor még a csapadékesemény nem kezdődött el. Ezt figyelembe véve végeztem el a kiértékeléseket és a számításaimat. Méréseim időtartama a csapadékesemény hosszától függő tényező volt.

Kezdetben méréseimet mindkét szórófej üzemelése mellett végeztem, 9 cm-es leszívással. A leszívási érték kiválasztásánál szerepet játszottak a már korábban elvégzett nempermanens méréseim tapasztalatai, illetve korábbi eredményeim, amik azt mutatták, hogy nagy leszívások esetén a modellben megszűnhet a lineáris áramlás, mely befolyásolhatná a kiértékelés eredményeit. Emiatt a nempermanens mérésnél alkalmazott leszívási értéket használtam fel a

csapadékeseményes vizsgálataimnál is, biztosítva ezzel, hogy a modelltérben az áramlás lineáris határokon belül marad.

Minden mérés esetén a videófelvételt addig nem állítottam le, amíg vissza nem kaptam a mérés előtt mért permanens állapot vízhozamát, így mérésenként körülbelül 30-40 percnyi videóanyagot kaptam.

7.2. VÍZHOZAMOK MÉRÉSI ÉS KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZERE

A kisminta modellen végzett korábbi méréseknél nem okozott problémát a vízhozam regisztrálása a hagyományos köbözéses módszerrel, mivel állandó hozamú vizsgálatokat hajtottam végre. A csapadékok hatásának időben lefolyó változását a termelőkút vízhozammérésén keresztül lehet kimutatni, ehhez pedig egy olyan módszerre volt szükség, ami az adatokat minél nagyobb felbontásban (lehetőleg másodperc léptékben) biztosítja számomra. A módszer limitáló tényezője között szerepelt, hogy az ahhoz szükséges eszköz beszerzési költsége ne legyen magas.

A méréshez hagyományos vízmennyiségmérőt szerettem volna használni, viszont a termékleírásban szereplő információk alapján a minimális áramlási hozam 25 l/h, mely körülbelül 0,42 l/min (6. kép). Tapasztalataim alapján ezt a hozamértéket túl magasnak ítéltam ahhoz, hogy a kismintából érkező – ennél kisebb – értékeket pontosan mérje a műszer, ennél fogva használatát elvettem.

A Gardena kertészeti cég termékei között szereplő digitális vízmennyiségmérő felkeltette az érdeklődésemet, mivel leírása pillanatnyi vízfogyasztás kijelzését ígerte, de a műszaki specifikációi között nem szerepelt minimális áramlási sebesség. Az eszköz (7. kép) beszerzését követően köbözéses mérésekkel teszteltem megbízhatóságát. Az eredmények alapján arra jutottam, hogy hozamadatoktól függetlenül a kijelzett és ténylegesen kiengedett vízmennyiség között 5-20 % eltérést tapasztaltam. Ennél fogva sajnos a műszert nem találtam alkalmasnak a vizsgálataim alatti használatra.



6. Kép: Hagyományos vízmennyiségmérő



7. Kép: Gardena digitális vízmennyiségmérő

Mivel nem találtam a vizsgálatomhoz igazítható vízmennyiségmérőket, ezért úgy döntöttem, hogy a vízhozamokat rögzítését egy mérőedénnyel fogom elvégezni, melyben a vízmennyiség növekedése jól követhető egy előre elkészített skálának köszönhetően. A mérőedény kiválasztásánál fontos paraméter volt, hogy lehetőleg minél szabályosabb alakú legyen, tehát falai lehetőleg az alapjára 90 fokot zárjanak be. Minél kisebb alapterülettel rendelkezik, annál látványosabb az idő múlásával bekövetkező vízmennyiség-növekedés, viszont fontos volt, hogy minél nagyobb űrtartalommal rendelkezzen. A függőleges méretének továbbá határt szabott a kisminta modell alsó peremének szintje, mivel a pontos hozamméréshez szükség volt arra, hogy a mérőedény minden esetben a bukó alatt helyezkedjen el. Ennél fogva úgy döntöttem, hogy a laborban is megtalálható 2 literes mérőhengereket fogom alkalmazni a vízhozamok mérésére. A folyamatos adatrögzítéshez két darab hengert használtam annak érdekében, hogy ha az egyik megtelik, addig a másikba tudjam szünetmentesen átvezetni a kifolyó vizet. A leolvasások megfelelő pontossága érdekében a két mérőhengerről a mérések alatt videófelvételt készítettem, amiről később az egyes szintek elérése között eltelt időből tudtam következtetni a termelőkút hozamára. A hengereket és a kameraként szolgáló mobiltelefont a labor körcsatornájában helyeztem el annak érdekében, hogy a mérőhengerek felső szintje az alsó peremként szolgáló bukó alatt legyenek.

A kiértékelés kétféleképpen történt. Első esetben kiválasztottam térfogategységet, 100 ml-t, és vizsgáltam, hogy a csapadékesemény adott szakaszában mennyi idő alatt lehet kitermelni 100 ml vizet. Második esetben egy időlépést határoztam meg, 10 másodperc, és vizsgáltam, hogy 10 másodpercenként mekkora vízmennyiség termelhető ki. A kritikus szakasznál, tehát a csapadék kezdetétől a csapadék elállta után néhány percig a kiértékelést 2 másodpercenként végeztem az árhullám minél pontosabb leírása érdekében.

A két elv végeredményül ugyanazokat az eredményeket szolgáltatja, azonban a leolvasási pontosság javult, ha a kiértékelést kétszer, több módon is megtettem.

A meghatározott mennyiségű kiadott vízmennyiségét befolyásolhatja a talajminta párolgása. A talajpárolgás révén történő vízveszteségét egy „liziméterrel” állapítottam meg. Az elv az volt, hogy egy vödörbe meghatározott tömegű talajmintát helyeztem, majd vízzel telítettem. A telített talajminta tömegét mérleg segítségével regisztráltam.

A mérést három alkalommal tettem meg, rögtön a talaj telítése után, aztán 19 és 102 órával később. A 3. táblázatban bemutatom a kapott eredményeimet.

3. táblázat: Párolgásmérés adatai

| Mérésszám | Vödör felülete [cm ²] | Mérések között eltelt idő [h] | Liziméter tömege [g] | Súlykülönbség [g] | Modell felülete [cm ²] | Modell párolgása [g] | Modell párolgása 1 óra alatt [g] |
|-----------|-----------------------------------|-------------------------------|----------------------|-------------------|------------------------------------|----------------------|----------------------------------|
| 1 | 593.96 | - | 5648 | - | 12868 | - | - |
| 2 | | 19 | 5617.6 | 30.4 | | 658.6 | 34.7 |
| 3 | | 102 | 5444 | 173.6 | | 3761.0 | 36.9 |

A táblázatban feltüntettem a mérések között eltelt időt és az akkor regisztrált tömeg értékeket. Kiszámoltam a tömegek közötti különbségeket, majd a „liziméter” és a kisminta modell területének hányadosával arányosítottam, így közelítettem a fizikai modellből elpárolgott víz mennyiségét. Végül meghatároztam az egy óra alatt elpárolgó vízmennyiséget. A méréseimet a laborban lévő egységes, 21°C hőmérsékleten végeztem.

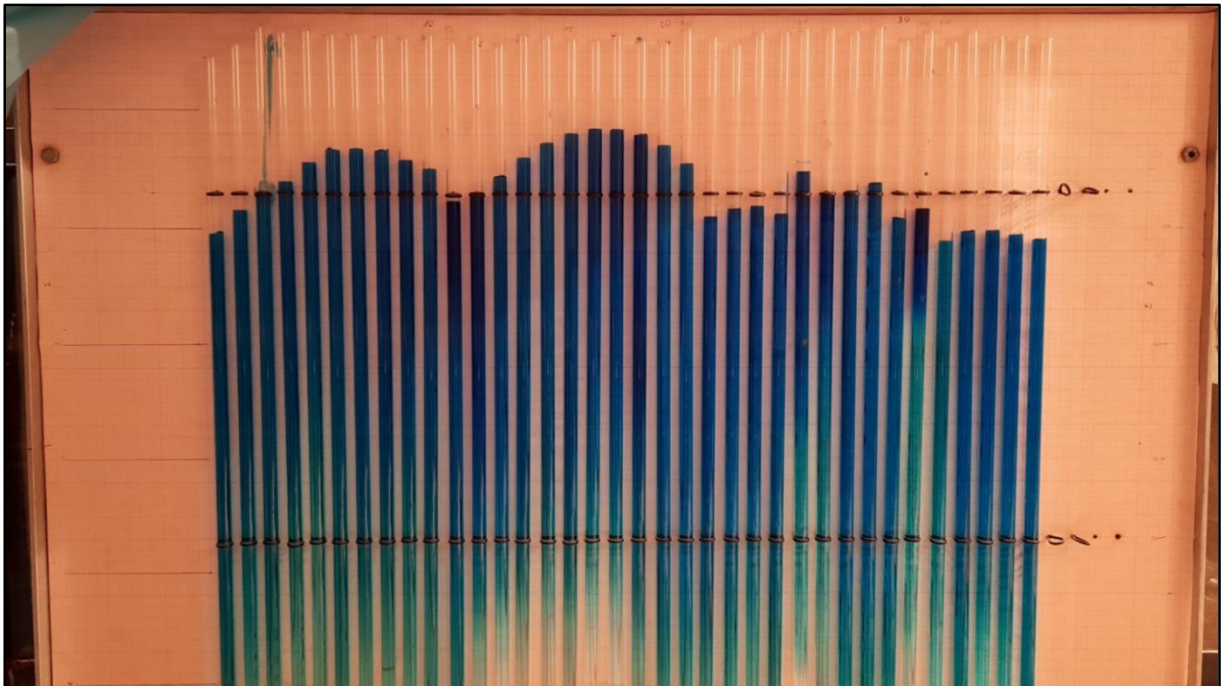
Összességében elmondható, hogy a modellből 1 óra alatt 34-37 g víz párolog el. A mérések időtartama egyik esetben sem érték el az egy órát, így egy-egy vizsgálat során ennél kisebb volt a párolgási veszteség. Például a három perc időtartamú mérések során a teljes kiadott vízmennyiség 10,67 liter volt, melynek a párolgási vesztesége 30 perces mérési időtartamot tekintve körülbelül 0,014 l, azaz 14 g volt. Ez a teljes mennyiség 38 százaléka, így a párolgási veszteséget elhanyagolhatónak tekintettem.

7.3. VÍZSZINTEK MÉRÉSI ÉS KIÉRTÉKELÉSI MÓDSZERE

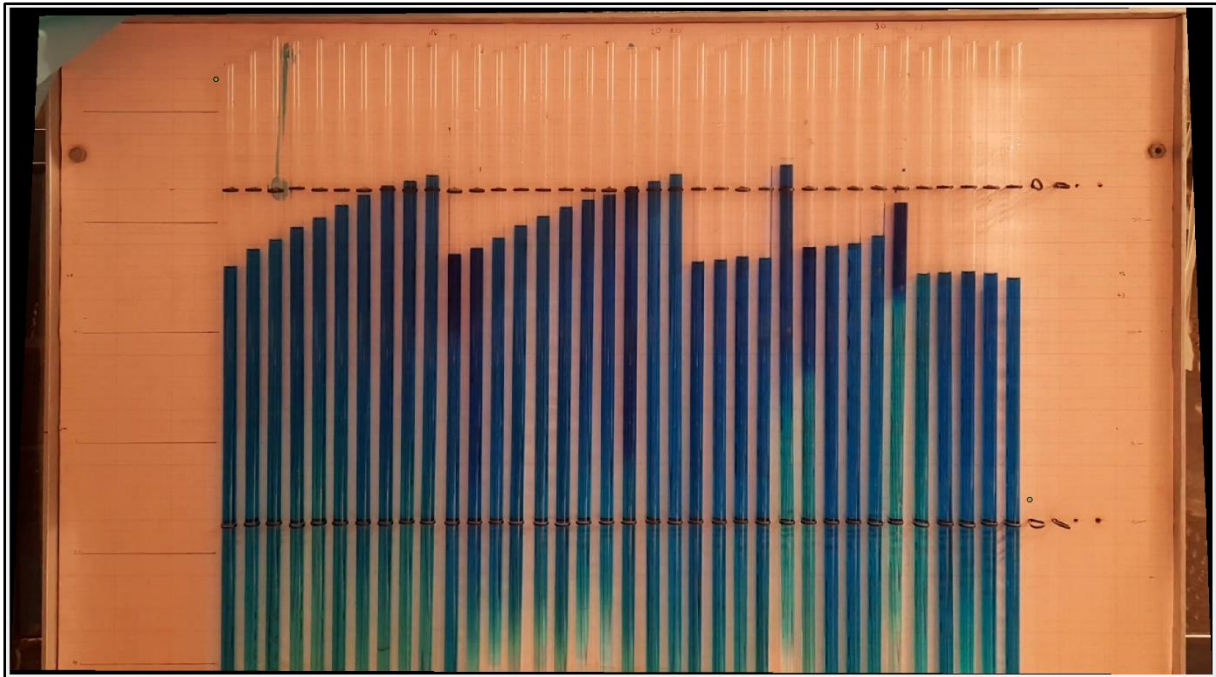
Ahogy említettem, a vízhozamok rögzítése mellett a vízszintek mérését is videófelvételek segítségével végeztem el. Méréseim megkezdése előtt korábbi vizsgálataim tapasztalata alapján a piezotábla csöveinek vizét fecskendő segítségével kék ételfestékkel színeztem meg. Ez arra szolgál, hogy a felvételen az áttetsző víz a lehető legjobban elkülönüljön a csövek mögötti

piezotábla színétől, ezzel megkönnyítve a mérések feldolgozását. A korábbi fejezetben bemutatott vízhozam kiértékelési módszer ebben az esetben működőképtelen lett volna, hiszen a szinte pontszerű csövekben a „kézi” vízszintleolvasás rengeteg időt vett volna igénybe, emellett nagyobb mértékű leolvasási hibával lettek volna terhelve.

A videófelvétel kiértékelését Havasi-Tóth Balázs segítségével végeztem MatLab programmal. Először a videóból képsorozatot kellett előállítani, a videóból másodpercenként lettek kimentve képek. Majd a képek torzítottságának javítását kellett elvégezni, hisz a 8. képen látható, főként a piezotábla két szélén levő alumíniumlemeznél, hogy a lerögzített kamera torzítva adja vissza a piezotábla képet. Ennek oka lehet, hogy a telefon túl közel helyezkedett el a piezotáblához, melyet a labor korlátai miatt, nem tudtam hátrébb helyezni, de a deformáció megfelelő mértékben javítható (9. kép).



8. Kép: Videófelvételtől egy kinyert torzított kép



9. Kép: Videófelvételtől egy kinyert kép torzítatlan változata

A MatLab szoftverben megírt algoritmus úgy végezte a kiértékelést, hogy a megadott referenciasíktól – ami a piezotábla 24. cm-nél lett elhelyezve – a piezocsövekben lévő kékre festett vizet lentől felfelé ellátta pixelszámmal, pixelenként lépett egyesével felfelé. A pixelszámokat egyesével megvizsgálta, hogy az a beadott feltételnek megfelel-e. A vizsgálat feltétele az volt, hogy ha adott pixel színe megegyezik a kék színnel, akkor folytassa tovább az iterációt, ettől eltérő esetben hagyja abba a vizsgálatokat és eredményül adja azt a pixelszámot, ahol az utolsó kék színű pixel teljesül, tehát ahonnan már nincs vízfelület. Ezzel a megoldásmenettel minden képhez mindegyik piezokivezetésre kaptam egy pixelszámot.

A pixelszámokat egy egyszerű számítással át kellett váltanom cm mértékegységre. A videóból kimentett képek alapján 38 cm 698 pixelnek felelt meg, tehát 1 cm körülbelül 18,37 pixel volt, ebből arányszámítással meg tudtam határozni a centiméterben mérhető értékeket. Ezekhez a kezdeti referenciapont magasságát, 24 cm-t hozzáadva megkaptam a különböző piezométerekhez és megfigyelőkutakhoz tartozó valós víznyomás értékeket.

8. EREDMÉNYEK BEMUTATÁSA

8.1. KEZDETI MÉRÉSEK TAPASZTALATAI

Kezdetben 3 perces csapadékeseményt vizsgáltam. Telefonnal rögzítettem a vízszintek és vízhozamok változását. Ebben az esetben a felvétel 20 percig tartott, mivel ennyi idő volt szükséges ahhoz, hogy a kezdeti 0,36 l/min-es vízhozam értéket a csapadék után visszakapjam.

Az 9. ábrán feltüntettem a 3 perces csapadék intenzitását az idő függvényében, melyet a 22. képlettel számoltam ki.

$$i = \frac{h}{t} \quad [22]$$

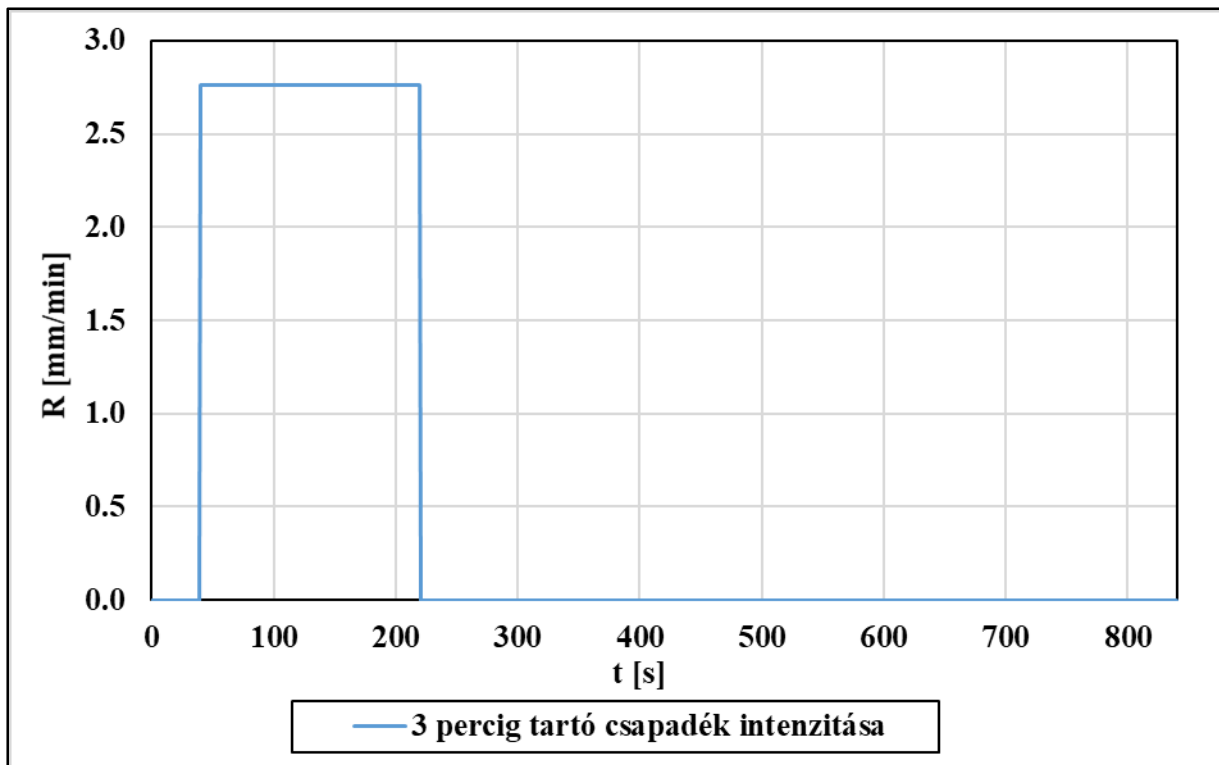
ahol:

- i – intenzitás [mm/min]
- h – csapadékmagasság [mm]
- t – csapadék időtartama [min]

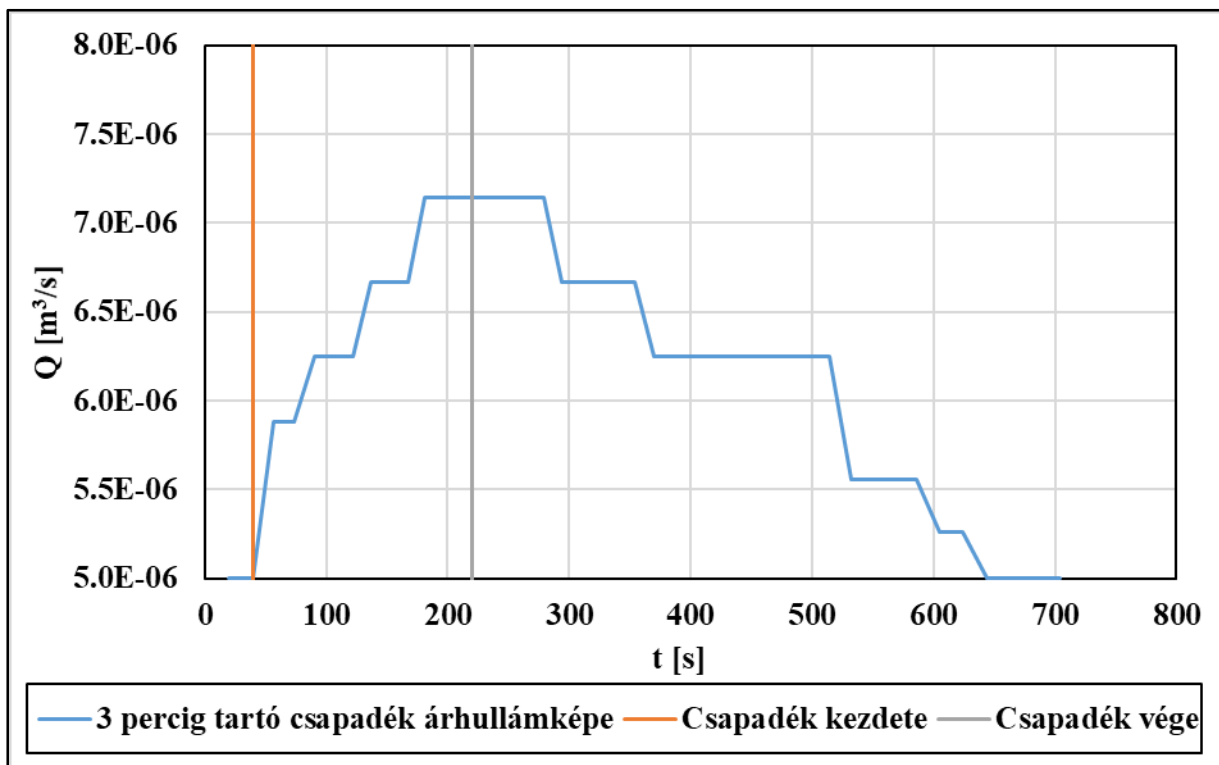
A csapadékmagasságot a kiadott vízmennyiség (V [mm³]) és a modelltér felületének (A [mm²]) hányadosaként kaptam meg.

$$h = \frac{V}{A} \quad [23]$$

Az 10. ábrán feltüntettem a 3 percig tartó csapadékkal való mérés által kirajzolható árhullámot, ezt ábrázoltam kék összefüggő vonallal. Az vízszintes tengelyen az idő van feltüntetve, míg a függőleges tengelyen a vízhozamot ábrázoltam ml/s mértékegységben. Látható két függőleges egyenes is az ábrán, narancssárga és szürke színnel, az előbbi a csapadék kezdetét, utóbbi pedig a csapadék végét jelentik.



9. ábra: 3 percig tartó csapadék intenzitása az idő függvényében

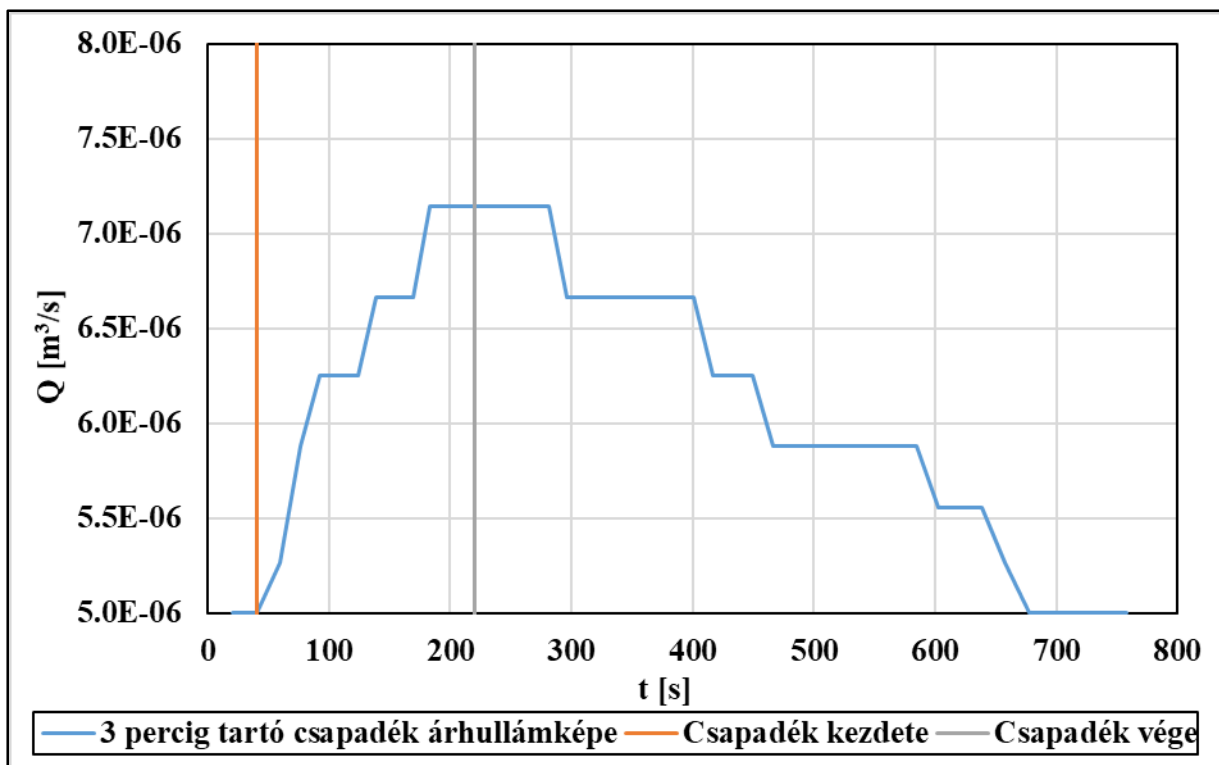


10. ábra: 3 perces csapadékesemény árhullámképe

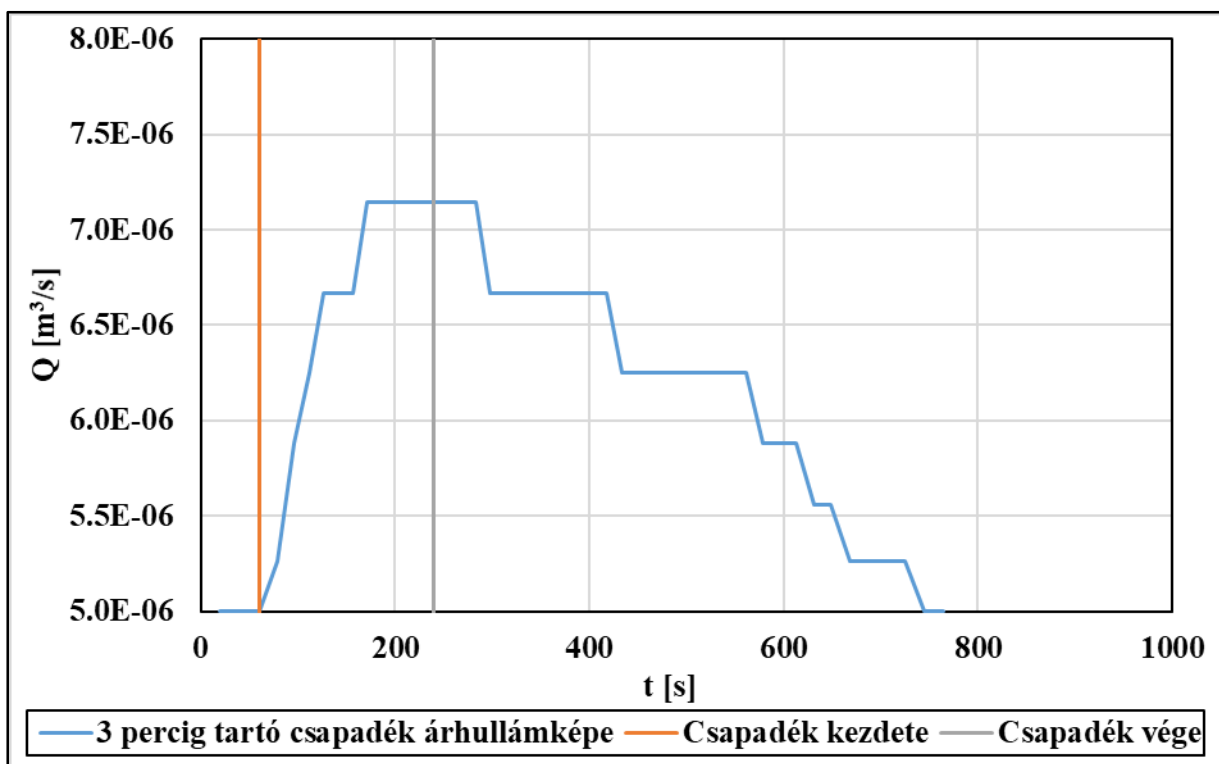
Méréseim kezdetekor arra számítottam, hogy a csapadék hatására megnő a kitermelhető vízhozam mennyisége, de ez a növekedés nem közvetlenül a csapadék kezdetén indul majd

meg, hanem egy kis idővel később a beszivárgás folyamatát követően. Számításaim a 3 perces csapadékesemény során beigazolódtak, kezdetben meredeken nőtt, majd kissé lassabb mértékben csökkent a mért vízhozam. Azonban a vízhozam növekedése már az esőztetés elindításakor megkezdődött, mely 183 másodpercig folyamatosan, szinte lineárisan nőtt. Ezt követi egy konstans szakasz 281 másodpercig, ettől kezdve pedig a vízhozam csökkent, míg el nem érte a kiindulási vízhozam értékét. Mivel a csapadék kezdetekor a vízhozam szinte azonnal nőni kezdett, így logikusan arra következtethetnénk, hogy az árhullám tetőző szakasza a csapadék elálltával volt mérhető. Ezzel szemben a függvény szürke vonallal jelzett pontjának környezete ugyanazokat az értékeket veszi fel. Ennek oka, hogy a modellcsapadék egy része előre nem tervezett módon a modell felső peremén át távozott a modelltérből, így az árhullám egy bizonyos szint felett csonkítottá vált. A csapadék hatására telítődött talajréteg nem volt képes az esőztető rendszer által kiadott további vízmennyiség befogadására, így egy bizonyos része nem a szivattyúzott kúton keresztül, hanem a felső peremen távozott a modellből. Ez komoly problémát okozott a teljes csapadékesemény vizsgálata szempontjából, valamint a későbbiekben a mérések időtartamának és kialakításának változtatására sarkalt.

A 3 perces csapadékeseményű méréseimkor vizsgáltam, hogy két mérés között eltelt időtartam hogyan befolyásolja a kapott adatok pontosságát. Elkészítettem egy mérést, majd a következőt körülbelül 24 órával később, a harmadikat pedig a második után körülbelül 30 perc elteltével. Erre azért volt szükség, mert a csapadékot követően az eredeti vízhozam és vízszint értékek hamar visszaálltak, viszont a talaj nedvességtartalma a telítetlen zónában nagy valószínűséggel eltérők voltak. A mérési eredmények azt mutatták, hogy az esetek között kimutatható eltérés, így a méréseket kezdeti értékek szempontjából nem csak a megfigyelőkutak szintjei és a vízhozam értékek, hanem a telítetlen zóna nedvességtartalma is befolyásolja. A két mérésből származó árhullámképeket mutatom be a 11. és 12. ábrákon.



11. ábra: 3 perces csapadékesemény árhullámképe 1 nap után



12. ábra: 3 perces csapadék árhullámképe pár perc különbséggel

A két ábrát összehasonlítva az 10. ábrával az mondható el, hogy az ábrák lefutása hasonló, viszont az utóbbi esetben a felfutó szakasz 30 másodperccel (21%-kal) rövidebb időtartam alatt

érte el a maximumot. A maximumot jelentő konstans szakasz időtartama az utóbbi mérés esetén 12%-kal hosszabb volt, míg a teljes árhullám 13% több idő alatt vonult le, mint az azt követő, 30 perccel azelőtti vizsgálatkor. Ebből következik, hogy az ellapuló, apadó szakasz a későbbi vizsgálat során hosszabb idő alatt ment végbe. Látható, hogy a kiértékelés egyik esetben sem tartott 1200 másodpercig, azaz 20 percig, hisz a kezdeti vízhozamot már jóval korábban visszakaptam. Ezen három mérés esetében a vízszintek nem kerültek kiértékelésre, hisz a vízhozam eredményekből következtetve a vízszintek sem mutattak volna helyes képet. A dolgozatban bemutatott mérések között legalább egy nap különbség volt, hogy az itt bemutatott befolyásoló tényezőket kiszűrjem.

8.2. A MODELL ÉS A MÉRÉSEK ELVÉNEK MÓDOSÍTÁSA

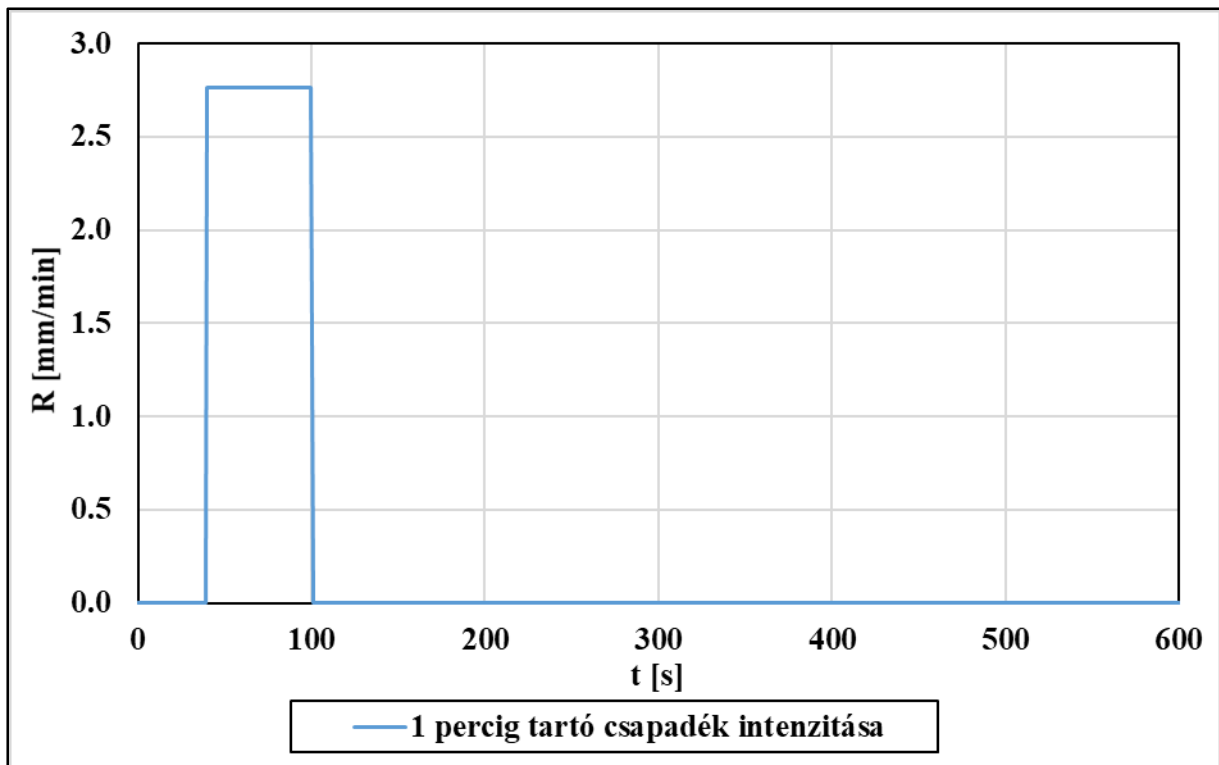
A korábbi fejezetben ismertettem, hogy a 3 perces mérés esetén a teljes árhullám kimérése sikertelen volt a felső peremen elfolyt vízmennyiség miatt. A sikertelenség miatt a modellen és a méréseimen is változtatásokat eszközöltem, így a geotextíliával burkolt fémrácsra, ami a talajjal töltött modellteret a víztértől választja el, vízálló fóliákat rögzítettem. A fóliaborítást körülbelül a talajréteg felső 10 cm-es mélységéig vezettem le, amely feltételezésem szerint megakadályozta a talajmintán megálló víz közvetlen kifolyását a felső peremen.

Egyúttal az is indokolt volt, hogy a 3 perces csapadékesemény időtartamát csökkentsem, így a következőkben egy és fél perces csapadékeseményű mérések kerülnek bemutatásra.

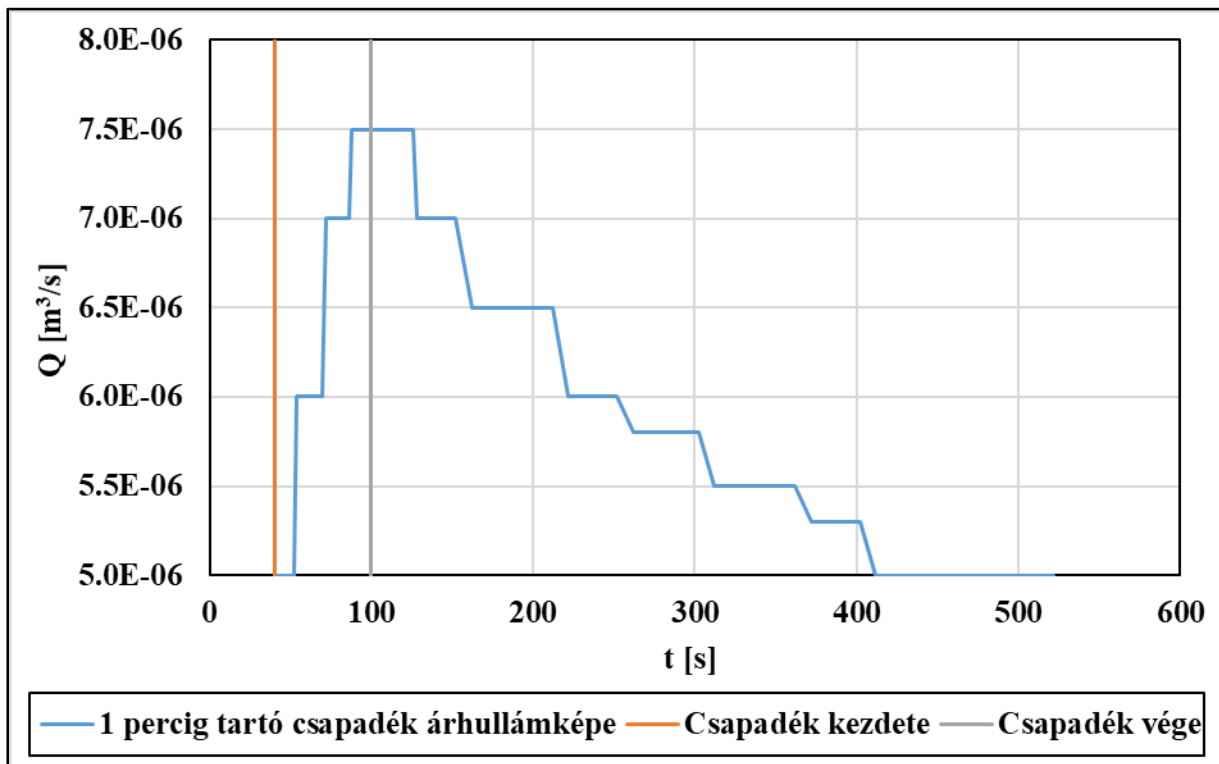
További módosítást a kifolyási peremen végeztem. A leszívást 10 cm-rel megnőveltem, hisz ilyenkor a talajréteg alacsonyabb magasságig van telítve, ez pedig elősegíti a nagyobb vízmennyiség befogadását, a beszivárgást. Úgy gondoltam, hogy ha kevesebb vagy esetleg semennyi víz nem áll meg a talajréteg felszínén akkor csökkenteni tudom a felső peremen való eltávozó víz mennyiségét.

8.3. MÓDOSÍTOTT MÉRÉSEK I.

Az említett sikertelenség miatt az intenzitás változtatása nélkül végeztem egy percen keresztül tartó csapadékeseményű mérést. Ebben az esetben a 7.2. fejezetben leírtak alapján kiértékeltem a videófelvételről a vízhozam értékeket (14. ábra), és kiértékelésre került a vízszintekről készített felvétel is.



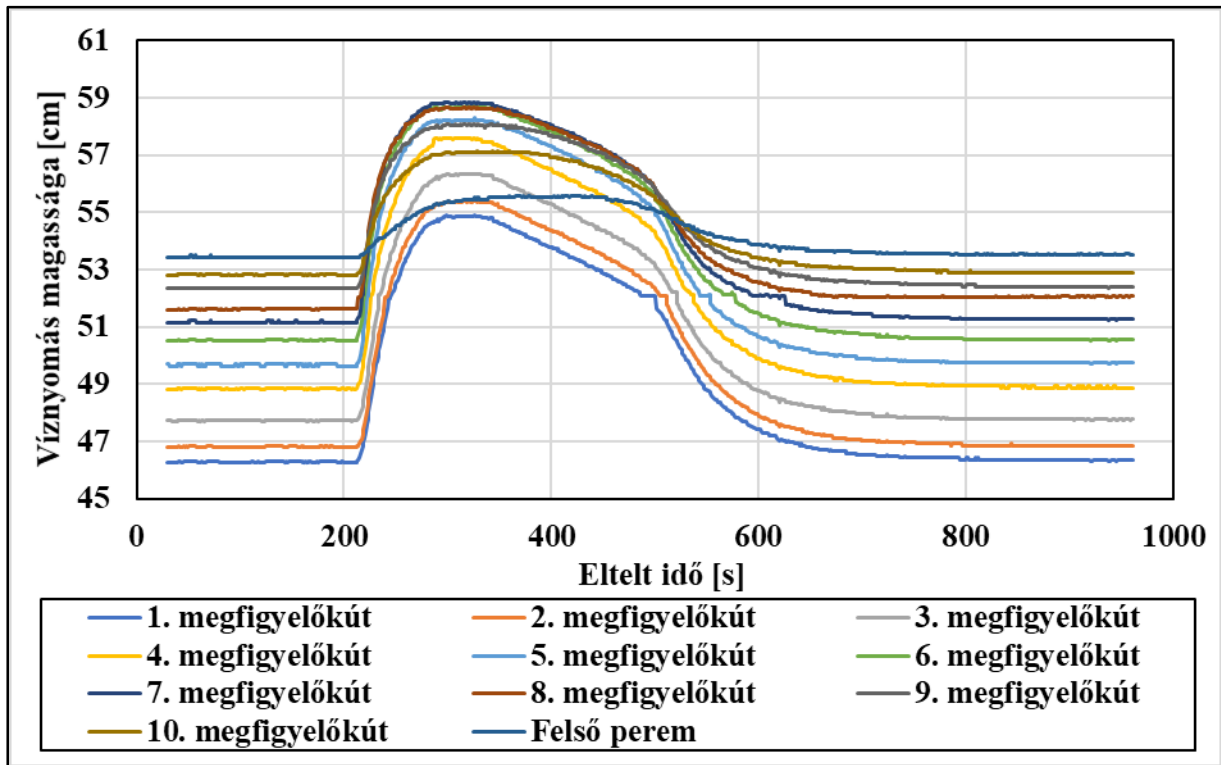
13. ábra: 1 percig tartó csapadék intenzitása az idő függvényében



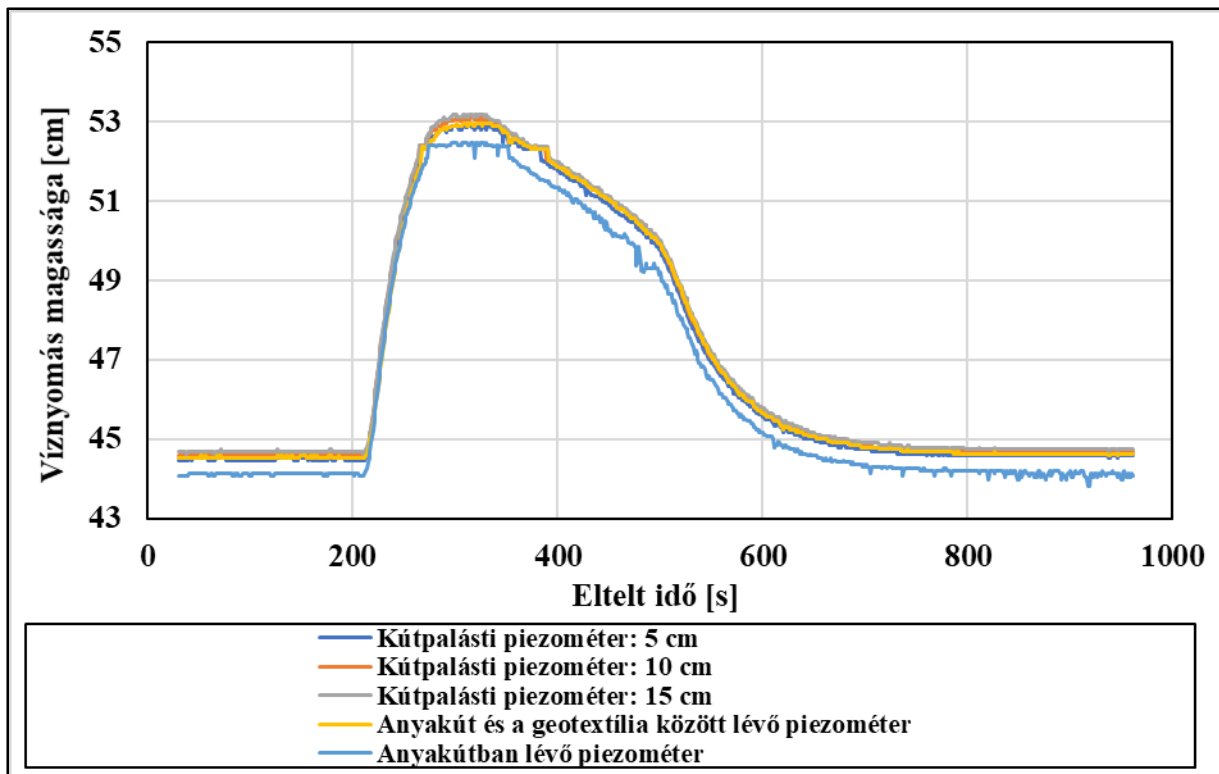
14. ábra: 1 perces csapadékesemény árhullámképe

A következő két ábrán (15. és 16. ábra) a kiértékelt vízszinteket ábrázoltam az idő függvényében. Kiértékelésem az összes piezométerre és megfigyelőkútra kiterjedt, azonban

vizsgálatom során a megfigyelőkutakban kialakuló és a kút körüli piezométerek által észlelt vízszinteket vettem alapul. A modell fenekén elhelyezett piezométereket azért hagyhattam figyelmen kívül mert korábbi TDK dolgozatomban már kimutattam, hogy a megfigyelőkutakban és a modellfenéken sugárirányban elhelyezett piezométerekben észlelt nyomásmagasságok megegyeznek (Hegedűs 2018).



15. ábra: 1 perces csapadék hatására kialakuló vízszintek a megfigyelőkutakban



16. ábra: Anyakút palástján elhelyezett piezométerekben kialakuló vízszint az 1 perces csapadékesemény hatására

A 15. ábrán láthatók a megfigyelőkutakban regisztrált vízszintek a csapadékesemény hatására. Függetlenül a nyomásmagasságot ábrázoltam cm mértékegységben, míg a vízszintes tengelyen az idő másodpercben. Különböző színnel ábrázoltam a megfigyelőkutakban kialakult vízszinteket a könnyebb átláthatóság érdekében.

Látható, hogy a megfigyelőkutak vízszintjei által kirajzolt görbék lefutása nagyon hasonló, kezdetben konstans szakasszal indulnak, majd jön egy hirtelen emelkedő, közel lineáris szakasz. Ezt követően a vízszintek növekedésének üteme lassul, majd egy görbült tetőző szakaszt követően ismételen egy közel lineáris, de csökkenő trend volt megfigyelhető. A csökkenő ág lineáris szakaszát egy kezdetben nagyobb meredekségű, majd lassabb ütemű apadó periódusa követi, mely végül belelapul a nyugalmi vízszintekbe. A csökkenő ágon megfigyelhető lineáris szakasz jelenléte valószínűleg a felszíni vízborítás időtartamát mutatja, majd a folyamatosan csökkenő szakasznál a teljes talajréteg telítettségének csökkenését, a háromfázisú zóna újbóli rétnyerését figyelhetjük meg. A kezdeti és a végső szakaszon, 0 és 210, illetve 580 és 900 másodpercek között, a görbék párhuzamosan futnak egymás mellett. Ez azonban a középső szakaszon, 210 és 580 másodperc között, nem teljesül, itt a legnagyobb értéket elérő görbe a sötétkék, ami a 7. megfigyelőkúthoz tartozik. A 8., 9. és 10. megfigyelőkút értékei ezen a szakaszon egyre inkább ellaposodnak, ez azt jelenti, hogy a felső perem hatása

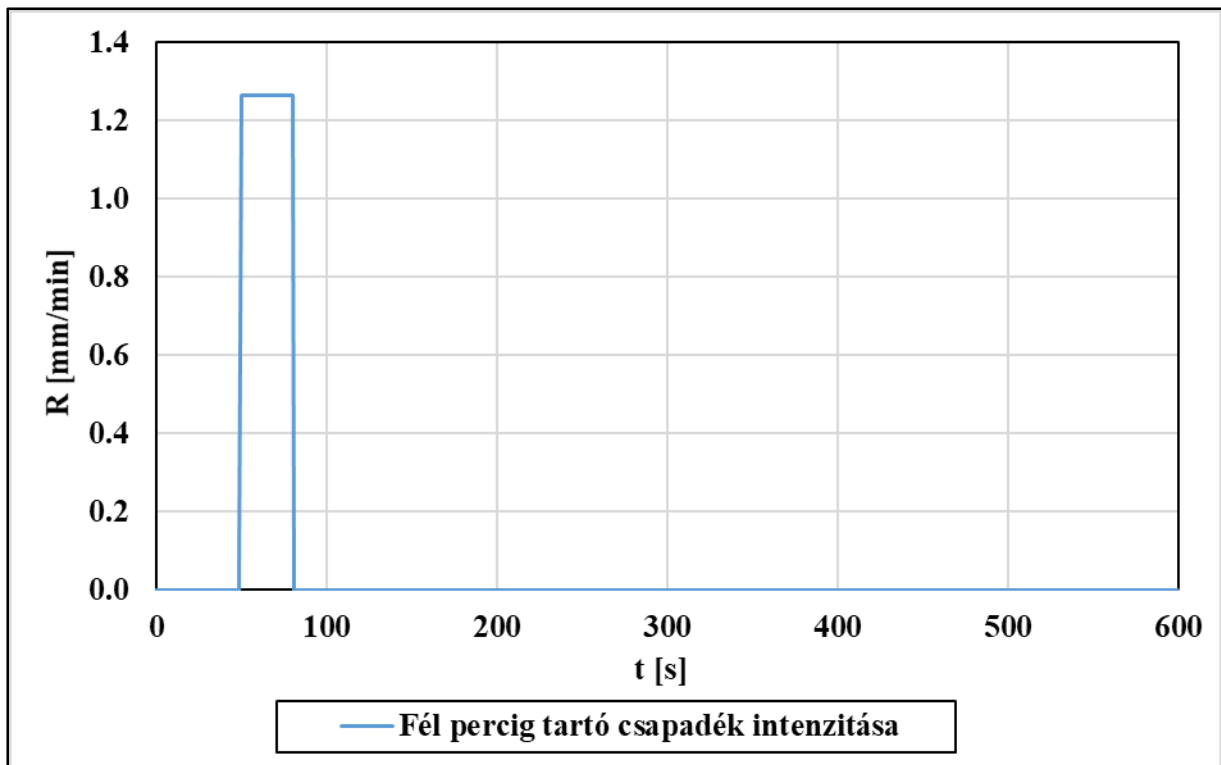
még a 8. megfigyelőkútnál is érezteti magát. A 11. megfigyelőkút igazából a felső peremben elhelyezett piezométer, így láthatjuk, hogy a teljes csapadékmennyiségből a víztérbe valóban nem elhanyagolható mennyiség hatol be és távozik a modellből.

A 16. ábrán az anyakút palástján elhelyezett piezométerek, valamint a termelőkút vízszint-idősorát ábrázoltam. A görbék lefutásának jellege hasonló alakot követnek, mint amit a megfigyelőkutak esetében ismertettem, a kút palástján kívüli nyomásszintek azonos ütemű változásokat mutattak, nem kaptam ellentmondásos eredményeket. Az anyakút szintjében megjelenik a vízhozamgörbén is megfigyelt konstans szakasz, mely egyenes következménye a hozam állandósulásának ezen az időtartamon belül. A csökkenő szakasz elején megjelenő függőleges ugrás a vízszintekben nagy valószínűséggel a kútba a felszínről közvetlenül bejutó vízmennyiségét jelenti.

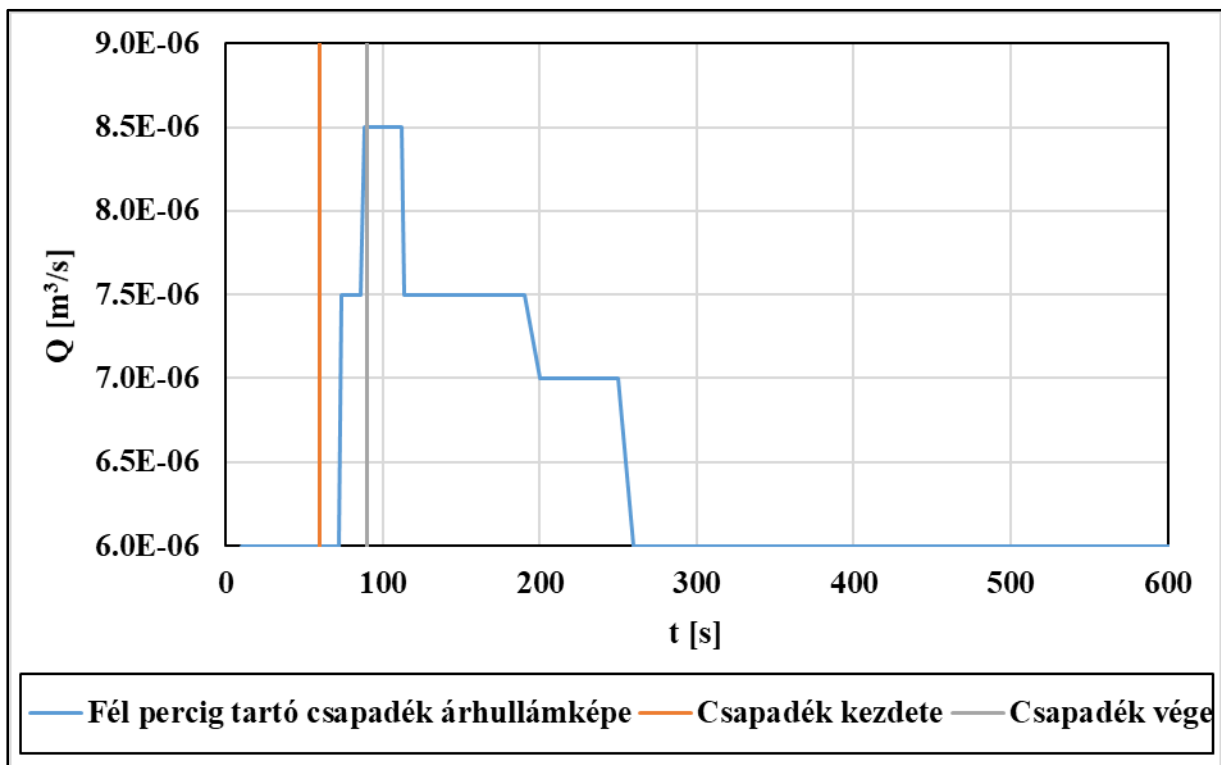
Annak ellenére, hogy csökkentettem a csapadékesemény időtartamát és a geotextíliával bevont fémrácsot befóliáztam nem oldottam meg maradéktalanul a felső perem okozta problémát. Így további módosításokat hajtottam végre, a két szórófej helyett csak egyet helyeztem üzembe, közvetlenül a termelőkút közelébe, hogy a szórófej által kibocsátott víz a 6. megfigyelőkútig érjen el. Emellett a csapadék időtartamát fél percre csökkentettem.

8.4. MÓDOSÍTOTT MÉRÉSEK II.

A korábbiakban leírtak alapján ebben az esetben is kiértékeltem a videófelvételek alapján a vízhozamok és vízszintek alakulását a csapadék hatására. Továbbá bemutatom a csapadék intenzitását az idő függvényében (17. ábra). Látható, hogy a szórófejek számának csökkentéséből kifolyólag az intenzitás értéke megváltozott.



17. ábra: Fél percig tartó csapadék intenzitása az idő függvényében

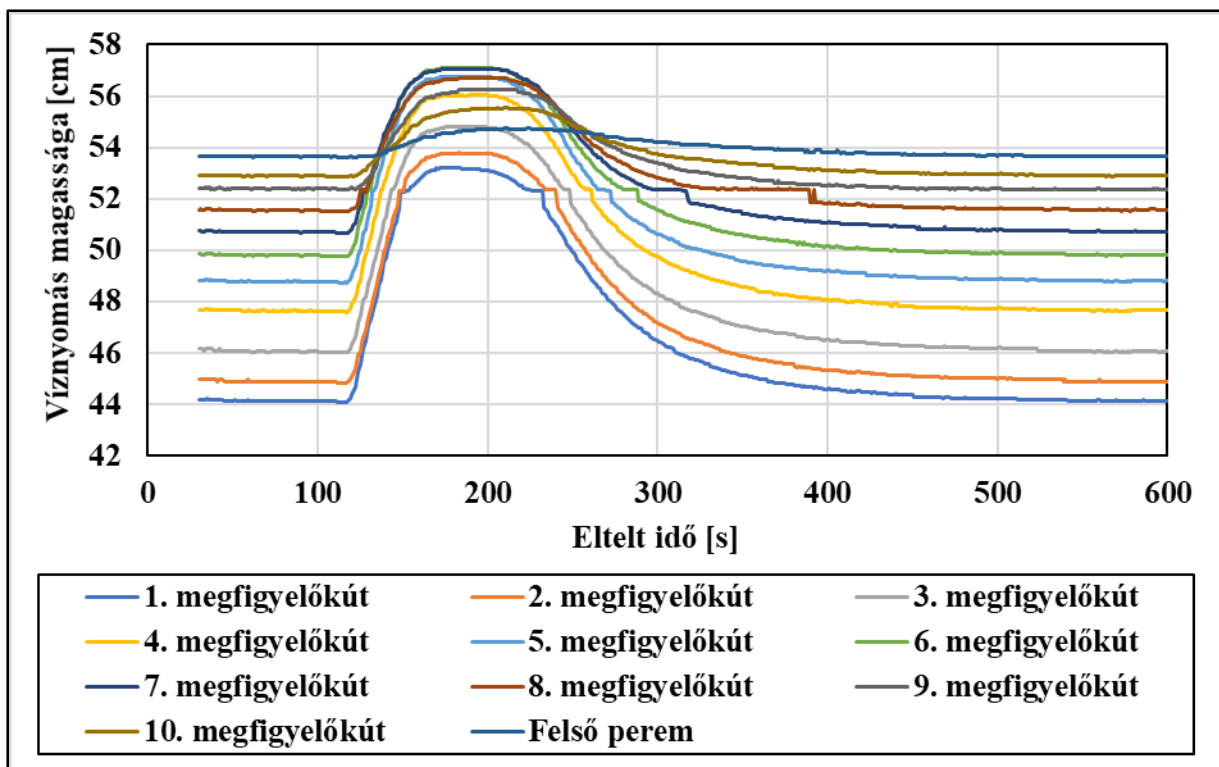


18. ábra: Fél perces csapadék árhullámképe

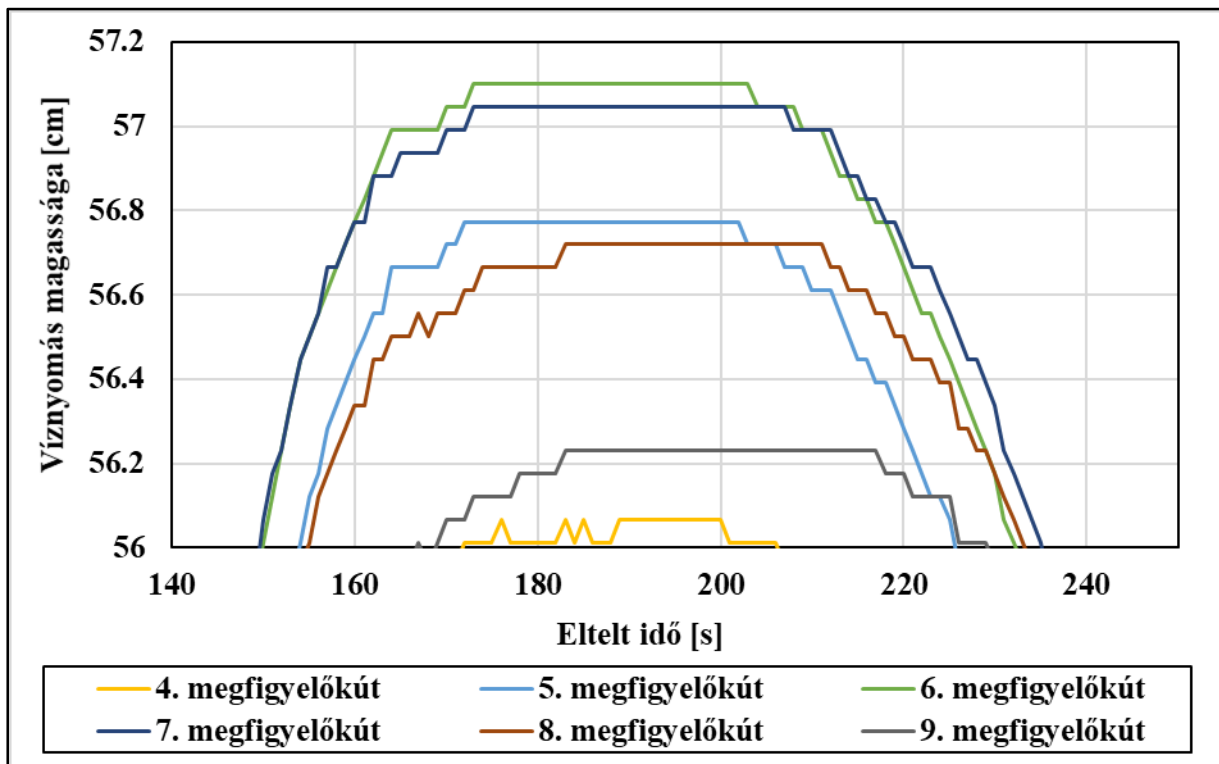
A két ábrán (17. és 18. ábra) látható, hogy fél perces csapadék hatására a kitermelhető vízhozam növekedése nem közvetlenül a csapadékesemény kezdetekor indult meg, hanem körülbelül 10

másodperccel később és a csapadékesemény végére éppen elérte kitermelt maximális hozamot. A csapadékesemény időtartamának és az intenzitás csökkentésének eredményeképp a hozamértékek változása mindössze kicsivel több, mint 3 percet vettek igénybe. A vízhozamok leolvasásánál alkalmazott időlépéseket nem tudtam tovább csökkenteni, emiatt az ábra jóval „szögletesebb” lett, mint a korábbiak. Jó eredmény, hogy a tetőző szakasz rövidebb lett, így valószínűleg a felső perem hatását a szórófej pozícióváltásával ki tudtam váltani.

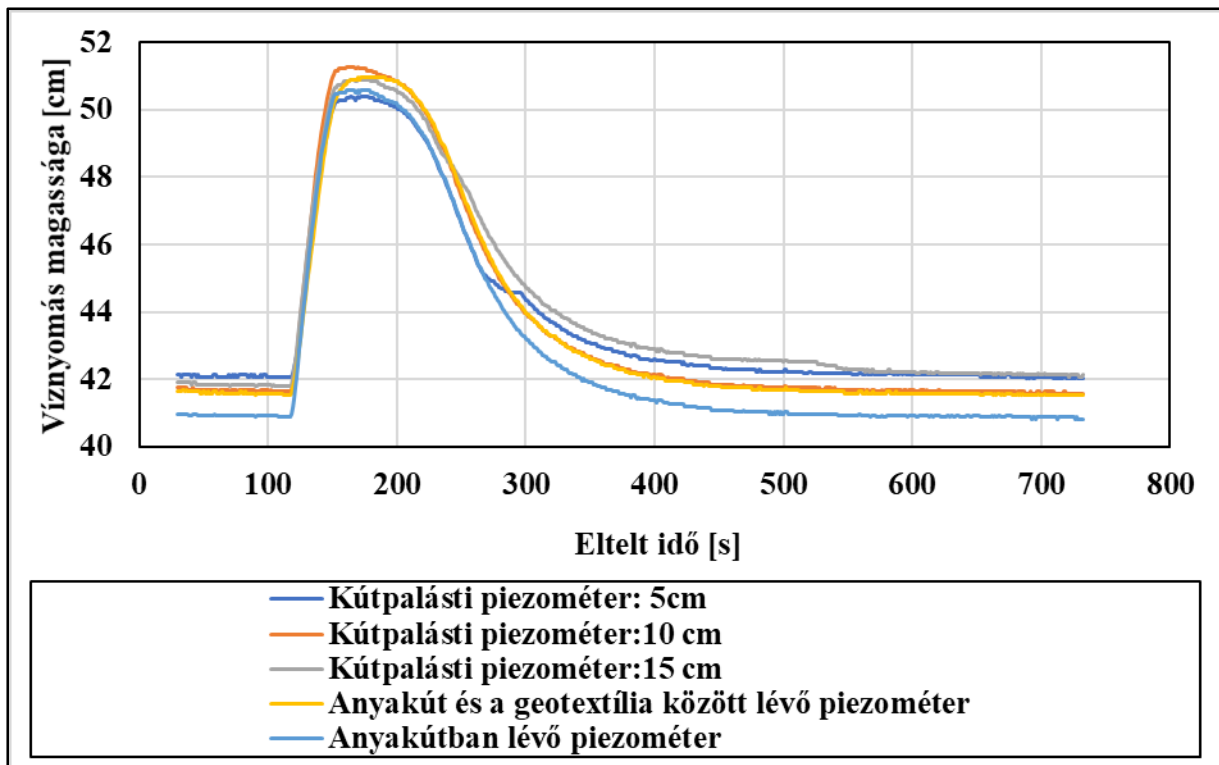
Vizsgálva a méréshez tartozó vízszint kiértékelést (19-21. ábrák), ugyanazt tapasztaltam, mint a korábbi esetben, hogy nem a 10. megfigyelőkútban jelentkezett a legmagasabb vízszint, hanem a 6. megfigyelőkútban, ezt ábrázoltam zöld színnel. Az 19. ábrán a tetőző vízszintek a 6. és 7. megfigyelőkútban szinte teljesen egybesimulnak. Emiatt csak a tetőzés bemutatására készítettem egy diagramot, ez látható az 20. ábrán, amin a két megfigyelőkútban regisztrált vízszint jobban elkülöníthető. Ennél a mérésnél, mivel csak a 6. megfigyelőkútig ért el az esőztető rendszer, így reális, hogy a legmagasabb vízszint a 6. megfigyelőkútban alakult ki. A csapadékesemény hatására azonban a talajminta ekkor is elérte a beszivárgási kapacitásának határát és egybefüggő vízfelszín alakult ki. A talajminta felszínéről késleltetve ugyan, de a 6. megfigyelőkúton túli területekre is eljutott a csapadék egy része. Ez a megfigyelőkutak vízszintjein is jól látható. A korábban az anyakútnál megfigyelt függőleges esés a görbék csökkenő szakaszán itt is megjelent az anyakutak esetében.



19. ábra: Fél perces csapadék hatására kialakuló vízszintek a megfigyelőkutakban



20. ábra: Fél perces csapadék hatására kialakuló tetőző vízszintek a 4-9. megfigyelőkutakban



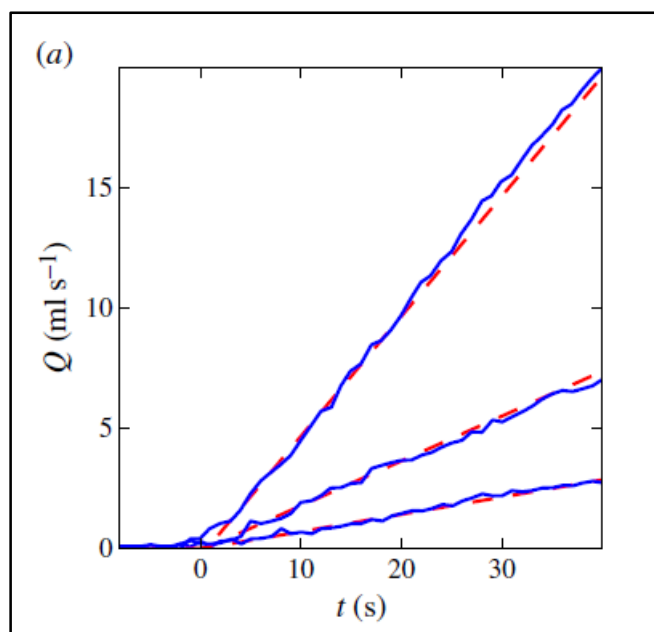
21. ábra: Anyakút palástján elhelyezett piezométerekben kialakuló vízszint fél perces csapadékesemény hatására

Az 21. ábrán szinte észrevehetetlen az egy perces mérés alatti tetőző konstans szakasz, mely nagyon jó eredménynek számít. A csapadék eredményeként a kezdeti lineáris szakaszban a korábbiakkal ellentétben itt nem alakul ki meredekségváltozás, illetve az apadó ágban sem fordul elő függőleges irányú esés, illetve lineáris szakasz. A vízszint-idősor képe tehát egy jóval letisztultabb képet ad az előző egy, illetve három perces csapadékeseményekkel szemben.

8.5. VÍZHOZAM-IDŐSOR KEZDETI SZAKASZÁNAK VIZSGÁLATA

Kiértékelésem során vizsgáltam a csapadék hatására kialakuló vízhozamok időbeli változását abban az időintervallumban, amíg a vízhozam érték növekedést mutatott. Ez az intervallum a különböző időtartamú csapadékeseményeknél eltérő volt.

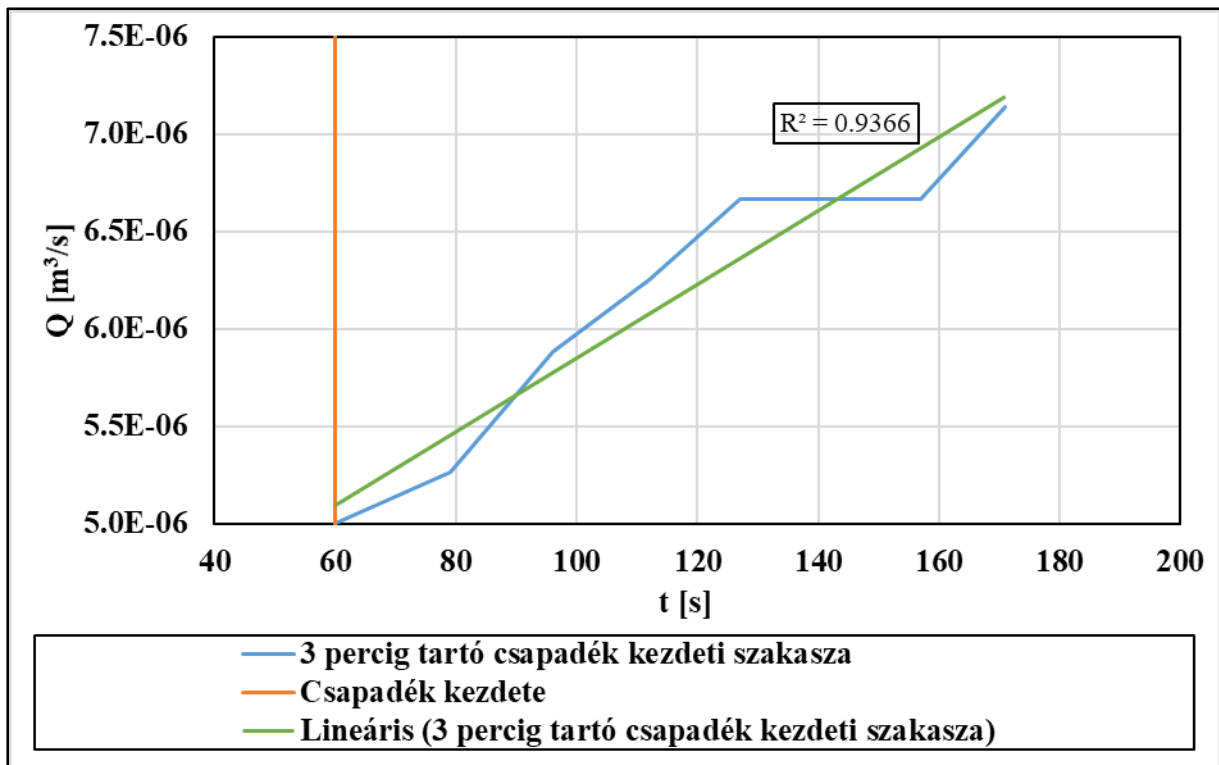
Guérin A. et al. (2014) vizsgálataik során a csapadék kezdetétől 30 másodpercig vizsgálták a vízhozam időbeli változását. Kimutatták, hogy a kezdeti szakaszon a vízhozam lineárisan változik az idő függvényében. A szakirodalom ábrája (22. ábra) alapján az figyelhető meg, hogy a mért és az illesztett görbe közel azonos lefutású és meredekségük megegyezik.



22. ábra: Laborvizsgálat által kimutatott vízhozam lineáris változása (Guérin A. et al. 2014)

Ennek kimutatására a csapadék kezdeti szakaszának egy kijelölt időintervallumában a laboratóriumban mért saját vízhozam idősorokra lineáris egyenest illesztettem, és emellett az illeszkedés pontosságát kiírtattam Microsoft Excel program segítségével.

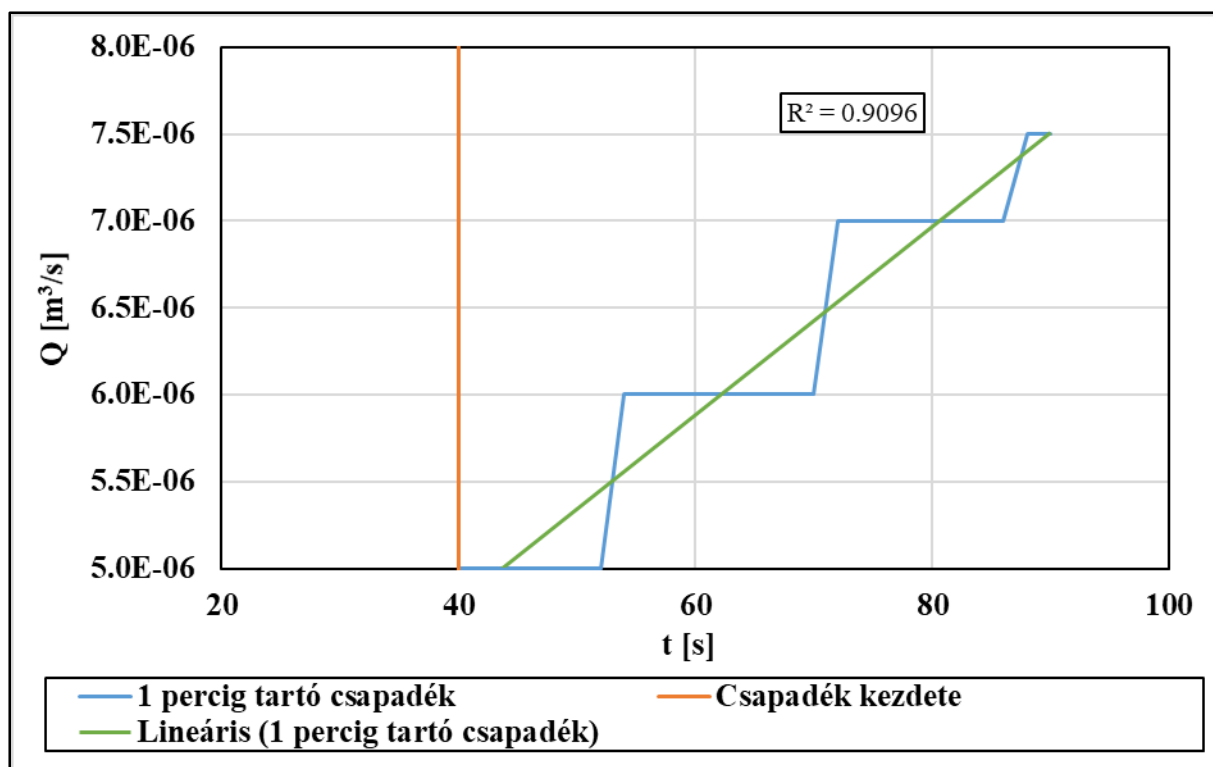
A következő ábrákon bemutatom a kapott eredményeimet. Minden ábra terhelt a vízhozam leolvasásából adódó pontatlanságokkal, hisz azokat csak 5 ml pontossággal volt lehetőségem leolvasni, így a görbékben töréspontok figyelhetők meg.



23. ábra: 3 perces csapadékesemény kezdeti szakasza

A 23. ábrán látható a 3 perces csapadék hatására kialakuló vízhozam értékek az idő függvényében. A vízszintes tengelyen az időt tüntettem fel másodpercben, a függőleges tengelyen pedig a vízhozam látható m^3/s mértékegységben. A korábban leírtak szerint, a csonkított árhullámgörbe csak addig az időpillanatig van feltüntetve, amíg a vízhozamban növekedés tapasztalható. Látható, hogy a vízhozam növekedése 0 másodperctől 183 másodpercig tartott, tehát 183 másodperc alatt érte el a maximumát, ez körülbelül megfelel a csapadék időtartamának.

Látható, hogy a tört, kék görbe és a ráillesztett zöld, lineáris egyenes 92%-os egyezést mutat. Ez az egyezés jónak mondható, azonban a görbék illeszkedésről ez már nem mondható el, eltérnek egymástól. Ez azzal magyarázható, hogy méréseimkor nem tudtam a vízhozamgörbe és a ráillesztett lineáris egyenes egybevágóságának kimutatásához szükséges pontossággal kiértékelni a vízhozamokat. A vízhozam kiértékelési módszerem fejlesztésével a két függvény illeszkedése valószínűleg nagymértékben javítható volna. A hibahatásoktól eltekintve a csapadékesemény kezdete után a vízhozam közelítő jelleggel egy azonos meredekségű lineáris függvénnyel leírható volna.



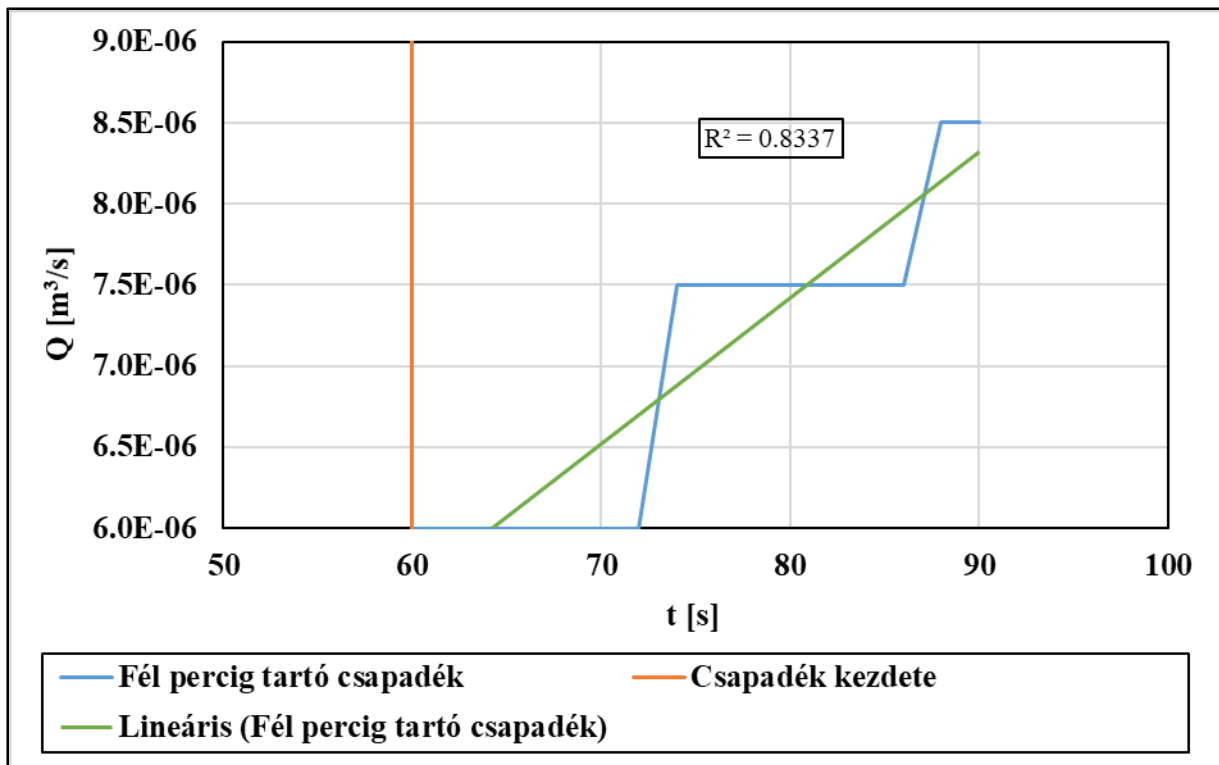
24. ábra: 1 perces csapadékesemény kezdeti szakasza

Az egy percig tartó csapadékeseményhez tartozó mérés eredményeit tüntettem fel a 24.ábrán ahol már a kezdeti leszívás értéke 10 cm-rel növelve lett.

A tengelyek és a kiértékelésnek a módszertana megegyezik a 3 percig tartó csapadékesemény kiértékelésénél leírtakkal. Ebben az esetben a vízhozam növekedése a csapadék kezdete után 12 másodperccel indult meg és a 90. másodpercig nőtt. A növekedési szakasz tehát 48 másodperc hosszú volt, ami azt jelenti, hogy a csapadékesemény teljes időtartamánál kevesebb idő kellett a maximális vízhozam eléréséhez. Meg kell jegyezni, hogy ez a mért adatokra igaz, azonban az ábra egy csonkolt árhullámképet mutat. Feltételezem, hogy a teljes árhullám maximális vízhozamának eléréséhez szükséges lenne legalább a csapadék teljes időtartama.

Ebben az esetben rosszabb, de még mindig jó egyezésnek tekinthető a saját mérésű kék görbe és a ráillesztett lineáris egyenes által meghatározott R^2 érték. A görbék illeszkedéséről jelen mérésnél sem jelenthető ki, hogy a görbék lefutás és meredeksége megegyezik.

Az egyezésbeli romlás a 3 perces csapadékeseményhez képest egyik okaként említhető, hogy a hozamnövekedés kezdeti értéke nem volt pontosan detektálható a vízhozammérés technikájából adódóan. Tovább ok lehet, hogy a 3 perces csapadékeseménynél kisebb volt a leszívás értéke, telítettebb volt a talaj, így elképzelhető, hogy az 1 perces csapadékesemény esetén talaj vízfelvétele késleltetni tudta a vízhozamban bekövetkező változást.



25. ábra: Fél perces csapadékesemény kezdeti szakasza

Utolsó kiértékelésem, a fél perces csapadékeseményhez tartozik. A feldolgozás elve és a tengelyeken feltüntetett értékek megegyeznek a fentebb leírt két esettel. Látható, hogy a csapadékesemény kezdetekor a vízhozam nem kezd egyből növekedni, csak 12 másodperccel később. Ezt a 12 másodperces eltérés a korábbi, 1 perces tartó csapadékeseményt leíró mérés esetén is tapasztalható volt. Itt azonban a csapadék szimulációjának rövidsége miatt a vízhozamnövekedés 18 másodpercig volt tapasztalható.

A 25. ábra alapján azt láthatjuk, hogy az illeszkedés 83%-os, ami az előbbiekhöz képest egy gyengébb érték. Ebben az esetben meg kell jegyezni, hogy ez már egy mérési technikájában módosított mérés, hisz itt már csak egy szórófej adta ki a vízmennyiséget, melynek hatása közvetlenül csak a 6. megfigyelőkútig ért el. Így a korábbi két mérésnek az összevetését ezzel a méréssel fenntartásokkal kell kezelni.

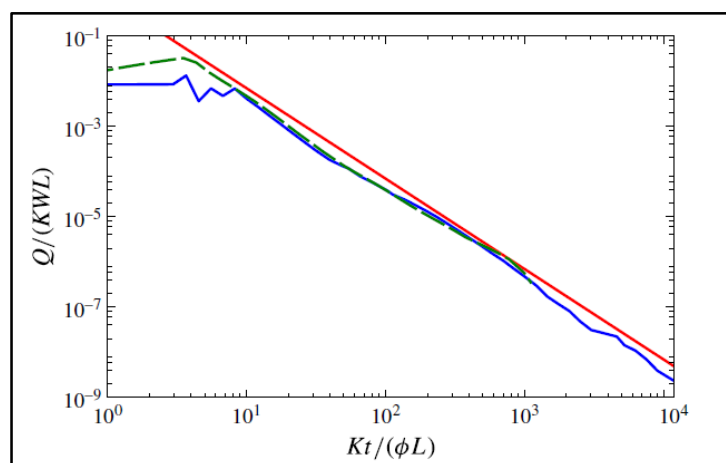
Összességében a három ábráról elmondható, hogy egy-egy állandó meredekségű lineáris közelítés látszólag jó egyezést adott az 1 és a 3 perces tartó csapadékesemény kiértékelésekor, míg gyengébb egyezést tapasztaltam a szórófejek módosítását követő fél perces mérés esetén. A görbék hasonló lefutását a vízhozamértékek kiértékelésének korlátai miatt nem sikerült kimutatnom.

Mind a három mérés esetében a csapadék elálltakor már a maximálisan kitermelhető vízmennyiség volt megfigyelhető, azonban, mint korábban említettem ezek a görbék nem teljes árhullámot leíró görbék. Ahhoz, hogy ez pontosan meghatározható legyen további méréseket és módosításokat kell eszközölnöm, mely alkalmassá teszi a modellt a teljes árhullám kirajzolhatóságára.

8.6. VÍZHOZAM-IDŐSOR CSAPADÉK UTÁNI SZAKASZÁNAK VIZSGÁLATA

A korábban bemutatott (5. fejezet) cikkben kimutatták, hogy a vízhozam értéke a csapadék utáni kiürülési szakaszban független a vízadóréteg szivárgási tényezőjétől. Vizsgálataik során a csapadék utáni vízhozam értékeket az $1/t^2$ függvénnyel közelítették (piros lineáris egyenes) (26. ábra). Látható, hogy a saját méréseik, a zöld szaggatott és a kék jelű görbék, illetve a piros lineáris egyenes meredeksége azonos, a kezdeti szakasz kivételével párhuzamosak egymással, ez látható az 26. ábrán.

Az ábrán lévő mennyiségek a vízszintes tengely esetén a szivárgási tényező szorozva az idővel és elosztva a porozitás és a modell hosszúságának a szorzatával. Itt csak az idő a változó tényező, a többi érték konstans. A függőleges tengelyen pedig a vízhozam van elosztva a szivárgási tényező és a modell felületének a szorzatával, ahol a változó tényező a vízhozam.



26. ábra: Csapadékesemény utáni vízhozam idősor Guérin A. et al kiértékelése alapján

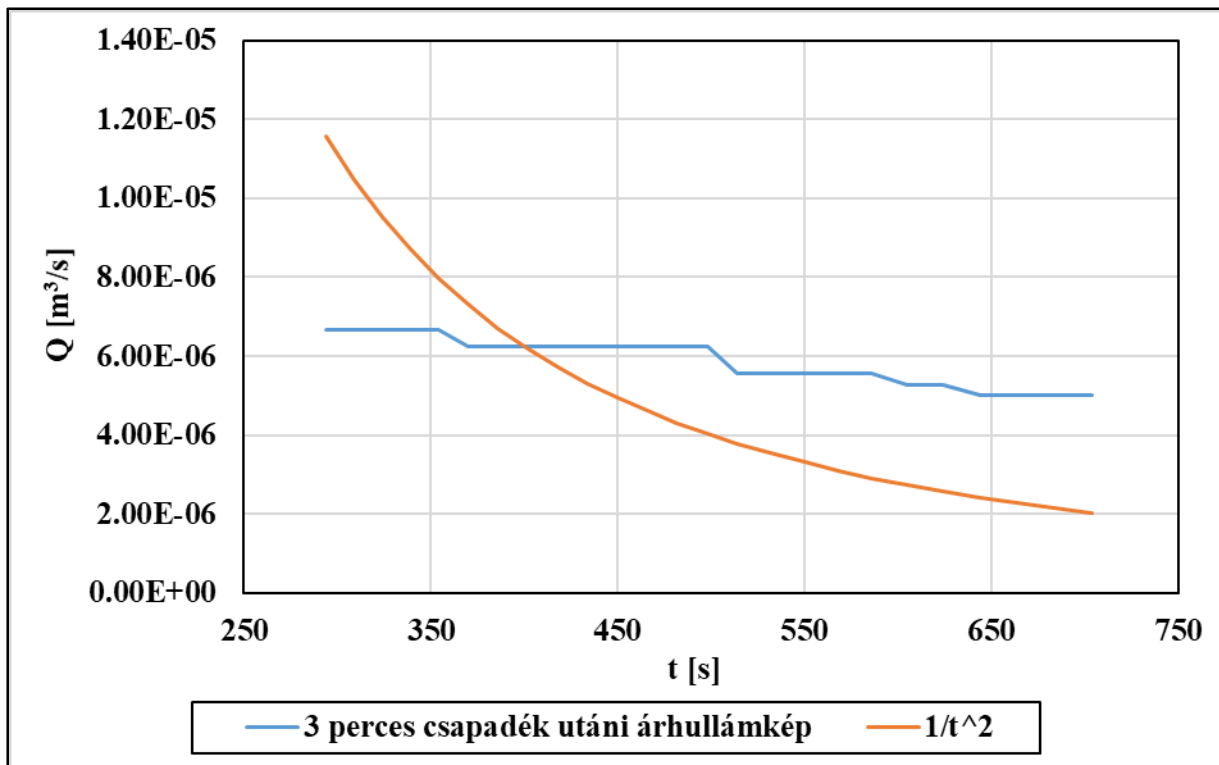
A kiértékelésnél saját méréseimből a 3 perces csapadékeseményt vettem alapul, hisz a szakirodalomban is ilyen csapadékidőtartammal dolgoztak (5. fejezet). Ebben az esetben a csapadék által előidézett árhullám képe nem teljes a korábbiakban bemutatott szerint, de a csapadékesemény utáni időszakot vizsgálva a meglévő szakasz is elegendő volt a kiértékeléshez.

Az 27. ábrán bemutatom a csapadék utáni árhullámképet, ezt ábrázolja a kék színű görbe. Független tengelyen a vízhozamot m^3/s mértékegységben, míg a vízszintes tengelyen az eltelt időt másodpercben tüntettem fel. Látható, hogy a vízszintes tengelyen lévő értékek nem 0 másodperctől kezdődnek, hisz csak a csapadék utáni időszakot vettem figyelembe a kiértékelésnél és jelen vizsgálat során nem volt szükség a másodpercek 0-tól való átszámítására.

Az árhullám apadó ága mellett feltüntettem még az ábrán az $1/t^2$ függvényt, ez látható narancssárga színnel. A képletben szereplő t érték minden esetben az adott vízhozam leolvasásának az időpontját jelentik másodpercben kifejezve. Vizsgáltam, hogy a Guérin A. et al. (2014) cikkben megjelenő meredekségazonosság és a görbék párhuzamos lefutása a saját mérésém esetén miként alakulnak.

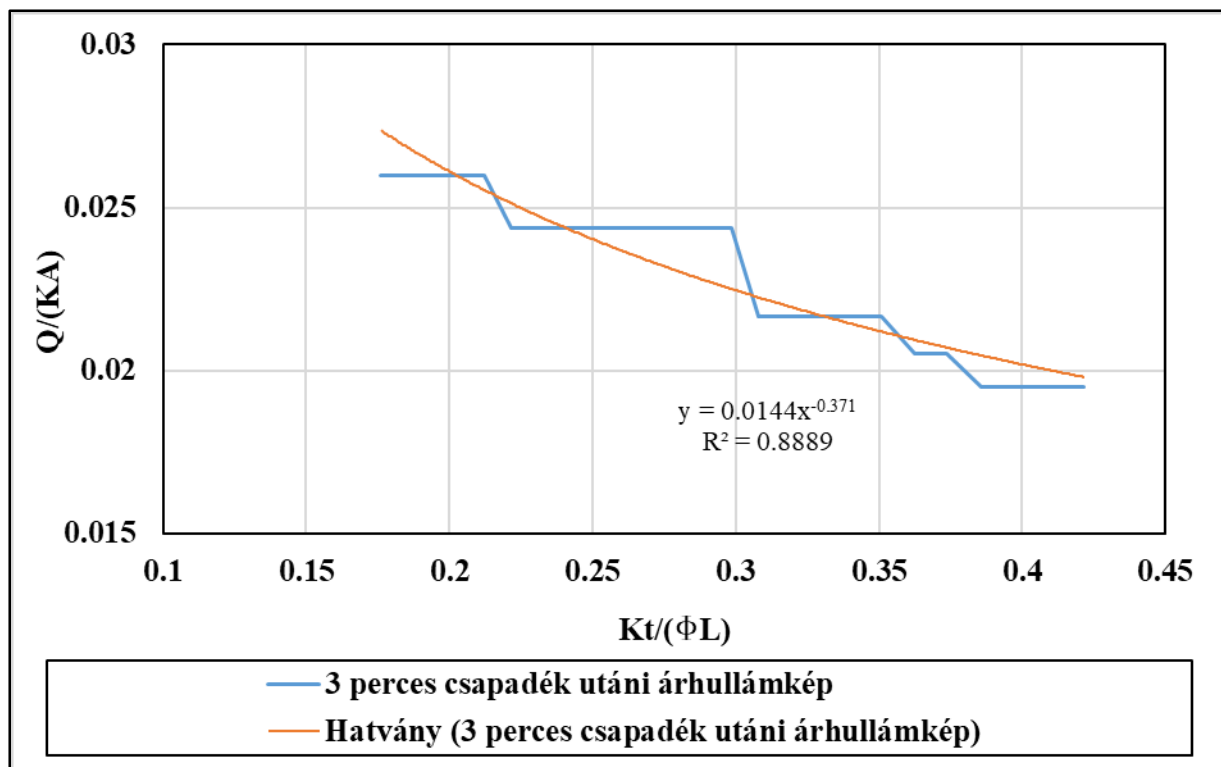
Az ábrán lévő két görbéről egyértelműen látszik, hogy azok lefutása még csak nem is hasonló, nagymértékben eltérnek egymástól. Ez magyarázható a vízhozam mérések eltérő módszerével, mivel Guérin A. et al. (2014) a vízhozammérést a kifolyó vízmennyiség tömegmérésén keresztül oldották meg, mellyel időben nagy felbontású adatsort tudtak előállítani. Jelen körülmények között sűrűbb és pontosabb vízhozam kiértékelésre nem volt lehetőségem, viszont a vizsgálatok és az előállított eredmények minőségében jelentős javulást lehetne elérni, ha a hozammérést hasonló módon végezhetném el a jövőben.

A görbék alapján azonban elmondható, hogy a befolyásoló tényezők nélkül sem módosulna olyan mértékben a feltüntetett kék színű görbe, hogy az a narancssárgával jó illeszkedést mutasson.



27. ábra: 3 perces csapadékesemény utáni árhullámkép és az $1/t^2$ függvény kapcsolata

Meg kell jegyezni, hogy az 27. ábrán feltüntetett vízszintes és függőleges tengelyen lévő mennyiségek nem egyeznek a szakirodalomban levőkkel. Ennek oka, hogy a szakirodalmi mennyiségek a vízhozamnak és az időnek a dimenziótlanított értékét mutatja be. Ebből kifolyólag készítettem egy olyan ábrát (28. ábra) is, ahol a vízszintes és függőleges tengelyen a Guérin A. et al. (2014) alapján tüntettem fel az értékeket. Kiszámoltam a tengelyeken lévő képlet segítségével minden időpontban, amikor vízhozam észlelés történt az ahhoz az időponthoz tartozó értékeket. A vízszintes tengelyen a szivárgási tényező és az idő szorzata osztva a porozitás és a modell hosszúságának a szorzatával szerepel, míg a függőleges tengelyen a vízhozam osztva a szivárgási tényező és a modell felületének a szorzatával értékeket tüntettem fel.



28. ábra: 3 perces csapadékesemény utáni árhullámképre illesztett hatványgörbe

A 28. ábrán a mérési eredményeimre Microsoft Excel program segítségével hatványgörbét illesztettem és kiírtam a görbe egyenletét, illetve az illeszkedés pontosságát. Ezt azért tettem meg, hogy a x paraméter kitevője ismert legyen számomra, melyből következtetni tudtam arra, hogy a kiürülés szakaszában vízhozam valóban független-e a vízáadó szivárgási tényezőjétől.

Azt tapasztaltam, hogy az x kitevője $-0,371$ értékre adódott. Tehát a méréseim alapján kapott görbét a $0.0144/x^{0.371}$ képlettel lehet közelíteni. Ez láthatóan nem egyezik a szakirodalomban meghatározott $1/t^2$ függvénnyel. Ezt a nem egyezést technikai és mérési módszerei okokkal lehet magyarázni. Technikai okként meg kell említeni a leolvasás időlépését, mely a cikkben sokkal gyakoribb volt, nem elhanyagolható a hozammérés pontosságának a befolyásolása és a modell alaki eltérése. Saját méréseim alatt folyamatos volt a próbaszivattyúzás egy nem teljesen áteresztő, hanem ellenállással rendelkező kúton keresztül, ami a Guérin A. et al (2014) vizsgálatainál nem jelent meg, ez jelentené a mérés módszerbeli eltérését.

Vizsgáltam, hogy ha a vízáadó réteg szivárgási tényezőjét változtatom, akkor a kitevő értéke módosul-e. Ennek egy nagyságrenddel való módosítása, ami jelentős változtatást jelent, a kitevő értékén nem változtatott, amiből az következik, hogy a vízhozam értéke a kiürülő szakaszban független a vízáadó talaj szivárgási együtthatójától.

8.7. TOVÁBBI TERVEK A CSAPADÉKESEMÉNYEK HATÁSÁNAK VIZSGÁLATÁRA

Méréseim alapján a jelenlegi kismintamodell a csapadékesemény okozta hatások vizsgálatára korlátozottan alkalmas. A kapott eredményeim több hibaforrásra is rámutatnak, így jövőbeli fő célkitűzésem, hogy a mérési technikát fejlesztve meghatározzam a modell alkalmazhatóságának pontos határait. Nagyobb felbontású vízhozam-idősorok előállításában, illetve pontosságuk ellenőrzésében a numerikus modellezés fontos szerepet játszhat.

További terveim között szerepel a csapadékesemények különböző intenzitású és időtartamú változatainak vizsgálata. Ezeket kiértékelve és egymással összehasonlítva szélesebb körben tudnék megállapításokat tenni a csapadék és talajvíz kapcsolatára, a kitermelhető vízhozam mennyiségére és annak változására.

Kutatásomat szélesíteni lehetne más-más terület rétegszelvényeinek modellezésével. Ezeket átszámolva valós méretre egy adott területre jellemző, csapadék hatására várható vízmennyiségre közelítéseket tudnék tenni. Ehhez azonban bővebb szakirodalmi feltárássra van szükség, hogy az átszámítás minél csekélyebb mértékben módosítsa az eredményeket.

9. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatom keretein belül különböző csapadékesemények vizsgálatával foglalkoztam laboratóriumi körülmények között, kisminta modellezés segítségével. A már több szempontból is tesztelt, meglévő modellt alakítottam át oly módon, hogy a korábban szivárgás- és kúthidraulikai mérésekre alkalmas modellel a csapadékesemények hatását is vizsgálni tudjam. Ehhez a modellen több változtatást is eszközölnöm kellett, melyek egy részét az elvégzett mérések tapasztalatai vezéreltek.

Méréseim alatt három különböző időtartamú és két különböző intenzitású modelleszapadék hatásait vizsgáltam. A három különböző időtartam három, egy és fél perc volt, az intenzitás változtatását csak a fél perces méréseknél végeztem el. A mérések közötti időtartamok és a talajban fennmaradó nedvesség befolyásoló hatásának kimutatása miatt minden csapadékeseményt több méréssel is vizsgáltam. Eredményeim alapján kimutattam, hogy a csapadék által kifejtett vízhozam-idősor változó képet mutat abban az esetben, ha a mérések közötti időtartam nem állandó, emiatt törekedtem az azonos időközökkel való mérésre.

Az eredmények kiértékelése alapján egyértelművé vált, hogy a felső perem komoly befolyást gyakorol a modellterre, főként a hosszabb ideig tartó csapadékok által generált árhullámok

alakjára. A vizsgált talajminta telítődése miatt a felszínen összegyülekező víz a modellter határát képező perforált lemezen keresztül könnyedén a víztérbe jutott, amely ellenőrizetlen kifolyási pontot jelentett vizsgálataim alatt. A felső peremet részben fóliaborítással láttam el, viszont a problémát ez sem oldotta meg teljes mértékben, a perem hatása még a 8. megfigyelőkút értékeiben is kimutatható volt. A leszívás értékének megemelésével növeltem a modellter telítetlen zónájának térfogatát annak érdekében, hogy a minta képes legyen a vízmennyiség nagyobb mértékű befogadására. Ezeken felül a csapadékesemény időtartamán is csökkentettem. További módosítást jelentett, hogy csökkentettem a csapadékesemény intenzitását, valamint a közvetlenül esőztetett területet csak a 6. megfigyelőkútig jelöltem ki. A bemutatott változtatások hatására az eredmények kis mértékben javultak, de a vízhozam-idősorok által leírt árhullám továbbra is csonkolt képet mutatott.

Szakirodalmi példák nyomán vizsgáltam a modellel mért vízhozam idősor korai, illetve késői, apadó szakaszait is a Boussinesq-összefüggés alapján. Előzetes vizsgálatok kimutatták, hogy a vízhozam-idősor csapadékeseményből származó árhullámképének kezdeti szakasza lineáris függvénnyel közelíthető. Méréstechnikai okokból az általam előállított árhullámok kezdeti szakaszai nem mutattak alaki hasonlóságot a rájuk illesztett lineáris függvényekkel. Ennek oka, hogy a leolvasások nem voltak elég gyakoriak és pontosságuk is csak 5 ml pontos volt. Azonban a méréseimre illesztett lineáris egyenes jó, 93, 90 és 83%-os egyezést adott.

A vízhozam-idősor csapadékesemény utáni szakasz kiértékelésével is foglalkoztam Guérin A. et al (2014) cikke alapján. Mérési eredményeiket $1/t^2$ függvénnyel közelítették és kimutatták, hogy a kiürülés szakaszban a vízhozamgörbét leíró függvény kitevő független a szivárgási tényezőtől. Céлом volt, hogy ezt a függvényközelítést az általam mért és kiértékelt eredményekre igazoljam és saját méréseimen keresztül ellenőrizsem a vízhozamgörbe ily módú függetlenségét a szivárgási tényezőtől. Saját eredményeim alapján azt tapasztaltam, hogy az $1/t^2$ függvény az árhullám csapadék utáni szakaszát meg sem közelíti. Ezért a csonkított árhullámképre hatványgörbét illesztettem melynek egyenlete $0,0144/x^{0,371}$ -re adódott. Vizsgáltam, hogy a szivárgási tényező változtatásával a hatványgörbe egyenletében szereplő x kitevője mutat-e változást. Eredményül azt kaptam, hogy a szivárgási tényező nagyságrendi változtatása sem módosítja a kitevő értékét, tehát a vízhozam a csapadék utáni szakaszban valóban független a szivárgási tényezőtől. A közelített függvények közötti eltérés technikai és mérési módszerei okokkal magyarázható, például a modell alakjával vagy a próbaszivattyúzás befolyásoló hatásával, ami a szakirodalmi cikkben nem volt jelen.

Annak érdekében, hogy Boussinesq-egyenletek felhasználásával pontosabb eredményeket kapjak a vízhozam-idősor vizsgálatában új vízhozammérési eljárás alkalmazására volna szükség, mellyel nagyobb időfelbontású adatsort állíthatnék elő. Ehhez jó megoldást nyújthatna egy tömegmérésen alapuló eljárás használata, viszont ennek műszerigényét pótolni kell.

A kisminta modell jelenlegi állapotában korlátozott mértékben alkalmas a csapadékok okozta hatások megfigyelésére, viszont használhatóságának összes határát még nem sikerült feltárni. Az elvégzett méréseim tapasztalatai, valamint a kapott eredmények alapján további fejlesztések végezhetők a fizikai modellen, mellyel a felfedezett hiányosságai kiküszöbölhetők. Ezáltal a későbbiekben teljesebb képet kaphatunk a laboratóriumi modell ezirányú felhasználásának tényleges értékéről és az esetleges eltérések okairól. Ezek feltérképezését követően a modellel nyert adatsorok a későbbiekben értékesebbé válhatnak és nagyban hozzájárulhatnak a téma ismeretanyagának bővítésében.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- **Andermann, C., Longuevergne, L., Bonnet, S., Crave, A., Davy, P. & Gloaguen, R. (2012):** Impact of transient groundwater storage on the discharge of Himalayan rivers. *Nat. Geosci.* 5 (2), 127-132
- **Barta E., Hajnal G., Veczán É., Vasvári V. (2012) -** Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes mithilfe von Modellversuchen, in: Zenz G. (ed.): *Wasserbau Symposium 2012: Global Denken - Lokal Handeln*. 672 p. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2012. Pp. 307-314. (ISBN: 978-3-85125-230-9)
- **Bear, J. (1972):** *Dynamics of fluids in porous media*. New York: Dover. (ISBN 0-486-65675-6)
- **Boussinesq, J. (1903):** Sur un mode simple d'écoulement des nappes d'eau d'infiltration à lit horizontal, avec rebord vertical tout autour lorsqu'une partie de ce rebord est enlevée depuis la surface jusqu'au fond. *C. R. Acad. Sci. Paris* 137, 5-11
- **Darcy, H. (1856):** *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. p. 647, Paris
- **Devauchelle, O., Petroff, A. P., Seybold, H. F. & Rothman, D. H. (2012):** Ramification of stream networks. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 109 (51), 20832-20836
- **Dupuit, J. É. J. (1863):** *Études théoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables*. Paris, 304 p.
- **Erhel, J., De Dreuzy, J.-R. & Poirriez, B. (2009):** Flow simulation in three-dimensional discrete fracture networks. *SIAM J. Sci. Comput.* 31 (4), 2688-2705
- **Farkas, D. (2020):** *Próbaszivattyúzás folyamatának és hatásainak vizsgálata terepi és laboratóriumi körülmények között*, Disszertáció kézirat
- **Fetter, C. W. (2001):** *Applied Hydrogeology*, 4th edition. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- **Genereux, D. P. & Hooper, R. P. (1998):** Oxygen and hydrogen isotopes in rainfall-runoff studies. In: *Isotope Tracers in Catchment Hydrology* (C. Kendall & J. J. McDonnell, eds.). Elsevier, Amsterdam, pp. 319 – 346.
- **Guérin A., Devauchelle O. & Lajeunesse E. (2014):** Response of a laboratory aquifer to rainfall, Paris, *JFM Rapids*
- **Guérin, A., Devauchelle, O., Robert, V., Kitou, T., Dessert, C., Quiquerez A., Allemand, P. & Lajeunesse, E. (2019):** Stream-Discharge Surges Generated by Groundwater Flow, *Geophysical Research Letters*

- **Hegedűs N. (2018)** – Kúthidraulikai vizsgálatok kismintamodellezéssel, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, TDK
- **Hegedűs N. (2019)** – Kúthidraulikai vizsgálatok kisminta- és numerikus modellezéssel, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, TDK
- **Horton, R. E. (1945):** Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Am. Bull.* 56 (3), 275-370.
- **Ivicsics L. (1968):** Hidromechanikai modellkísérletek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, pp. 1-30.
- **Jobbágy R. (2009):** Szivárgási tényező meghatározása terepi mérésekkel, Bsc. Diplomamunka, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék.
- **Juhász J. (2002):** Hidrogeológia, Akadémia kiadó, Budapest
- **Kirchner, J. W., Feng, X. & Neal, C. (2000):** Fractal stream chemistry and its implications for contaminant transport in catchments. *Nature* 403 (6769), 524-527.
- **Kovács Gy. (1972):** A szivárgás hidraulikája, Akadémiai Kiadó, Budapest
- **Long, J. C. S., Remer, J. S., Wilson, C. R. & Witherspoon, P. A. (1982):** Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures. *Water Resour. Res.* 18 (3), 645-658
- **McDonnel, J. J. (1990):** A rationale for old water discharge through macropores in a steep, humid catchment. *Water Resour. Res.* 26 (11), 2821-2832.
- **Mosonyi E. (1955):** Hidraulikai hasonlóság a kismintatörvények és a kísérletek értékelése, a várható eredmények, Kézirat, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest. pp. 41-44.
- **Narasimhan T N (2009):** Groundwater: from mystery to management. *Environment Research Letters* 4 035002
- **Neal, C. & Rosier, P. T. W. (1990):** Chemical studies of chloride and stable oxygen isotopes in two conifer afforested and moorland sites in the British unlands. *J. Hydrol.* 115 (1), 269-283.
- **Polubarinove Kochina, P. Ya. (1962):** Theory of Ground Water Movement. Princeton University Press
- **Renard, P. & De Marsily, G. (1997):** Calculating equivalent permeability: a review. *Av. Water Resour.* 20 (5), 253-278.

- **Rotárné Szalkai Á., Homolya E., Selmeczi P. (2015):** A klímaváltozás hatása az ivóvízbázisokra. Kutatási jelentés, pp.5, 11, 29-32
- **Sanford, W. E., Parlange, J. Y. & Steenhuis, T. S. (1993):** Hillslope drainage with sudden drawdown: closed form solution and laboratory experiments. Water Resour. Res. 29 (7), 2313-2321.
- **Sefton, C., Whitehead, P., Eatherall, A., Littlewood, I., & Jakeman, A. (1995):** Dynamic response characteristics of the Plympton catchments and preliminary analysis of relationships to physical descriptors. Environmetrics, 6(5), 465-472
- **Szabó G., Hajnal G., Vasvári V. (2012)** – Inverse numerische Modellierung zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes, in: Zenz G (ed.): Wasserbau Symposium 2012: Global denken - lokal handeln. 672 p. Graz: Verlag der Technischen Universität Graz, 2012. Pp. 233-240. (ISBN: 978-3-85125-230-9)
- **Szilágyi, J. & Parlange, M. B. (1998):** Baseflow separation based on analytical solutions of the Boussinesq equation. J. Hydrol. 204 (1), 251-260
- **Öllős G. (1957):** A kútpaláston kialakuló vízmozgásnak és a kút vízhozamának vizsgálata, Hidrológiai Közlöny 37. évf. 1957. 1. szám, pp. 26-33.
- **Ubell K. (1958):** Az elméleti kúthidraulika módszereinek gyakorlati alkalmazása, Vízügyi közlemények, 1958. 3. szám pp. 306-333.
- **Víg T. (2016):** Szivárgási tényező meghatározása kisminta kísérletekkel, Bsc. diplomamunka, BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetet mondok Farkas Dávid tanszéki konzulensemnek, aki lehetőséget adott a kutatási munkákban való részvételhez. Vizsgálataim kezdete óta mindenben segítségemre volt, támogatásával végigkísérte a munkámat.

Köszönöm Dr. Farkas-Karay Gyöngyinek, konzulensemnek, hogy segítségével mindig rendelkezésre állt és az esetlegesen felmerülő kérdéseimre, problémáimra érthető, széleskörű választ adott, illetve hozzájárult a numerikus modellezés elsajátításában.

Köszönöm Havasi-Tóth Baláznak a videók feldolgozásában nyújtott segítséget.

Köszönöm szépen a Magyar Államnak, hogy az UNKP-20-1 kódú pályázat anyagilag támogatta dolgozatom létrejöttét.