

# KÚTHIDRAULIKAI VIZSGÁLATOK KISMINTA- ÉS NUMERIKUS MODELLEZÉSSSEL

TDK Dolgozat

2019

KÉSZÍTETTE:

HEGEDŰS NOÉMI

III. éves építőmérnök hallgató

KONZULENSEK:

FARKAS DÁVID

DR. FARKAS-KARAY GYÖNGYI

## TARTALOMJEGYZÉK

|  |    |
|--|----|
| ÁBRAJEGYZÉK .....  | 2  |
| TÁBLÁZATJEGYZÉK .....  | 3  |
| KÉPJEGYZÉK.....  | 3  |
| 1. BEVEZETÉS.....  | 4  |
| 2. FELSZÍN ALATTI VÍZMOZGÁS ÁRAMLÁSI VISZONYAINAK JELLEMZÉSE.....      | 5  |
| 3. SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ MEGHATÁROZÁSA PRÓBASZIVATTYÚZÁSSAL .....         | 7  |
| 3.1. Dupuit-módszer .....  | 7  |
| 4. A KISMINTAVIZSGÁLATOK ELMÉLETE.....                                 | 9  |
| 4.1. Geometriai hasonlóság .....                                       | 9  |
| 4.2. Kinematikai hasonlóság.....                                       | 9  |
| 4.3. Dinamikai hasonlóság.....   | 10 |
| 4.4. Kapcsolat a hasonlóságok között.....                              | 10 |
| 4.5. Mosonyi-Kovács modelltörvény .....                                | 10 |
| 5. FIZIKAI MODELL BEMUTATÁSA.....                                      | 12 |
| 5.1. A kismintamodell paramétereinek ismertetése .....                 | 12 |
| 6. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE .....                             | 14 |
| 6.1. A szivárgási tényező változása az idő függvényében.....           | 14 |
| 6.2. Az anyakút teljesítőképessége .....                               | 17 |
| 6.3. Anyakutaknál kialakuló szabad szivárgási felület.....             | 20 |
| 6.4. A szabad szivárgási felület és leszívás kapcsolata .....          | 24 |
| 6.5. Modelltér áramlási viszonyainak ellenőrzése .....                 | 27 |
| 6.6. Kútpalást mentén kialakuló nyomásszintkülönbségek .....           | 31 |
| 6.7. Valós méretre való átszámítás .....                               | 33 |
| 7. NUMERIKUS MODELLEZÉS .....  | 35 |
| 7.1. A Forchheimer-egyenlet .....                                      | 35 |
| 7.2. A Processing MODFLOW és a Non-linear Flow Process programok ..... | 37 |
| 7.3. A numerikus modell felépítése .....                               | 38 |
| 7.4. A PM által előállított fájlok .....                               | 41 |
| 7.5. Kezdeti futtatások eredményeinek bemutatása.....                  | 46 |
| 7.5.1. Vízkivétel kúttal .....   | 46 |
| 7.5.2. Vízkivétel fix kifolyási peremmel .....                         | 46 |
| 7.6. Eredmények kiértékelése .....                                     | 48 |
| 7.6.1. Kis hozamú modellváltozat .....                                 | 48 |
| 7.6.2. Nagy hozamú modellváltozat .....                                | 49 |

|  |    |
|--|----|
| 7.7. További tervek a numerikus modell fejlesztésére ..... | 52 |
| 7.8. További tervek a kismintamodellezéssel .....          | 52 |
| 8. ÖSSZEFOGLALÁS .....                                     | 53 |
| FELHASZNÁLT IRODALOM .....                                 | 55 |
| KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS .....                                  | 59 |
| MELLÉKLETEK .....  | 60 |

## ÁBRAJEGYZÉK

|   |    |
|---|----|
| 1. ábra: Megfigyelőkútpárokra számított átlagos szivárgási tényező értékek változása az idő függvényében .....  | 15 |
| 2. ábra: Leszívás és vízhozam kapcsolata az 1,0mm lyukátmérőjű kút 3 darab mérésora alapján .....   | 17 |
| 3. ábra: Leszívás és vízhozam kapcsolata a 2,5 mm lyukátmérőjű kút 5 darab mérésora alapján .....   | 18 |
| 4. ábra: Leszívás és vízhozam kapcsolata az 1,0 mm és a 2,5 mm lyukátmérőjű kutak 8 darab mérésora alapján .....  | 19 |
| 5. ábra: A kútpaláston belüli és kívüli vízszintek ( $h_b$ , illetve $h_k$ ) egymástól való elszakadásának folyamata különböző sugarú ( $r_0$ ) kutak esetében (Öllös 1958) ..... | 21 |
| 6. ábra: A három különböző lyukmérettel kialakított anyakút palástján belüli és kívüli vízszintek ( $h_b$ , illetve $h_k$ ) egymástól való elszakadásának folyamata .....         | 22 |
| 7. ábra: 1,0 mm lyukátmérő anyakút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C-ra átszámított értékek) .....                                    | 24 |
| 8. ábra: 2,5 mm lyukátmérő anyakút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C-ra átszámított értékek) .....                                    | 25 |
| 9. ábra: 2,0 mm lyukátmérő anyakút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C-ra átszámított értékek) .....                                    | 25 |
| 10. ábra: A különböző anyakutak esetében mért belépési sebesség és kútellenállás kapcsolata .....   | 28 |
| 11. ábra: A különböző anyakutak esetén mért Re szám és kútellenállás kapcsolata .....   | 29 |
| 12. ábra: 2,5 mm-es perforációjú kút mentén kialakult nyomásszint eltérések .....   | 32 |
| 13. ábra: A Darcy-törvénnyel és a Forchheimer-egyenlettel számított fajlagos hozamok közötti eltérés. (Farkas-Karay 2018) .....   | 36 |
| 14. ábra: Különböző cellafinomítások szemléltetése a termelőkút környezetében .....   | 39 |

|  |    |
|--|----|
| 15. ábra: Alapmodell geometriája a peremfeltételekkel.....                         | 40 |
| 16. ábra: PM által előállított bas.dat fájl .....                                  | 42 |
| 17. ábra: CFP_NLFP_final_verison.exe programhoz szükséges bas_p.dat fájl.....      | 44 |
| 18. ábra: CFP_NLFP_final_version.exe program lefutásához szükséges NLFP_p.dat..... | 45 |
| 19. ábra: Az utolsó megfigyelőkút az új felső perem.....                           | 47 |
| 20. ábra: Kis vízhozam esetén vizsgált nyomásszintek.....                          | 48 |
| 21. ábra: NLFP nélkül lefutott modell .....  | 50 |
| 22. ábra: NLFP-t figyelembe vevő futtatás, b/a=1000 esetén .....                   | 51 |
| 23. ábra: Kismintamodell oldal- és felülnézeti ábrája.....                         | 63 |

## TÁBLÁZATJEGYZÉK

|   |    |
|---|----|
| 1. táblázat: Szivárgási viszonyok határértékei .....  | 7  |
| 2. táblázat: Mosonyi-Kovács modelltörvény arányszámai (Mosonyi és Kovács 1952) .....  | 11 |
| 3. táblázat: A 13. egyenlet alkalmazhatóságához ajánlott tartományok.....   | 28 |
| 4. táblázat: Optimális belépési sebességek a környező talaj szivárgási tényezőjének függvényében .....  | 30 |
| 5. táblázat: Valós méretre való átszámítás 1,0 mm lyukátmérőjű kút esetén lamináris esetben.....  | 34 |
| 6. táblázat A b/a paraméter mért és különböző szerzők által megadott félempirikus összefüggésekkel számított értékei különböző kőzetanyagra. (1): Ward 1964, (2): Ergun 1952, (3): Bear 2012, (4): Sidiropoulou et al. 2007, (5): Arbhabhira, Dinoy 1973, (6): Ahmed, Sunada 1969, (7): Tyadi, Todd 1970..... | 37 |
| 7. táblázat: A .dat kiterjesztésű állományok rendszerezése .....  | 43 |
| 8. táblázat: CFP_NLFP_final_version.exe program lefutásához szükséges NAME_p.dat fájl tartalma.....   | 45 |
| 9. táblázat: Különböző b/a értékek mellett kialakuló vízhozamok .....   | 50 |

## KÉPJEGYZÉK

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 1. kép: Vízhozammérés folyamata ..... | 14 |
|---------------------------------------|----|

## 1. BEVEZETÉS

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék Laboratóriumában már 2011 óta aktívan foglalkoznak a próbaszivattyúzás folyamatának jobb megismerésére irányuló kismintakísérletezéssel. A kutatáshoz 2018 júliusában lehetőségem adódott csatlakozni, korai eredményeimet 2018-ban TDK dolgozat formájában mutattam be. Ekkor két különböző kialakítású anyakút esetét tudtam megvizsgálni szivárgás- és kúthidraulikai szempontokból. Összesen 147 mérést végeztem el, melyeket négy mérésorba csoportosítottam. Ezek közül három mérésort az első termelőkúttal, míg egyet a második anyakútkialakítással hajtottam végre. Akkori adataim felhasználásával több megállapítást is tettem, melyek az alábbi témákat érintették:

- Ellenőriztem a víz- és nyomásszintek egyezőségét az egyes mérések esetén.
- Számítottam a kismintamodellben lévő talajféleségre egy optimális anyakút-megfigyelőkút távolságot.
- A modellben mért értékek alapján szivárgási tényezőket számoltam, melyből kimutattam az időbeli változást.
- Leszívás-hozam görbéket állítottam elő a rendelkezésre álló adatokból.
- Összehasonlítottam a két különböző termelőkút palástján kialakuló szakadás mértékét, melyet összevettem Öllös (1958) munkájával és megállapítottam, hogy a teljes leszívás hány százaléka alakul ki a kútpaláston.
- A Reynolds-szám alapján számításokkal ellenőriztem a modellben kialakuló áramlási viszonyokat.
- Majd az eredményeimet a Mosonyi-Kovács modell törvény értelmében, ahol az áramlás lamináris, tehát érvényesül a Darcy-törvény, átszámítottam valós méretekre.

Kutatási tevékenységemet a konferencia után is folytattam és további mérésekkel bővítettem adathalmazom. Az így már közel másfél éve tartó folyamatos munka 453 mérést eredményezett. Vizsgálataim három különböző kútkialakítású esetre elvégzett mérésorozatok összessége. A termelőkutak egyaránt 5 %-os áteresztőfelülettel készültek, azonban különböző lyukátmérőjű perforációval rendelkeznek. Az első 3 mérésort az 1 mm átmérőjű kör alakú perforációval kialakított termelőkúttal végeztem, míg a következő 6 mérésor esetében ez az átmérő 2,5 mm, és az utolsó 4 sorozat esetében 2,0 mm volt.

Dolgozatom egyik fő célja, hogy a korábban bemutatott szivárgás- és kúthidraulikai eredményeimet a 2. és 3. termelőkút esetében is megvizsgáljam, összehasonlítsam a már

meglévő eredményeimmel, pontosítsam, alátámasszam azokat és kitérjek más, eddig még nem vizsgált területekre is.

A laborban végzett fizikai mérések alapján arra a következtetésre jutottam mind a permanens és nem permanens eredményeimet összevetve, hogy a termelőkút környezetében a Darcy-törvény által leírt, az egész víztartón értelmezendő lineáris áramlás érvényessége megkérdőjelezhető. Ennek ellenőrzése a kismintamodellből nyert adatokkal nem megoldható, ezért úgy döntöttem, hogy numerikus szoftverben fogom megvizsgálni a talajmintában esetlegesen kialakuló nemlineáris áramlás jelenlétét az anyakút környezetében. A modellezéshez a MODFLOW-NLFP (Nonlinear Flow Process) modulját használtam. A véges differencia módszerrel számoló MODFLOW ezen modulja a Forchheimer-egyenleten alapuló bővítmény, ami lehetővé teszi, hogy a szivárgási térben az esetlegesen kialakuló nemlineáris áramlás kimutatható legyen.

## **2. 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 hézagtérfogat ( $n$ ) adja meg, ami a talajban lévő hézagok térfogatának és a teljes térfogatnak hányadosa.

$$v_{sz} = n * v_{eff} \quad [1]$$

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

$$v = -k * \frac{dh}{dr} = -k * I \quad [2]$$

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.

1. táblázat: Szivárgási viszonyok határértékei

| Szerző(k)                  | Áramlást jellemző tartományok a Reynolds-szám függvényében |                                     |             |
|----------------------------|--|-------------------------------------|-------------|
|                            | Lamináris  | Átmeneti                            | Turbulens   |
| Bear (1972)                | $Re < 1 - 10$  | $Re < 100$                          | $Re > 100$  |
| Dybbs & Edwards (1984)     | $Re < 1$   | $5 < Re < 80$                       | $Re > 120$  |
| Williams (1985)            | $Re < 15$  | $15 < Re < 50$                      | $Re < 50$   |
| Fand et al. (1987)         | $Re < 2,3$   | $5 < Re < 80$                       | $Re > 120$  |
| Trussell & Chang (1999)    | $Re < 1$   | $1 < Re < 100$                      | $Re > 800$  |
| Juhász (2002)              | $Re=4$   | $200 < Re < 1000$<br>$4 < Re < 200$ | $Re > 1000$ |
| Hlushkou & Tallarek (2006) | $Re < 1$   | $1 < Re < 500$                      | $Re > 500$  |

### 3. SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ MEGHATÁROZÁSA PRÓBASZIVATTYÚZÁSSAL

#### 3.1. DUPUIT-MÓDSZER

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

$$k = \frac{Q}{\pi} * \frac{\ln \frac{R}{r}}{H_1^2 - H_2^2} \quad [3]$$

- k: szivárgási tényező [m/s]
- Q: szivattyúzott vízhozam [m<sup>3</sup>/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):

$$k = \frac{Q}{\pi} * \frac{\ln \frac{x_1}{x_2}}{y_1^2 - y_2^2} \quad [4]$$

- $x_1$ : távolabbi figyelőkút távolsága a szívott kúttól [m],
- $x_2$ : közelebbi figyelőkút távolsága a szívott kúttól [m],
- $y_1$ : távolabbi figyelőkútban a leszívást követő vízszlopmagasság [m],
- $y_2$ : közelebbi figyelőkútban a leszívást követő vízszlopmagasság [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:

$$R = 3000 * s * \sqrt{k} \quad [5]$$

- $s$ : leszívás a kútban [m].

## 4. 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).

### 4.1. GEOMETRIAI HASONLÓSÁG

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).

### 4.2. KINEMATIKAI HASONLÓSÁG

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).

### 4.3. DINAMIKAI HASONLÓSÁG

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).

### 4.4. KAPCSOLAT A HASONLÓSÁGOK KÖZÖTT

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 alapl mértékegységek szerepelnek, nemcsak két, hanem több mennyiségből is alkothatunk. A mennyiségek számértékének invarianciája lehetővé teszi azt, hogy a különböző méretekből lejátszódó folyamatok egymásnak megfelelő jellemző mennyiségei közötti kapcsolatot matematikailag egyértelműen kifejezhessük. Ezért gyakran kismintatörvényeknek is nevezik ezeket a mennyiségcsoportokat. (Ivicsics 1968).

### 4.5. 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

$$I' \gamma' l' z'^2 \pi = 2 \pi z' l' \frac{dv'}{dz'} \eta' \quad [6]$$

és az

$$I'' \gamma'' l'' z''^2 \pi = 2 \pi z'' l'' \frac{dv''}{dz''} \eta'' \quad [7]$$

egyenleteket írta fel. Ezek alapján:

$$\frac{v'}{v''} = 1 \quad [8]$$

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

$$k'I' = k''I'' \quad [9]$$

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

$$k' = k'' \quad [10]$$

végeredményül az

$$I' = I'' \quad [11]$$

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 arányszámnak 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).

**2. 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 <sup>2</sup>                      | 88,5  | C <sup>2</sup>  | 88,5  |
| Térfogat          | C <sup>3</sup>                      | 833   | C <sup>3</sup>  | 833   |
| Idő               | C <sup>-1</sup>                     | 0,106 | C               | 9,41  |
| Sebesség          | C <sup>2</sup>                      | 88,5  | C <sup>0</sup>  | 1,00  |
| Gyorsulás         | C <sup>3</sup>                      | 833   | C <sup>-1</sup> | 0,106 |
| Hozam             | C <sup>4</sup>                      | 7840  | C <sup>2</sup>  | 88,5  |

## 5. FIZIKAI MODELL BEMUTATÁSA

### 5.1. A KISMINTAMODELL PARAMÉTEREINEK ISMERTETÉSE

A kitűzött vizsgálatok elvégzésére a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék laboratóriumában található kismintamodell adott lehetőséget. A kismintamodellről több képet is készítettem, ezek a Mellékletben (Melléklet 1-6. képek) láthatók.

A modell körcikk alaprajzú. A két oldalfal által közbezárt szög  $90^\circ$ . 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  $1,4 \text{ m}^3$ .

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). Ezen mérések során a vízkitermelés hatására létrejött leszívási görbék mérését a modell fenéklemezén kialakított 10 darab piezométerrel regisztrálták. A víz modelltérbe történő bevezetését bukóval biztosították, a kilépő hozamokat szivattyúval szabályozták. A vízteret geotextíliával burkolt rács választja el a talajjal megtöltött résztől. A fémrács a fizikai elhatárolást biztosítja, a geotextília az apró szemcsék szűrésére szolgál, hogy azok ne mosódjanak a víztérbe.

Barta és szerzőtársai (2013) mérései során több problémára is fényt derült. A kezdeti szakaszban alkalmazott 10 mm átmérőjű anyagúttal nem tudtak kellő mértékű leszívást létrehozni, ezért lecserélték egy 17 mm-esre. 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. Természetesen az anyagutat is geotextíliával vonták be. A szivattyúval nehézségekbe ütközött az egyenletes és hosszabb időtartamú kilépő vízhozam biztosításával. Ez befolyásolhatta mérési eredményeik pontosságát. A modellben kialakult leszívási görbét összevetve a Theis-módszerrel kapott elméleti görbével megállapították, hogy az anyagút közvetlen közelében nagy eltérés mutatkozik.

A bemutatott nehézségek miatt Farkas Dávid 2015-ös vizsgálataink elkezdése előtt a kismintamodellen átalakításokat eszközölt. Nemcsak a vízbevezetésnél, hanem a vízkivételnél is bukót alkalmazott, így a leszívást a két bukó szintkülönbsége generálta. Ezzel biztosította az egyenletes vízkivételt. Az anyakútban lévő nyomásmagasság leolvasásához egy piezocső kivezetést hozott létre és a piezométerek számát tízről harminc darabra növelte. Ezek közül tizenöt darab a modell oldallemezén található az anyakút közelében, három oszlopban egymás alatt 5 centiméterenként. Így a kút közvetlen környezetében kialakuló nyomásviszonyokról több információt lehet gyűjteni. Öt darab piezométer van egymás alatt az oldallemezről bevezetve a modell szimmetriatengelyéig az anyakúttól 73 centiméteres távolságra. Emellett öt darab megfigyelőkutat helyezett el a modell üvegfalán, az anyakúttól 15, 20, 30, 45 és 70 centiméteres távolságban. Az észlelőkutak perforált csövek, melyeket szintén geotextíliába burkolt, hogy megelőzze a finom frakció bemosódását. Ezek a kutak vonalmenti megfigyelőként viselkedtek.

2015-ös mérések óta a modellben további átalakításokra volt szükség. Az alkalmazott piezométerek számát harmincról húszra csökkentettem. Ezekből tíz az oldallemezen található, két oszlopban egymás alatt 5 centiméterenként, tíz pedig a modell alján, sugárirányban helyezkedik el. Az öt megfigyelőkút helyett tíz megfigyelőkút került elhelyezésre az oldalfalon. A meglévő 32 mm belső átmérőjű csöveket lecseréltem 17 mm átmérőjűekre annak érdekében, hogy a vízszintészlelések minél pontszerűbbek legyenek. A 10 darab kút távolsága az oldalfaltól: 8, 12, 17, 27, 37, 50, 63, 76, 90 és 105 cm. Egy 11. „megfigyelőkutat” hoztam létre azáltal, 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. A fizikai modellről készült oldal- és felülnézeti ábrát a Melléklet 1. ábrájaként közöltem.

A leszívást továbbra is a két bukó generálta, így egyenletes volt a vízkivétel. A bukókban egy-egy laborhőmérő van annak érdekében, hogy a modellbe be- és kilépő víz hőmérsékletét regisztrálni tudjam.



1. kép: Vízhozammérés folyamata

## 6. VIZSGÁLATI EREDMÉNYEK ISMERTETÉSE

A következő fejezetekben részletesen ismertetem az összesen 453 darab mérés adatainak feldolgozásából született eredményeket.

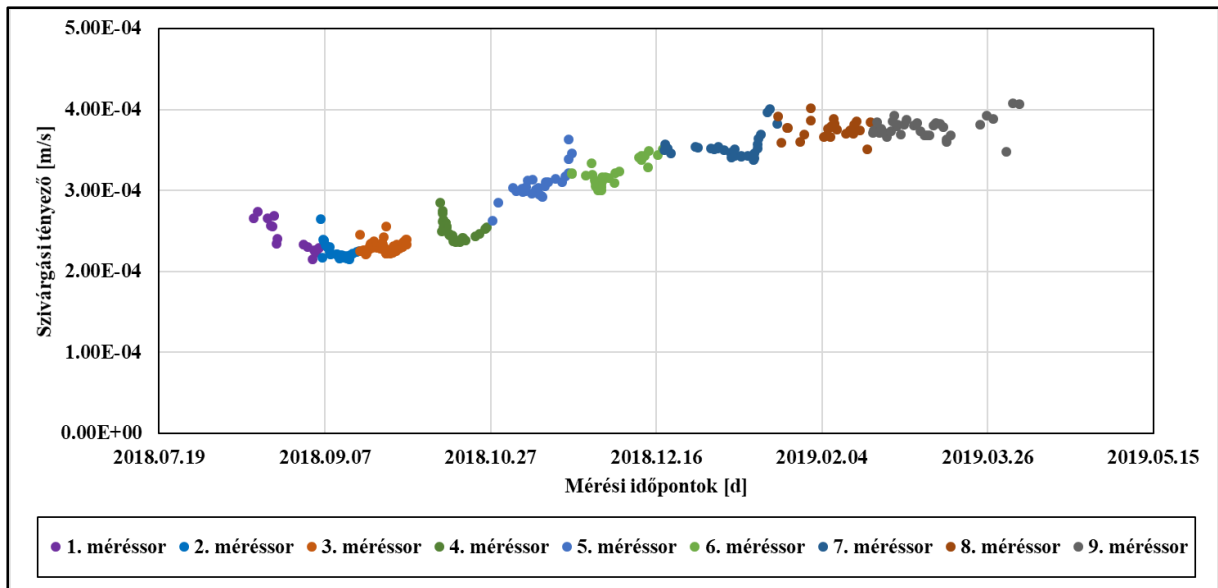
### 6.1. A SZIVÁRGÁSI TÉNYEZŐ VÁLTOZÁSA AZ IDŐ FÜGGVÉNYÉBEN

Méréseim kezdetekor már tisztában voltam vele, hogy a talajtelítés ellenére előfordulhatnak olyan körülmények, illetve paraméterek, amelyek a szivárgási tényező időbeli változását okozhatják.

Erre az időbeli változásra mutat rá Klotz az 1971-ben készült cikkében. Egy éves vizsgálati időszak alapján kimutatta, hogy a szivárgási tényező időben nem állandó, melyet a talajban maradó levegőfázissal magyarázott. Az általa vizsgált talajminta vízáteresztőképessége a kezdeti időszakban mértékhez képest az idő múlásával folyamatosan csökkent, majd 1,5 hónap után a szivárgási tényező állandósult. A kezdeti és az állandósult szakaszon mért áteresztőképességek közötti változás körülbelül 30% volt.

Öllös (1958) cikkében kiemeli, hogy kisminta kísérletei elvégzése során a modellbe engedett vizet vízhőmérséklet-szabályozó berendezésen keresztül juttatta be. Amennyiben a víz

hőmérséklete mindig meghaladta a környezeti léghőmérsékletet, úgy a vízben jelenlévő levegőfázis nem vált ki. Ennél fogva a talajminta szivárgási tényezőjét időben állandónak tekinthette.



1. ábra: Megfigyelőkútpárokra számított átlagos szivárgási tényező értékek változása az idő függvényében

A 2018 augusztusától tartó, a szivárgási tényező időbeli változását célzó méréseim idősorait az 1. ábrán tüntettem fel, két kúttípusnál mutatom be a folyamatot. Az ábrán látható, más-más színnel jelölt ponthalmazokkal a különböző perforációjú anyakutakkal mért adatsorokat ábrázoltam. Az 1-3. mérőssorok az 1,0 mm, a 4-9. adatsorok pedig a második beépített termelőkúttal végzett mérések, azaz a 2,5 mm perforációjú anyakúttal kapott eredményeket ábrázolják. Egy-egy mérőssor időtartama eltérő, ezek 2 hét és 2 hónap közötti intervallumon változtak. Az időtartam különböző hosszúsága nem befolyásolta az egyes adatok pontosságát, hisz minden mérést csak akkor tekintettem elfogadhatónak, ha adott időn belül két leolvasás alapján ugyanazon értékeket kaptam. Az egyes adatpontok így inkább pillanatnyi értékeket mutatnak, nem pedig egy időtartamra vonatkozó átlagértéket.

Az 1. ábrán a 10 darab megfigyelőkútból alkotott kútpárokkal számított szivárgási tényező átlagértékeket tüntettem fel a mérések pontos időpontjainak függvényében. A diagramon szereplő adatok egyenként 45 darab érték átlagát képezik, mely egyazon időpontban elvégzett méréshez tartoznak.

Az általam vizsgált kismintában előző TDK dolgozatomban már igazoltam, hogy a szivárgási tényező időben változó értékeket mutat az 1,0 és 2,5 mm perforációjú termelőkúttak esetében is



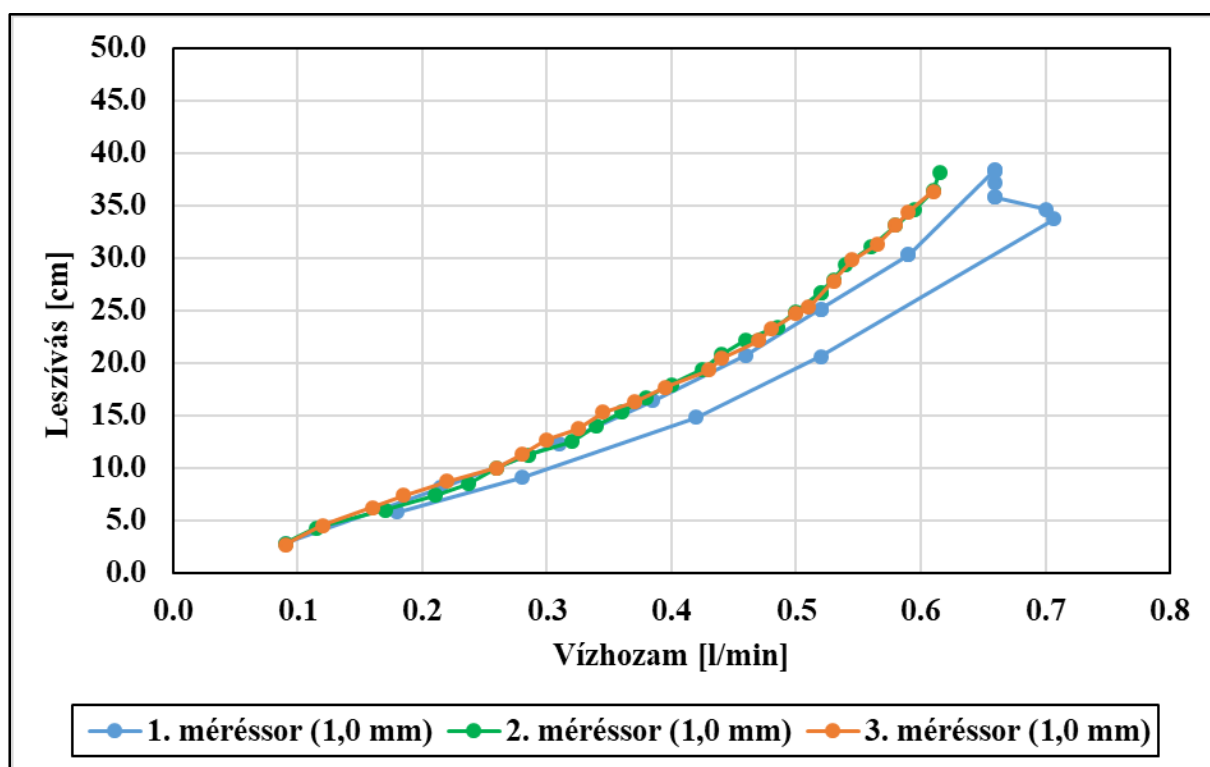
(Hegedűs 2018). A Klotz (1971) által kimutatott csökkenő tendencia az 1. és 2. mérőssor tekintetében is megfigyelhető (1. ábra). A mérések során főként az anyakút és a hozzá közeli megfigyelőkutak és piezométerek flexibilis csöveinek falán nagy mennyiségben felhalmozódott légbuborékokból következtettem arra, hogy a szivárgási tényező csökkenését a távozó légfázis okozhatta. A csökkenő szakasz után az állandósult szakaszra számított átlagos szivárgási tényező  $2,28 \cdot 10^{-4}$  m/s-ra adódott. Az 1-3. adatsorra számított időben átlagolt szivárgási tényező értéke  $2,31 \cdot 10^{-4}$  m/s.

A második termelőkúttal végzett mérések esetében megfigyelhető, hogy a 4. adatsor előtt a modellbe új termelőkutat építettem be. Az anyakút cseréje előtt a modelltérből teljesen le kellett engedni a vizet, majd az új kút beépítése után a talajréteget újfent telíteni kellett. Az új anyakút elhelyezésének folyamata a kút körül lokálisan a talajszerkezet megzavarásával járt. Az újbóli telítés, valamint a kútcseré hatásainak nyomait a 4. adatsor magán hordozza. A 4. adatsor kezdeti szakaszán hirtelen megnőtt a szivárgási tényező értéke körülbelül arra az értékre, mint amit az 1. adatsor elején kaptam. A csökkenő szakasz a 2,5 mm-es perforációjú kút esetén sokkal gyorsabban végbement, mint az 1,0 mm-es esetében. Ez a miatt következhetett be időben ilyen rövid idő alatt, mert a talajszemcsék átrendeződése csak a kúthoz közeli tartományban következett be, a modelltér nagy részén ez a folyamat már lezajlott és a kútcseré nem befolyásolta a kialakult talajszerkezetet. Látható, hogy a szivárgási tényező körülbelül 2 hónapig folyamatosan nőtt (5-6. mérőssorok), ez szintén a kút környezetében levő talaj átrendeződésével, valamint a finomszemcsék hosszútávon bekövetkező kimosódásával magyarázható – ez a hatás a nagyobb perforáció-méret miatt is lehet. Január közepétől a talaj átteresztőképességét közel állandónak lehet tekinteni, az adatpontok egy érték körül szórnak, nem mutatható ki jelentős trend az adatsorban. A már állandósult szakasz (8-9. mérőssorok) átlagos szivárgási tényező értéke  $3,81 \cdot 10^{-4}$  m/s.

Az adatsorokban helyenként megfigyelhető néhány kiugró érték, mint például az 5. vagy a 7. mérőssor végén. Ezek nagyon kis leszívásoknál kapott átlagos szivárgási tényező értékek, mely tartományra már Farkas et al. (2018) bizonyította numerikus modellezéssel, hogy a kisminta nem minden esetben ad megbízható eredményt. A 4-9. mérőssorokra számított időben átlagolt szivárgási tényező  $3,07 \cdot 10^{-4}$  m/s.

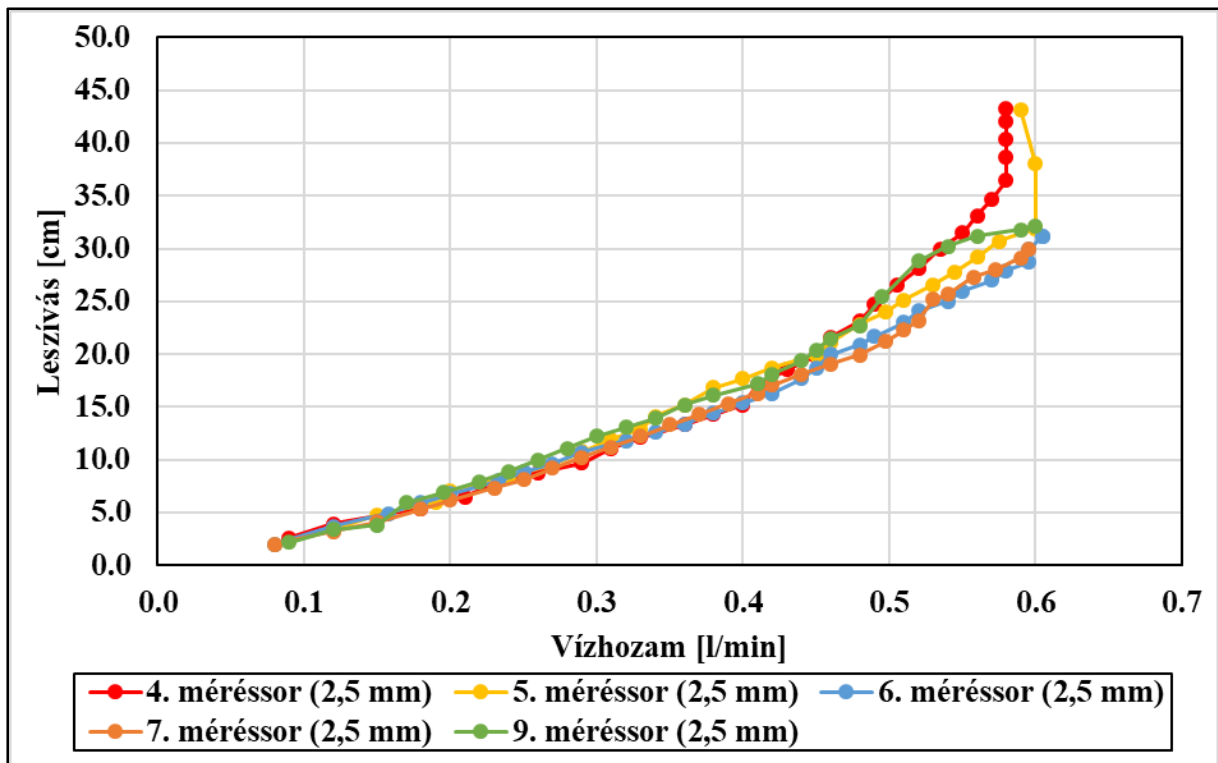
## 6.2. AZ ANYAKÚT TELJESÍTŐKÉPESSÉGE

Korábbi TDK dolgozatom keretén belül az 1,0 mm perforációjú termelőkút esetén bemutattam, hogy a Darcy-törvényben (2. fejezet) leírt, a vízhozam és leszívás értékek közötti lineáris kapcsolat nem teljesül az adatsorok teljes hosszára (2. ábra). Megállapítottam, hogy az 1. méréssornál kimért hurokgörbe utalhat a talajban lejátszódó szemcseátrendeződésre, valamint a nemlineáris áramlási körülmények kialakulására (7.6. fejezet), melynek körülményeit már a Darcy-törvény (2. fejezet) nem tudja pontosan leírni. Ezt követően kijelentettem, hogy a 2. és 3. méréssor eredményei jó egyezést mutatnak.



2. ábra: Leszívás és vízhozam kapcsolata az 1,0mm lyukátmérőjű kút 3 darab méréssora alapján

Az új adatok alapján a 2,5 mm perforációjú kút esetében a 4. és 5. méréssor esetében megfigyelhető, hogy a kútcseré itt is hatással volt a kút környezetében lévő talajmintára. A két adatssort összehasonlítva azt tapasztaltam, hogy az azonos leszívási értékekhez nem ugyanakkora vízhozamok tartoztak (hasonlóan az 1. méréssorhoz). Nagy valószínűséggel a zavart talajban a növekvő leszívás hatására átrendeződés következett be, így a fokozatosan növelt, majd csökkentett leszívás értékekhez tartozó leszívás-vízhozam görbék nem esnek egybe (3. ábra).

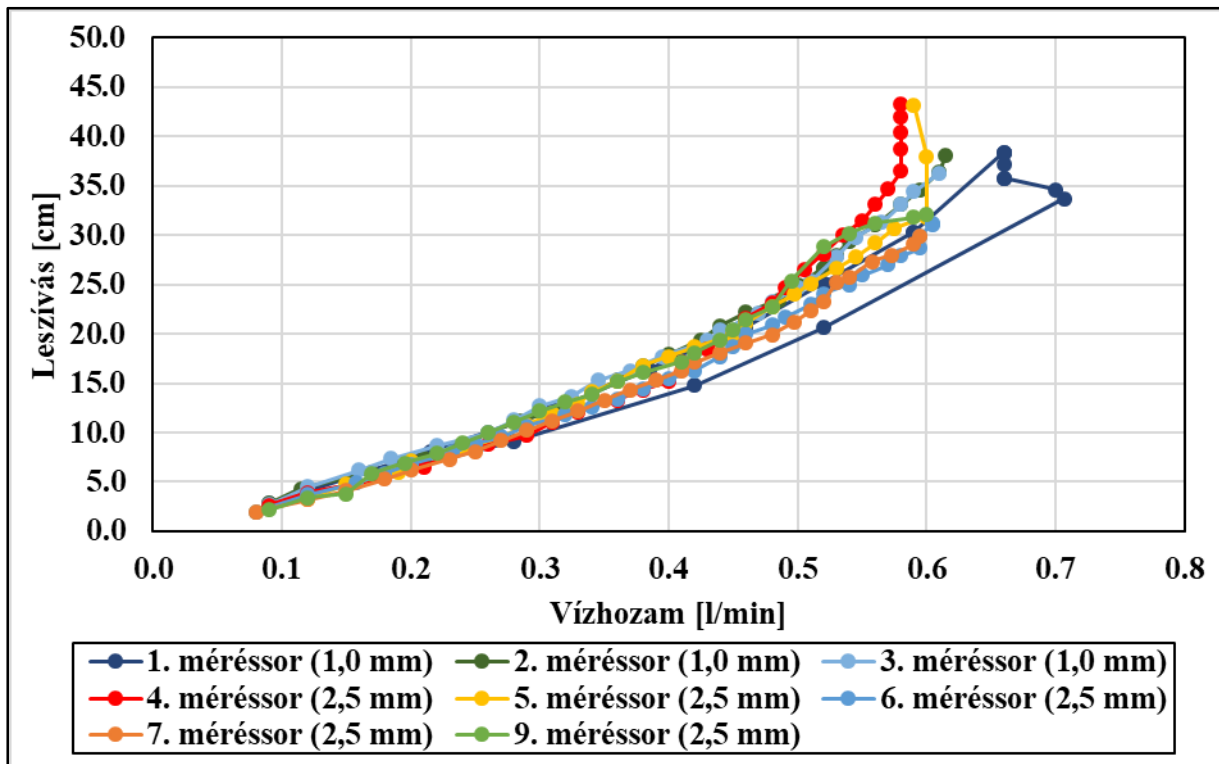


3. ábra: Leszívás és vízhozam kapcsolata a 2,5 mm lyukátmérőjű kút 5 darab mérőssora alapján

A talajviszonyok rendeződése, stabilizálódása után a 6. és a 7. mérőssor esetén egybevágó görbéket kaptam. Meredekségük jó egyezést mutat körülbelül a 0,4 l/min hozamértéig az 5. mérőssoréval.

A 8. mérőssort az eredményeim kiértékelésekor nem tudtam felhasználni, mert a Vízépítési- és Vízgazdálkodási Tanszék laboratóriumában a Vízmérnöki mérőgyakorlat órái folytak. Az emiatt megnövekedett vízigény a labor hálózatában nyomáscsökkenést okozott, illetve az ekkor a kismintába érkező víz lebegőanyagtartalma szemmel láthatóan jelentősen megemelkedett. A felső perem körbukójában a víz barnás-sárgás színűvé változott és szálas-szemcsés anyagok jelentek meg benne. A felső peremet, illetve a labor vízrendszerét összekötő cső több alkalommal is eldugult a megnövekedett szennyezőanyagtartalom miatt. Ekkor nem érkezett víz a modellbe, így az adott méréseket meg kellett ismételni. A víz minősége mellett a hőmérséklete is ugrásszerűen megváltozott a laborgyakorlatok során. Előfordult, hogy a felső és alsó perem között 5°C különbség is kialakult, mely az akkori vizsgálatokat használhatatlanná tette. A mérési nehézségek rányomták bélyegük az adatsor pontosságára, így a felsorolt indokok miatt nem is illeszkedett jól a többi adatsorra.

A 9. méréssornál a nagyobb leszívásoktól haladtam a kisebbek felé. Az adatsor eleje még a laborgyakorlatokkal párhuzamosan lett rögzítve, így a nagy leszívásoknál a mérőgyakorlat hatása körülbelül 23 cm-es leszívásig megmutatkozik. Ennél kisebb leszívások esetén a görbe felveszi a 6. és 7. méréssor meredekségét, azonban a vízhozam értékeikben még eltérés kisebb eltérések látszanak. Ez a vízhozambeli eltérés az 5 cm-es leszívástól mért adatok alapján nullára csökken.



4. ábra: Leszívás és vízhozam kapcsolata az 1,0 mm és a 2,5 mm lyukátmérőjű kutak 8 darab méréssora alapján

Az 4. ábrán az 1,0 mm és a 2,5 mm lyukátmérővel kialakított anyagutakkal végzett mérések leszívás és vízhozam adatpárjait ábrázoltam mind a 8 darab méréssor esetében. Általánosan elmondható, hogy az 2,5 mm-es anyagúthoz nagyobb leszívás értékek tartoznak ugyanazon hozamadatokhoz. Ez a különbség a kis hozamértékeknél még elenyésző, viszont a maximális leszívások esetében már eléri az 5 cm-es különbséget.

### 6.3. ANYAKUTAKNÁL KIALAKULÓ SZABAD SZIVÁRGÁSI FELÜLET

A szabad szivárgási felület létezése azt jelenti, hogy a leszívási görbe a kútpalástot a kútban lévő vízszintnél magasabban metszi. Így a kút közvetlen környezetében összetetté válnak a szivárgási folyamatok (Öllös 1970).

A  $H-h_b$  nyomáskülönbség a leszívási tölcser tartományában, a kavicszűrőben, a kút szűrőnyílásaiban és a kúton belüli nyomásvesztésekből tevődik össze. Tehát:

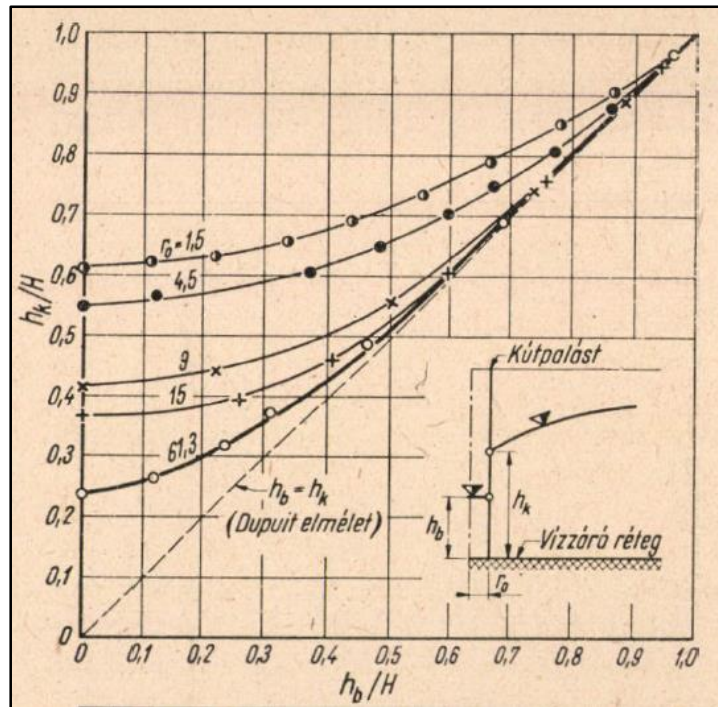
$$H - h_b = h_1 + h_l + h_r + h_k + h_{sz} + h_a \quad [12]$$

Ahol:

- $h_1$  a szabad vízfelszín teljes süllyedése,
- $h_l$  a lamináris tartományba eső veszteség,
- $h_r$  a szűrőréteg és a víztartó határán fellépő rétegellenállás,
- $h_k$  a kavicszűrőben fellépő veszteség,
- $h_{sz}$  a szűrőcsövön átáramló víz energiavesztesége,
- $h_a$  a kútpaláston belüli térben fellépő nyomásveszteség,
- $h_t$  a turbulens tartományba eső veszteség.

Természetesen az 12. egyenlet jobb oldala mindig az adott körülményhez igazodik. Jól érzékelteti, hogy a szivattyúzott rendszerben fellépő nyomásveszteség-komponensek hidraulikai szempontból egymástól meglehetősen eltérő mozgásfolyamat eredményeként lépnek fel. A különböző rétegekben, vízáadó réteg, kavicszűrőréteg, stb, más a vízmozgás jellege (Öllös 1970).

A saját kútpaláston kialakuló szakadásra irányuló vizsgálataimnál a 12. egyenlet  $h_{sz}$  tagját tudtam megmérni a kismintamodellben.

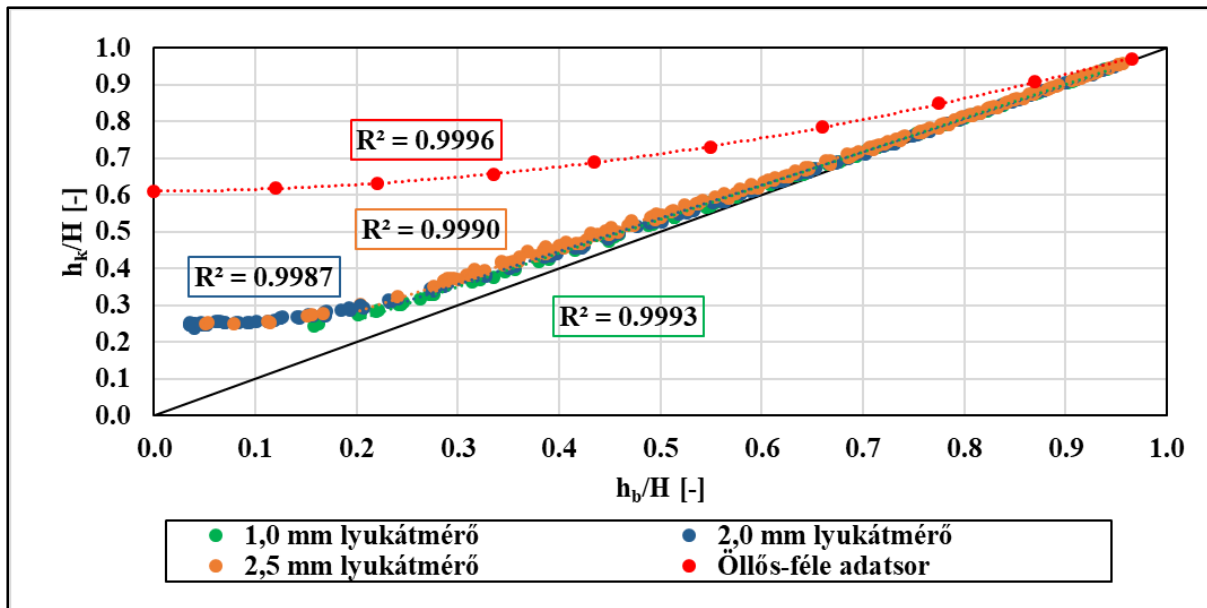


5. ábra: A kútpaláston belüli és kívüli vízszintek ( $h_b$ , illetve  $h_k$ ) egymástól való elszakadásának folyamata különböző sugarú ( $r_0$ ) kutak esetében (Öllös 1958)

Öllös (1958) a kútpaláston belüli és kívüli vízszint egymástól való elszakadásának folyamatát különböző sugarú kutak esetében vizsgálta kismintamodell segítségével. Mérési eredményeit a 5. ábrán láthatjuk. Az ábráról leolvasható, hogy a Dupuit-elméletet (3.1. fejezet) szemléltető egyenestől (mely esetben nincsen szakadás a kútpalást mentén) egyre nagyobb eltéréseket kapott, ha az anyakút sugarát csökkentette. Az általa vizsgált kutak porózus betonból készültek (lásd még Hegedűs 2018).

Az 6. ábrán a három különböző kútkialakítással mért eredményeimet ábrázoltam. Az egyes adatpárok az anyakút palástjának külső és belső felületein észlelt nyomásszintek, melyeket elosztottam a nyugalmi vízszinthez tartozó telített rétegvastagsággal ( $h_b/H$ ,  $h_k/H$ ). A három görbe mellett feltüntettem egy Öllös (1958) által meghatározott adatsort, mely szintén kismintamodell alkalmazásával készült 1,5 cm belső átmérőjű porózus beton anyakútra. Ezek mellett ábrázoltam a Dupuit-elmélet szerinti egyenest is, mely szerint a kútpaláston kialakuló szakadás nem alakul ki, így  $h_b = h_k$ . Az ábrán az „1,0” értékhez közelebb a kisebb leszívásokhoz tartozó mérések helyezkednek el. A „0” érték a maximális leszívást jelenti, tehát ilyenkor a kút talpszintjéig csökken az anyakútban mért vízszint.

Korábbi TDK dolgozatomban bebizonyítottam, hogy az Öllős (1958) által kimutatott kütellenállás a PVC anyagból készült 1,7 cm belső átmérőjű termelőkút esetén is kialakul, valamint hogy milyen eltérések adódnak az elméleti összefüggéshez képest.



6. ábra: A három különböző lyukmérettel kialakított anyakút palástján belüli és kívüli vízszintek ( $h_b$ , illetve  $h_k$ ) egymástól való elszakadásának folyamata

Elsőként az 1,0 mm perforációjú kút, majd a 2,5 mm lyukkialakításút és végül a 2,0 mm-es építtem be a modellbe. Az első két kút kiértékelése után, arra számítottam, hogy a 2,0 mm-es perforációval ellátott kút a másik két kút adatai alapján előállított görbék közé esik.  $h_b/H = 1$ -től egészen 0,25-ig a várt eredményeim beigazolódtak. Ettől kisebb értékek esetén azt tapasztaltam, hogy nagyobb leszívásnál a két nagyobb lyukátmérőjű kút görbéje egybesimul, illetve a  $h_b/H = 0,10$ -nél kisebb értékeknél a  $h_k/H$  hányadosok közel konstanssá válnak. Tehát ezen a konstansnak tekinthető szakaszon a leszívás növelésével a kútpaláston belüli értékek folyamatosan csökkentek, viszont a paláston kívüli értékek szinte változatlanok maradtak. A kezdeti mérési körülmények miatt az 1,0 mm lyukátmérővel jellemezhető kút esetében nem volt lehetőségem nagyobb leszívások regisztrálására, így a lineáris szakasztól való eltérést nem tudtam kimutatni. Viszont feltételezhető, hogy a másik két kútnál kialakuló görbült, majd közel konstanssá alakuló szakasz itt is megfigyelhető lett volna.

Az 6. ábrán jól látható, hogy a Dupuit-elmélet egyeneséhez képest az eltérés a kisebb leszívások tartományában csekély, azonban a leszívás növelésével ez az eltérés is növekszik. Az általam vizsgálat három kút esetében az eltérés körülbelül  $h_b/H = 0,75-1,0$  közötti értékek között 1% alatt

maradt. Ezt követően kezd el a három adatsor eltávolodni az elméleti egyenestől. Az 5%-ot meghaladó eltérés az 1,0 mm lyukátmérőjű kút esetén körülbelül  $h_b/H=0,30$ -nál, a 2,0 mm lyukátmérőjűnél  $h_b/H=0,35$ -nél és a 2,5 mm lyukátmérőjűnél  $h_b/H=0,40$ -nél kisebb értékeknél jelentkezik. 0,15-ös  $h_b/H$  aránynál a 2,0 és 2,5 mm-es görbe nagyobb mértékben eltávolodik az elméleti egyenestől. Mindhárom adatsor körülbelül  $h_b/H=0,20$ -as értékig lineárisnak tekinthető, ezt a rájuk illesztett trendvonalak determinációs együtthatójának közel 1,0-et elérő értéke is bizonyítja.

Az itt bemutatott eredmények alapján az 6. ábráról jól látszik, hogy a kismintán végzett méréseimmel kimutathatóvá vált, hogy az egyes anyagutak különböző átmérőjű perforációja hatással van a kúpaláston kialakuló szakadás mértékére. A szakadás %-os értéke nem jelentős mértékű, de kimutatható.

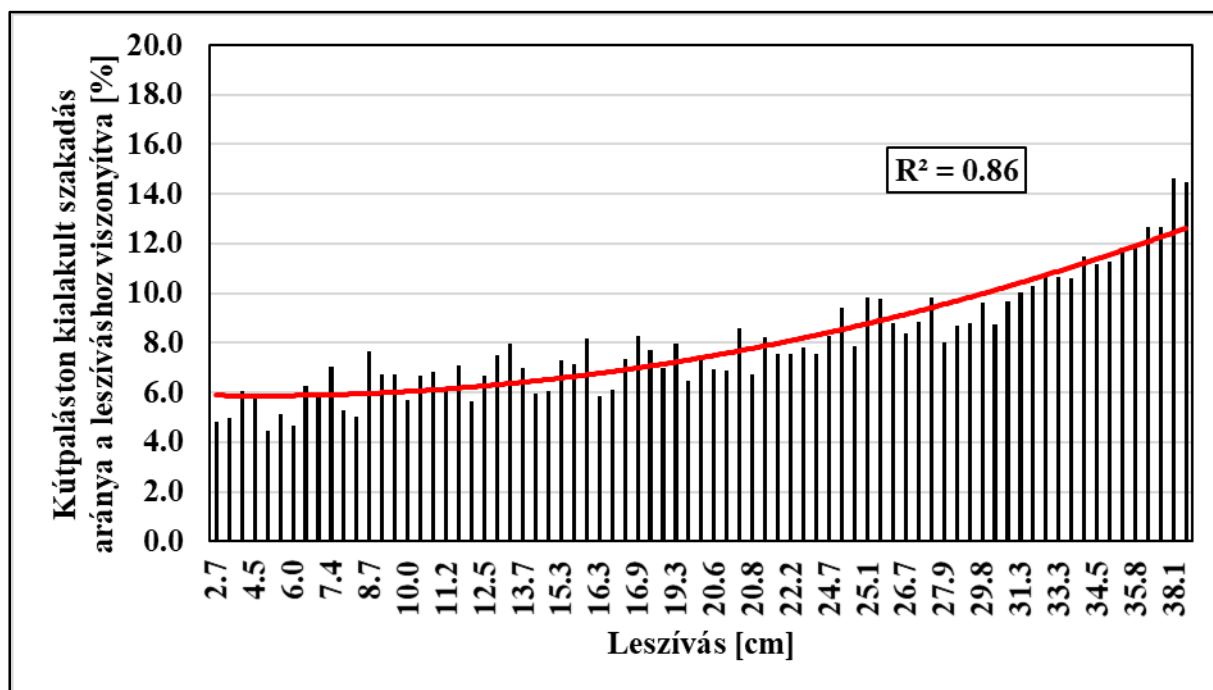
Az Öllős-féle adatsorról elmondható, hogy az elméleti görbére már a kezdeti szakasz elején sem simul rá. A két függvény közötti eltérés folyamatosan nő. Itt is megfigyelhető, hogy nagyobb leszívások esetében a kút belsejében mért nyomásszintek csökkenését nem követte a kútpaláston kívüli szint. Az adatsort másodfokú polinommal közelítve nagyfokú egyezést lehetett elérni. Az Öllős és általam regisztrált adatsorok közötti különbség főként a kútkialakítással magyarázható. Esetemben egy nem áteresztő PVC kúttesten kialakított lyukakon keresztül jutott be a víz a termelőkútba, míg Öllős vizsgálataiban során porózus betont használt, mely a teljes felületén közel egyenlő áteresztőképességgel rendelkezik. Minimális eltérés a kutak belső sugarai közötti eltérésből is adódhatott. A mérések alapján megerősítést nyert az a korábbi megállapítás, hogy a perforált PVC anyagút közelében kisebb volt a kútpaláston kialakuló szakadás értéke, mint a porózus beton anyagú esetben, tehát kisebb veszteséggel működtethetők ezek a kutak (Hegedűs 2018).



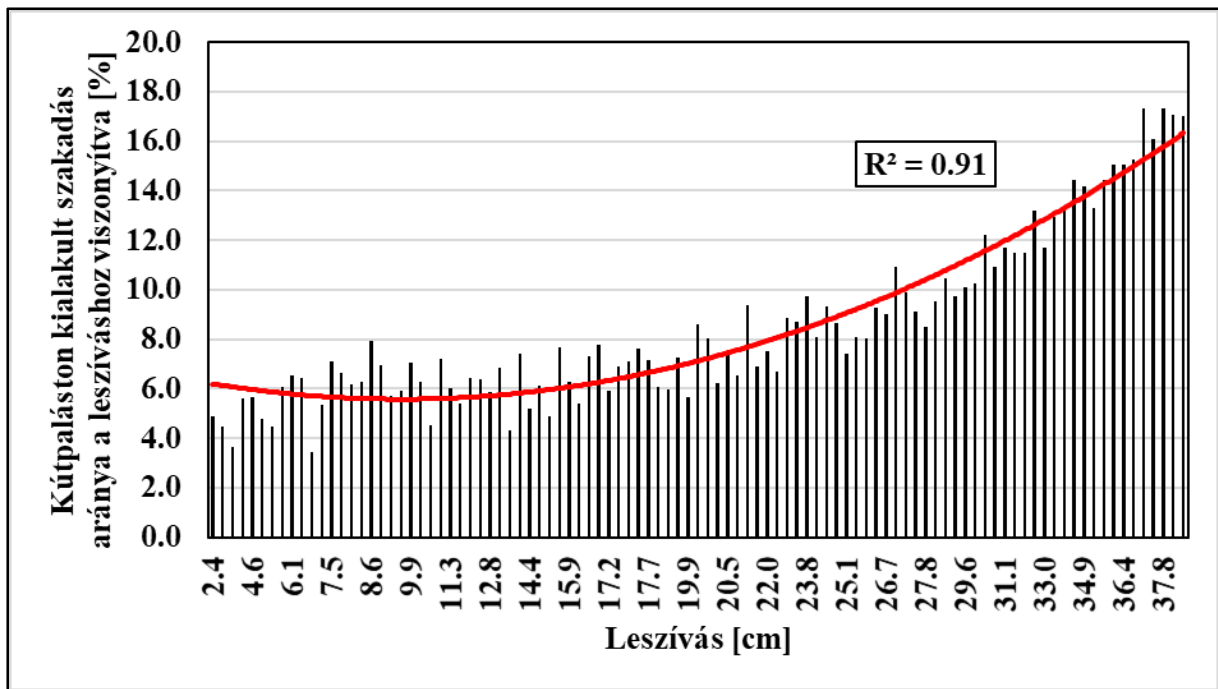
#### 6.4. A SZABAD SZIVÁRGÁSI FELÜLET ÉS LESZÍVÁS KAPCSOLATA

Ebben a fejezetben részletesen kifejtem, hogy méréseimből rá tudtam mutatni arra, hogy a kútellenállás mekkora részét képezi a teljes leszívásnak. 2018-ban készült TDK dolgozatomban bemutattam, hogy mivel a kismintában lévő víz hőmérsékletét nem tudtam szabályozni, - mint ahogy azt tette Öllös (1958) és Klotz (1971) vizsgálataiban – ezért a kútpaláston kialakuló szakadás és leszívás kapcsolatának vizsgálatánál ezt figyelembe kellett vennem, főként, hogy Székely (2011) modellezési szempontból hívja fel a figyelmet a kútellenállás, mint nyomásvesztés jelentős hőmérsékletfüggésére.

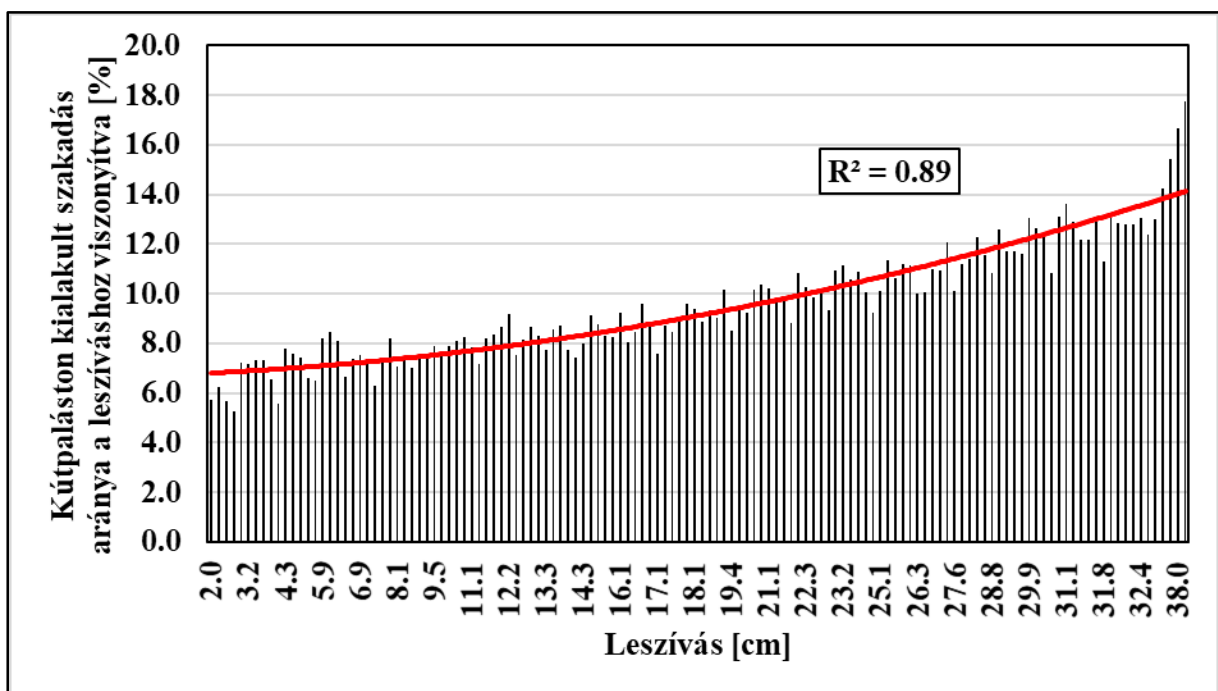
Minden mérés elvégzésekor feljegyeztem a peremeken uralkodó vízhőmérsékleteket, így a bekövetkező hőmérsékletváltozások nyomon követhetők. Annak érdekében, hogy a hőmérséklet okozta hibaforrást kiküszöböljem, figyelembe vettem a különböző értékekhez tartozó viszkozitásbeli eltéréseket. Ehhez egy adott hőmérsékletre transzformáltam, normáltam az adatsort. 10 °C-ot választottam megfelelő hőmérsékletnek, mert ez egy általánosan elfogadható átlagérték a talajvíz szempontjából (Hegedűs 2018).



7. ábra: 1,0 mm lyukátmérő anyakút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C-ra átszámított értékek)



8. ábra: 2,0 mm lyukátmérő anyagút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C-ra átszámított értékek)



9. ábra: 2,5 mm lyukátmérő anyagút palástján kialakuló veszteség aránya a leszívás értékeihez viszonyítva (10 °C-ra átszámított értékek)

Az 7-9. ábrákon az 1,0 mm, 2,0 mm és a 2,5 mm lyukátmérőjű kutak a kútpaláston kialakult szakadás leszíváshoz viszonyított százalékos arányát jelenítettem meg a leszívás függvényében 10 °C-ra normálva. Látható, hogy az egyes leszívásokhoz %-os arányban mekkora részt jelent

a kútpaláston létrejövő szakadás a teljes leszíváshoz viszonyítva. Az értékekre polinomiális trendvonalat illeszttem, mely adatsoronként különböző %-okban mutatott egyezést.

Ahogy azt már az 6.3. fejezetben említettem az az 1,0 mm lyukátmérőjű kúttal mérés technikai okokból nem tudtam olyan nagy tartományú leszívásokat vizsgálni, ahogy a másik két kút esetében. Annak érdekében, hogy az 7-9. ábrákon megjelenített leszívás értékeket azonos tartományokon belül tudjam bemutatni a diagramok maximumát úgy válaszottam meg, hogy minél közelebb essenek az 1,0 mm-es kútnál mért legnagyobb leszívás értékéhez (38,4 cm). A 2,0 mm-es perforációjú kút esetén ez 38,0 cm, a 2,5 mm-es lyukátmérőjűnél 38,6 cm-es leszívás értéket jelentett. Mindhárom ábra esetén látható, hogy az adatsorban előfordulnak a kiugró értékek, melyek az egyes mérések vagy leolvasások pontatlanságából és a kút közelében kialakuló időfüggő folyamatokból is következhet, melyet már említettem a 6.1. fejezetben.

Az ábrákról leolvasható, hogy a körülbelül 38 cm-es leszíváshoz az egyes kútkialakítások esetében eltérő a kútpaláston kialakuló szakadás %-os aránya. Az 1,0 mm-es kút esetében a maximális leszíváshoz 15 %-os, a 2,0 mm-es kút esetében 17%-os és a 2,5 mm-esnél 18%-os érték adódik. A 6. ábrán bemutattam, hogy a kútpaláston belül és kívül kialakuló vízszintek közötti különbség a perforációt alkotó lyukak átmérőjével nő. Várható eredmény volt, hogy a maximális leszíváshoz tartozó százalékos értékeket is nőni fognak a lyukátmérők függvényében.

Az 7. ábrán látható, hogy az 1,0 mm-es termelőkút esetében az illesztett polinom, 77 darab adat alapján, 86%-os egyezést mutat. A 2,0 mm perforációjú szivattyúzott kút esetén 99 darab adatot vizsgáltam, az illeszkedés 91%-os, ezt ábrázoltam az 8. ábrán. A harmadik kút esetében 132 darab adat esetén az illesztett polinomiális trendvonallal 89%-os egyezést kaptam (9. ábra). A 2,5 mm lyukátmérőjű termelőkút esetén gyengébb az illeszkedés, mint a 2,0 mm-es esetén, hisz kevesebb volt az olyan adat, ami a nagy leszívások tartományába esik. A gyengébb illeszkedés magyarázható az eltérő adatmennyiséggel is, hisz több adat esetén általában nagyobb szórás következik be.

A három ábra között alaki eltérés figyelhető meg az illesztett trendvonalak kezdeti szakaszán. Az 1,0 mm perforációval ellátott anyakút esetén a polinomiális trendvonal kezdeti érintője nullának tekinthető, a 2,0 mm-es termelőkút adataira illesztett trendvonal negatív érintővel, míg a 2,5 mm kút esetén a trendvonal pozitív érintővel indul. Már korábban numerikus modellel kimutatták, hogy kis leszívásoknál (5 cm-nél kisebb) a modell a leszívás és vízhozam értékeket tekintve nem ad teljesen megbízható eredményeket. Ennek magyarázata lehet, hogy a kis

leszívások esetén a piezométerek pontosságából fakadó kisebb hibák fajlagosan nagyobbak számítanak, mint nagyobb leszívások esetén (Farkas et al 2018). Tehát a 7-9. ábrákon a kis leszívásokhoz tartozó eltérő szakaszokat ez a jelenség terhelheti.

### 6.5. MODELLTÉR ÁRAMLÁSI VISZONYAINAK ELLENŐRZÉSE

A 2. fejezetben bemutattam, hogy a lamináris, átmeneti és turbulens tartományok határait milyen ajánlásokat adnak szakirodalmi források. Látható volt, hogy főként a turbulens és átmeneti tartomány határa széles skálán mozgott.

Mérési eredményeim alapján számításokkal ellenőriztem, hogy a kisminta modellben a lamináristól eltérő áramlási viszonyok kialakulhattak-e. Ehhez szükségem volt egy összefüggésre, mely alkalmas a Reynolds-szám meghatározására szivárgó vízmozgás esetén. Ehhez a 13. egyenletet használtam, mivel az általam vizsgált talajminta  $d_{50}=0,38$  mm értékkel rendelkezik, ezért megfelel a feltételeknek (3. táblázat).

$$Re = \frac{v \cdot d_{50}}{\nu} \quad [13]$$

Ahol:

- $Re$  - Reynolds-szám [-],
- $v$  - áramlási sebesség [m/s],
- $d_{50}$  - mértékadó szemcseátmérő [m],
- $\nu$  - kinematikai viszkozitás [m<sup>2</sup>/s].

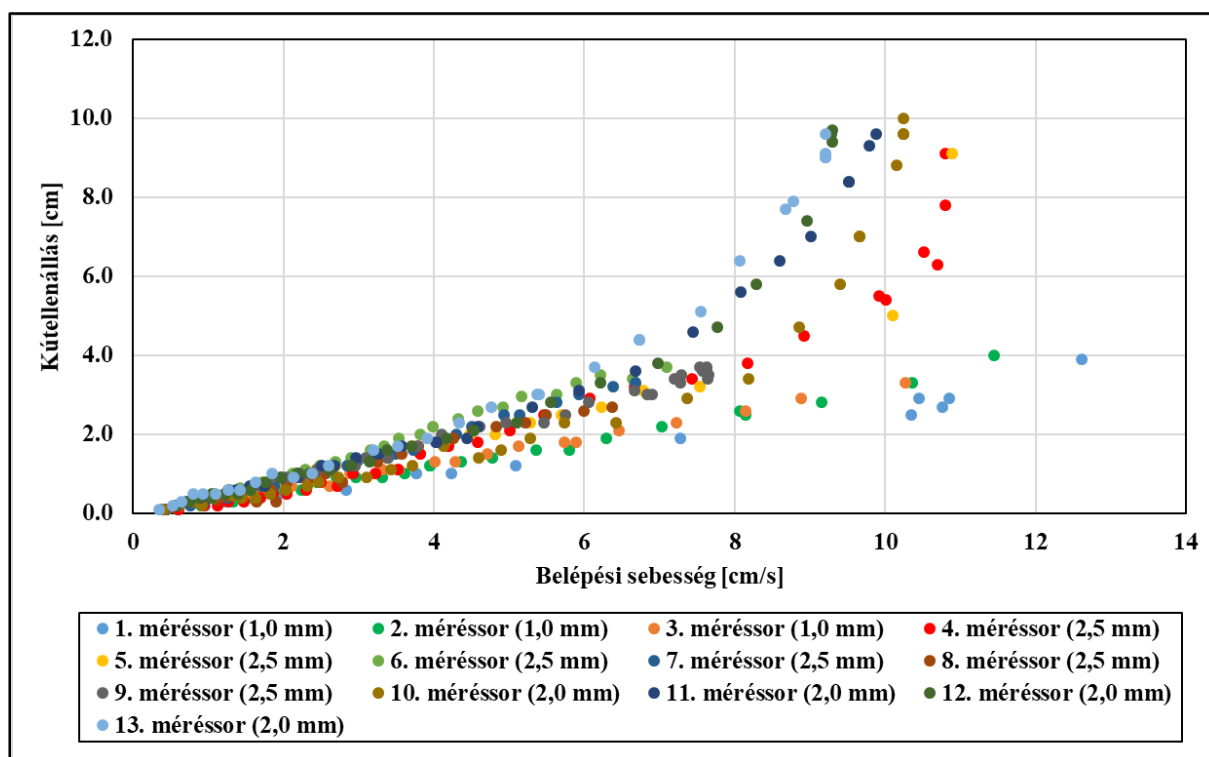
Az egyenlet nevezőjében szereplő kinematikai viszkozitás értékét az aktuális méréshez tartozó vízhőmérséklet adatok alapján vettem figyelembe. Az áramlási sebességet a modelltér egy adott pontjában a kitermelt hozam és az áramlási felület hányadosaként kaptam. Mivel az áramlás a modellben hengersizmetrikus, így egy adott ponthoz tartozó áramlási felület is egy hengerfelület. A hengerfelület sugara a vizsgált pont és az anyakút tengelyétől vett távolsággal lesz egyenlő, magassága az ott uralkodó nyomásszintnek felel meg. Abból következően, hogy a kismintamodellel negyedhenger alakú, a kialakuló hengerfelületek is hozzá hasonlóak lettek.

3. táblázat: A 13. egyenlet alkalmazhatóságához ajánlott tartományok

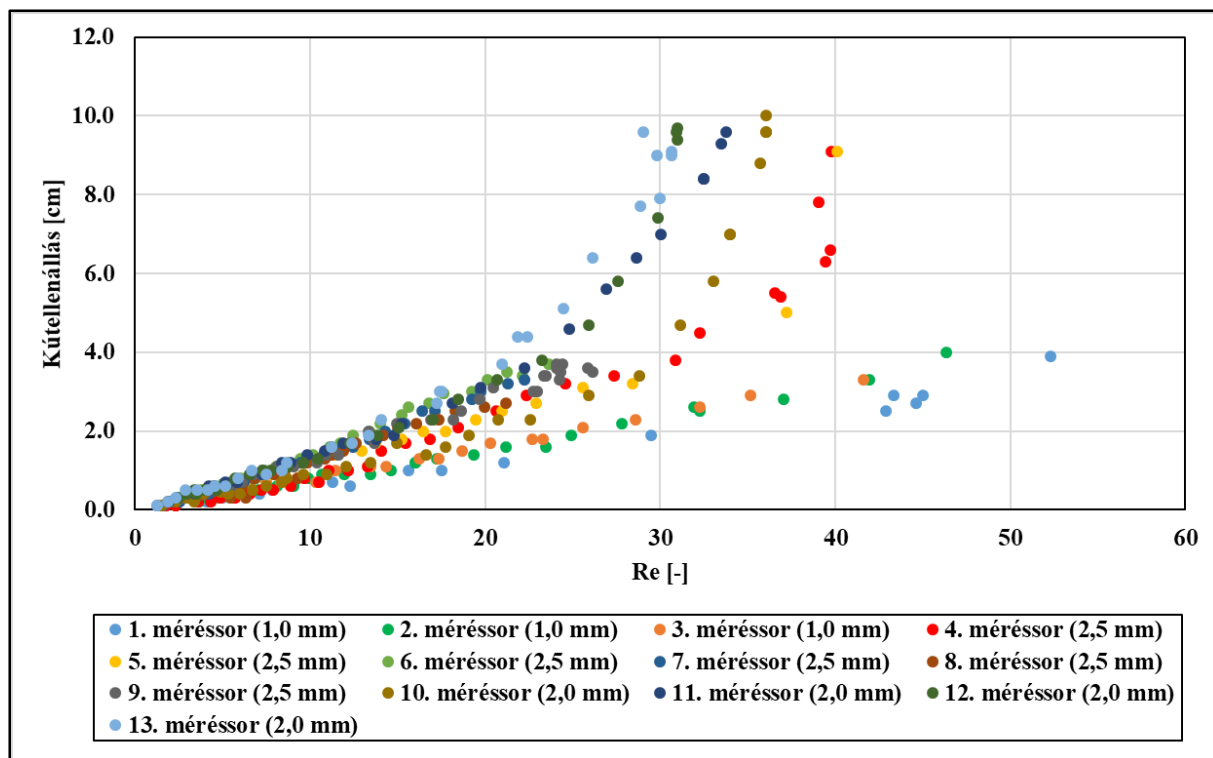
| Szerző(k)            | Re [-] | Szemcseátmérő [mm] |
|----------------------|--------|--------------------|
| NAGY & KARADI (1961) | 5      | 0,15 – 12          |
| WILLIAMS (1985)      | 30     | 0,15 – 5,43        |

A 13. egyenlettel kapcsolatban az egyes szerzők eltérő érvényességi határokat adtak meg (1. táblázat) (Hegedűs 2018).

A következő 10-11. ábrákon a termelőkút körül kialakuló körülmények bemutatására a kútellenállás adatsorokat a belépési sebesség (10. ábra) és a Reynolds-szám (11. ábra) függvényében ábrázoltam. Mivel a belépési sebesség és a Reynolds-szám nem függetlenek egymástól, így a két ábrán szereplő görbék lefutása nagyon hasonló. A diagramokon 341 mérés került ábrázolásra, melyek összesen 13 méréssorra vannak osztva. Az 1,0 mm-es kút esetén 3 darab, a 2,0 mm-es kúttal 4 darab és a 2,5 mm-es perforációjú kúttal 6 darab méréssor készült el.



10. ábra: A különböző anyagutak esetében mért belépési sebesség és kútellenállás kapcsolata



11. ábra: A különböző anyagutak esetén mért Re szám és kútellenállás kapcsolata

Mindkét ábrán látható egy közel lineáris szakasz, mely az összes adatsor esetén közel azonos meredekséggel jellemezhető. Az 10. ábrán ez a lineáris szakasz körülbelül 3 cm/s belépési sebességig, a 11. ábrán megközelítőleg  $Re=10$  értékig tart. A 3 cm/s (10.ábra) belépési sebesség, valamint  $Re=10$  (11.ábra) értékeket követően egyértelműen kijelenthető, hogy a kútellenállás és az ábrázolt paraméterek közötti kapcsolat nem lineárisá vált, az egyes mérőssorok egymáshoz képest eltávolodnak. A differenciálódás már 6 cm/s-os belépési sebességnél (10. ábra) és körülbelül  $Re=20$  (11. ábra) értéktől egyértelműen azonosítható, viszont az eltávolodás 7 cm/s belépési sebesség és  $Re=25$  érték felett válik kifejezetten nagy mértékűvé. A 2. fejezetben bemutatott 1. táblázatban láthattuk, hogy az egyes szerzők különböző  $Re$  számokat adtak meg az áramlást jellemző különböző tartományokra. A Bear (1972) és Williams (1985) által megadott határértékek alapján az 11. ábrán látható  $Re=10$ -ig tartó lineáris szakasz nevezhető lamináris tartománynak. Ezen érték felett az áramlási viszonyok az átmeneti tartományba esnek. Williams (1985) az átmeneti tartományt 15-50 értékek között állapította meg, átlagértékét körülbelül 30-nak tekintette. Az 11. ábrán bemutatott  $Re=25$ -ös értékhez tartozó jelentősebb görbealaki változások miatt elképzelhető, hogy ez az érték egy átmeneti és turbulens határt képez, viszont ez teljes bizonyossággal nem jelenthető ki.

A görbék alakjáról leolvasható, hogy a 2,0 mm és a 2,5 mm lyukátmérőjű kutak esetében az tapasztalható, hogy a kútellenállás 7 cm-es értéket meghaladva folyamatosan nő annak ellenére, hogy a belépési sebességek (9-10 cm/s) és a Reynolds-számok (30-40) közel konstanssá váltak. Ilyen jelenség az 1,0 mm-es kút esetében nem történt kimérésre, az adatsorok közel végig lineárisnak tekinthetők. Viszont ahogy már említettem ezen anyagút esetében kisebb volt a vizsgálható leszívási tartomány (6.4. fejezet).

**4. táblázat: Optimális belépési sebességek a környező talaj szivárgási tényezőjének függvényében**

| Szivárgási tényező [m/s] | Optimális belépési sebesség [cm/s] |
|--------------------------|------------------------------------|
| >2,89E-03                | 6,2                                |
| 2,89E-03                 | 5,7                                |
| 2,31E-03                 | 5,0                                |
| 1,85E-03                 | 4,5                                |
| 1,39E-03                 | 4,0                                |
| 1,16E-03                 | 3,5                                |
| 9,26E-04                 | 3,0                                |
| 6,94E-04                 | 2,5                                |
| 4,63E-04                 | 2,0                                |
| 2,31E-04                 | 1,5                                |
| <2,31E-04                | 1,0                                |

A 4. táblázatban különböző szivárgási tényezőjű értékekhez tartozó ajánlott belépési sebességek tartoznak (Todd és Mays 2005, Walton 1962). Az ajánlott belépési sebességek olyan határértékeknek tekinthetők, amik alatt nem következnek be a talajszemcsék kimosódása, a talaj szerkezete stabil marad. Emellett kúttervezésnél az ajánlott belépési sebességet úgy szokták megállapítani, hogy az lehetőleg minél kisebb súrlódási veszteséget eredményezzen a szűrőcső esetében. Az 6.1. fejezetben bemutatott 1. ábra, mely a vizsgált időszak alatt bekövetkező időbeli változását szemlélteti a modellbeli szivárgási tényező értékeknek. Az 1. ábráról leolvasható, hogy a szivárgási tényező mindenkor minimum értéke  $2,15 \cdot 10^{-4}$  m/s, míg maximuma  $4,08 \cdot 10^{-4}$  m/s volt. A 3. táblázat 9. és 10. adatokat tartalmazó sorát emelném ki, melyek értékeivel jól közelíthetők ( $2,31 \cdot 10^{-4}$  m/s és  $4,63 \cdot 10^{-4}$  m/s) az általam mért szivárgási tényező szélső értékek. Ezekhez a szivárgási tényező értékekhez 1,5 és 2,0 cm/s ajánlott belépési sebesség értékek tartoznak. Az 11. ábra alapján megállapított  $Re=10$ -ig tartó lamináris áramlási tartomány határához az 10. ábrán 3 cm/s-os érték társul. A modellben mért szivárgási tényezőkhöz rendelhető ajánlott belépési sebességek maximális értéke 2 cm/s, mely alapján arra következtethetünk, hogy a mérésorok kezdeti, lineáris szakaszán valóban lamináris maradhatott az áramlás. A 3 cm/s feletti belépési sebességek már jóval meghaladják az ajánlott

értéket, így itt nagyobb eséllyel léphetett át az áramlás az átmeneti tartományba, veszélyeztetve így a talajszerkezet stabilitását, és egyre növekvő veszteségeket okozva.

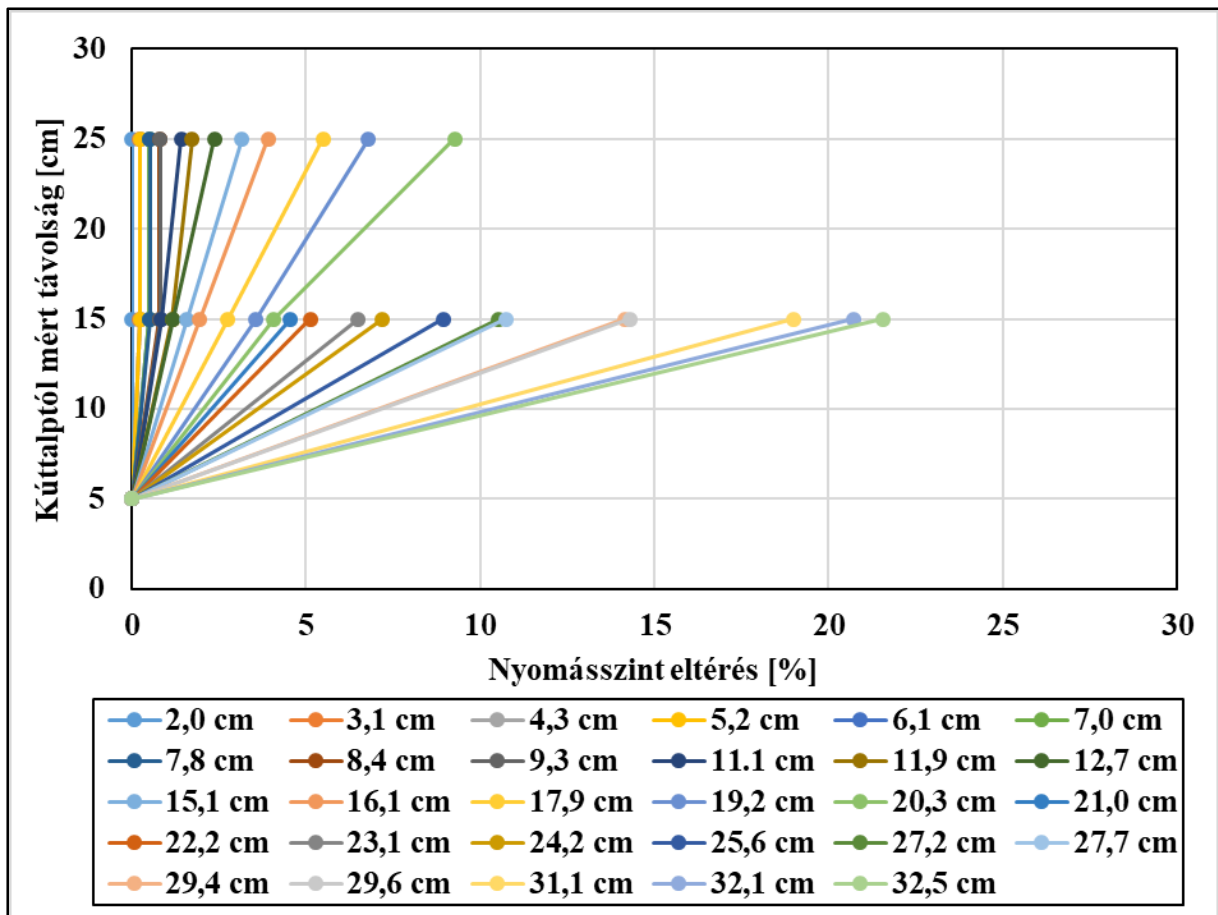
Összességében az 10. és 11. ábrák alapján és a 1. és 3. táblázatok alapján megállapítható egy  $Re=10$  értékkel rendelkező lamináris áramlási határérték, mely felett az áramlás már az átmeneti tartományba tartozik. Emellett az 1. táblázat és az 11. ábra arra enged következtetni, hogy körülbelül a  $Re=25$  érték is képezhet egy áramlási állapotra vonatkozó határt, mégpedig az átmeneti és a turbulens tartomány között, viszont ennek kimutatása további vizsgálatokat igényel.

## **6.6. KÚTPALÁST MENTÉN KIALAKULÓ NYOMÁSSZINTKÜLÖNBSÉGEK**

Méréseim során mindhárom anyakút esetében 50 cm vastagságú talajréteget vizsgáltam. A kutak teljes hosszukban szűrőzöttek voltak. A termelőkutak külső palástján három különböző magasságban piezométerek segítségével mértem a kialakuló nyomásszinteket. A három mérési pont az anyakutak talpsíkjától 5, 15, és 25 cm-re helyezkedtek el. A több pontban regisztrált nyomásszintek segítségével következtethetünk arra, hogy a kút hossza mentén milyen sebességkülönbségek alakulhatnak ki.

Az 12. ábrán a 2,5 mm-es lyukátmérővel kialakított kút 8. méréssorához tartozó nyomásszinteket ábrázoltam. Az ábra függőleges tengelyén a kúttalptól mért távolságot tüntettem fel, így itt csak az 5, 15, és 25 cm-en szerepelnek majd értékek. A vízszintes tengelyen a három mérési pont között kialakult nyomásszintkülönbségeket ábrázoltam. Az egyes adatsorok egy adott leszívás értékhez tartozó 3 nyomásszint értékből áll. Minden adatsor esetében a legalsó, 5 cm-en mért értéket vettem alapul, így ehhez a magassághoz minden esetben 0% értéket társítottam. Ezt azért tehettem meg, mert a legalsó pontban mért érték minden esetben kisebb vagy egyenlő volt a másik két nyomásértékhez képest. A 15 és 25 cm-en megjelenített értékek tehát egyaránt az 5 cm-en mért nyomásszinthez viszonyított eltérésüket adják meg százalékos értelemben.





12. ábra: 2,5 mm-es perforációjú kút mentén kialakult nyomásszint eltérések

Az 12. ábra alapján látható, hogy a legkisebb, 2,0 cm-es leszívás esetén a 3 pontban mért nyomásszintek különbségei 0-t adtak, tehát mindhárom magasságban ugyanakkora nyomás értékeket kaptam. Ezt követően a leszívás növekedésével a 15 és 25 cm-en mért nyomásszintek azonos ütemben nőttek az 5cm-en észleltekhöz képest. A 15 és 25 cm-es értékek együtt mozgása egészen a 3,1 és 9,3 cm-es leszívások között jelentkezik. Ezen felül a három nyomásszint értéke minden adatsor során eltér. A 11,1 és 11,9 cm-es leszívások diagramjáról leolvasható, hogy az 5 és 15 cm pontjai közé húzott egyenes érintője meredekebb, mint a 15 és 25 cm között lévő, tehát törés van a függvényben. A 12,7 és 17,9 cm-es leszívások között a három pontra húzott vonal mindkét szakasza ugyanolyan meredekséggel bír, nincs benne töréspont. A 19,2 és 20,3 cm értékű leszívások esetén a függvény kezdeti meredeksége kisebb, mint a második szakaszon. A 21,0 cm-t és azt meghaladó leszívások esetén a 25 cm-en lévő piezométer már nem adott megbízható eredményt, illetve szárazra került, így csak kettő darab adat állt innentől rendelkezésemre. Az adatsorok alapján kijelenthető, hogy a leszívás növelésével minden esetben nőtt az 5 és a 15 cm-en mért nyomásszintek közötti különbség.

Az adatsorok alapján láthattuk, hogy a legkisebb nyomásérték mindig a legalsó, a kúttalphoz legközelebb eső pontnál alakult ki. Ennek oka, hogy a vízkivételt végző szívócső a kút alsó síkjáig van lehajtva, így lokálisan ott alakulhatnak ki a legnagyobb sebességek. A kútpaláston kimért nyomásszintkülönbségek alapján megállapíthatjuk, hogy a leszívás növelésével a kút körül az ekvipotenciális vonalak erősen görbülnek. Az áramlás így a nagyobb leszívások esetén nem tisztán vízszintes irányú, megjelenik a függőleges komponens is.

### **6.7. VALÓS MÉRETRE VALÓ ÁTSZÁMÍTÁS**

A kismintamodellben mért eredmények átszámításához a Mosonyi-Kovács modell törvény arányszámait használtam. A modell törvény értelmében a kisminta és a valós méret közötti hasonlóság ott érvényes, ahol a szivárgás lamináris, tehát érvényes a Darcy-törvény (2. fejezet). A 6.5. fejezetben bemutattam, hogy a lamináris tartományt  $Re=10$ -es határértékig lehet tekinteni. Az ekkor kapott modellbeli és a valós méretekre átszámolt eredményeket az 5. táblázatban szemléltetem az 1,0 mm-es perforációjú anyagút esetén.

A valós méretekre átszámított eredményeim az 5. táblázatban láthatóak.

5. táblázat: Valós méretre való átszámítás 1,0 mm lyukátmérőjű kút esetén lamináris esetben

| Modellben mért értékek |          |        |           |                | Valós méretekre átszámolt értékek |        |           |                |
|------------------------|----------|--------|-----------|----------------|-----------------------------------|--------|-----------|----------------|
| Re                     | v [cm/s] | s [cm] | Q [l/min] | $h_k-h_b$ [cm] | v [cm/s]                          | s [cm] | Q [l/min] | $h_k-h_b$ [cm] |
| 2                      | 0.4      | 2.7    | 0.09      | 0.1            | 0.4                               | 25.4   | 8.0       | 0.9            |
| 2                      | 0.4      | 2.8    | 0.09      | 0.1            | 0.4                               | 26.3   | 8.0       | 0.9            |
| 2                      | 0.6      | 4.2    | 0.12      | 0.2            | 0.6                               | 39.5   | 10.2      | 1.9            |
| 2                      | 0.6      | 4.5    | 0.12      | 0.2            | 0.6                               | 42.3   | 10.6      | 1.9            |
| 2                      | 0.6      | 4.3    | 0.12      | 0.1            | 0.6                               | 40.5   | 10.2      | 0.9            |
| 3                      | 0.8      | 5.7    | 0.15      | 0.2            | 0.8                               | 53.6   | 13.3      | 1.9            |
| 3                      | 0.9      | 6.2    | 0.16      | 0.3            | 0.9                               | 58.3   | 14.2      | 2.8            |
| 4                      | 0.9      | 6.0    | 0.17      | 0.2            | 0.9                               | 56.5   | 15.1      | 1.9            |
| 4                      | 1.0      | 7.4    | 0.19      | 0.4            | 1.0                               | 69.6   | 16.4      | 3.8            |
| 4                      | 1.0      | 5.8    | 0.18      | 0.2            | 1.0                               | 54.6   | 15.9      | 1.9            |
| 5                      | 1.1      | 7.4    | 0.21      | 0.3            | 1.1                               | 69.6   | 18.6      | 2.8            |
| 5                      | 1.2      | 8.7    | 0.22      | 0.5            | 1.2                               | 81.9   | 19.5      | 4.7            |
| 5                      | 1.2      | 8.1    | 0.22      | 0.3            | 1.2                               | 76.2   | 19.0      | 2.8            |
| 5                      | 1.4      | 9.4    | 0.24      | 0.5            | 1.4                               | 88.5   | 21.3      | 4.7            |
| 6                      | 1.3      | 8.5    | 0.24      | 0.3            | 1.3                               | 80.0   | 21.0      | 2.8            |
| 6                      | 1.5      | 10.0   | 0.26      | 0.5            | 1.5                               | 94.1   | 23.0      | 4.7            |
| 6                      | 1.6      | 11.1   | 0.27      | 0.6            | 1.6                               | 104.5  | 23.9      | 5.6            |
| 6                      | 1.5      | 10.0   | 0.26      | 0.4            | 1.5                               | 94.1   | 23.0      | 3.8            |
| 7                      | 1.7      | 11.3   | 0.28      | 0.6            | 1.7                               | 106.3  | 24.8      | 5.6            |
| 7                      | 1.7      | 11.2   | 0.29      | 0.5            | 1.7                               | 105.4  | 25.2      | 4.7            |
| 7                      | 1.6      | 9.1    | 0.28      | 0.4            | 1.6                               | 85.6   | 24.8      | 3.8            |
| 7                      | 2.0      | 13.0   | 0.31      | 0.7            | 2.0                               | 122.3  | 27.4      | 6.6            |
| 7                      | 1.9      | 12.7   | 0.30      | 0.7            | 1.9                               | 119.5  | 26.6      | 6.6            |
| 8                      | 2.1      | 13.6   | 0.32      | 0.9            | 2.1                               | 127.5  | 28.3      | 8.0            |
| 8                      | 1.9      | 12.3   | 0.31      | 0.5            | 1.9                               | 115.7  | 27.4      | 4.7            |
| 8                      | 2.0      | 12.5   | 0.32      | 0.6            | 2.0                               | 117.6  | 28.3      | 5.6            |
| 8                      | 2.1      | 13.7   | 0.33      | 0.7            | 2.1                               | 128.9  | 28.8      | 6.6            |
| 9                      | 2.2      | 14.0   | 0.34      | 0.6            | 2.2                               | 131.7  | 30.1      | 5.6            |
| 9                      | 2.3      | 15.3   | 0.35      | 0.8            | 2.3                               | 144.0  | 30.5      | 7.5            |
| 9                      | 2.5      | 15.9   | 0.36      | 1.0            | 2.5                               | 149.6  | 31.9      | 9.4            |
| 10                     | 2.4      | 15.3   | 0.36      | 0.8            | 2.4                               | 144.0  | 31.9      | 7.5            |
| 10                     | 2.7      | 16.9   | 0.38      | 1.1            | 2.7                               | 159.0  | 33.6      | 10.4           |
| 10                     | 2.6      | 16.3   | 0.37      | 0.7            | 2.6                               | 153.4  | 32.8      | 6.6            |

## 7. NUMERIKUS MODELLEZÉS

### 7.1. A FORCHHEIMER-EGYENLET

Korábban bemutatott eredményeimnél már utaltam a víztartóban létrejövő nem lineáris áramlás kialakulásának lehetőségére. Ennek előfordulási valószínűsége nő, ha minél nagyobb szivattyúzott hozammal végezzük el adott paraméterű talajnál a leszívást vagy adott hozam esetén minél nagyobb átteresztőképességű talajt vizsgálunk.

A vizsgálandó talajszerkezetben kialakuló nemlinearitás esetében a Darcy-törvény (2. fejezet) nem használható az áramlás jellemzésére, mert az lineáris kapcsolatot feltételez a hidraulikus gradiens és a kialakuló fajlagos vízhozam között. A próbaszivattyúzás-kiértékelő eljárások többsége lamináris áramlást feltételez a teljes áramlási térben, így ezek egyike sem alkalmas a talajmintában lezajló folyamatok pontos leírására. A Darcy által meghatározott lineáris áramlásra vonatkozó képletet (14. egyenlet) Forchheimer nemlineáris áramlásokra bővítette ki egy kvadratikussal (Forchheimer 1901):

$$av + bv^2 = -\frac{\partial h}{\partial l} \quad [14]$$

ahol:

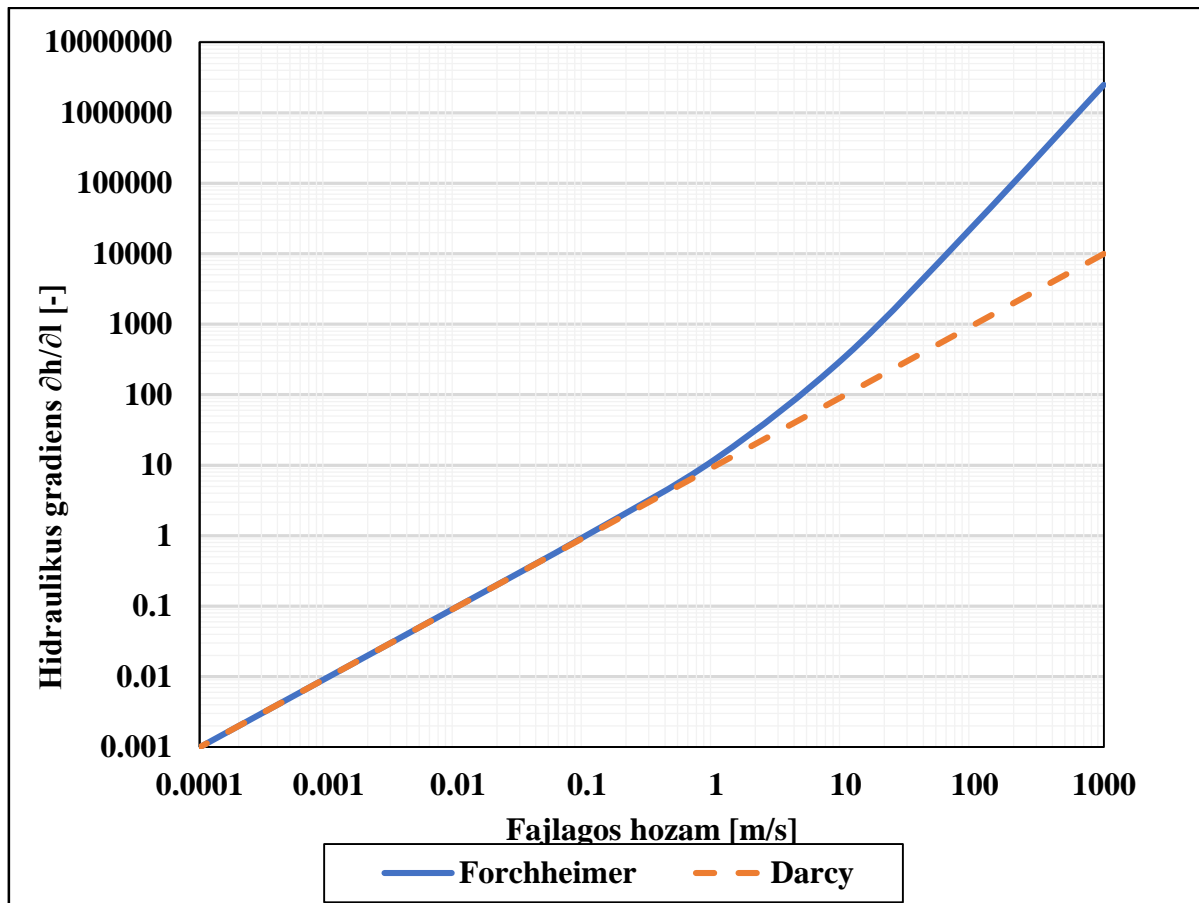
$$\bullet \quad a \left[ \frac{s}{m} \right], b \left[ \frac{s^2}{m^2} \right] - \text{Forchheimer paraméterek}$$

A Darcy-törvénnyel való egyezés érdekében az „a” Forchheimer paramétert általában a szivárgási tényező reciprokaként szokás megadni:

$$a = \frac{1}{k} \quad [15]$$

Kis fajlagos vízhozam értéknél annak négyzete és így az egyenletbe újonnan bevezetett „b” paraméter hatása elenyészővé válik, behelyettesítve az 15. egyenletet visszakapjuk a Darcy-törvényt (2. egyenlet).

A Forchheimer-egyenletet több szerző is használta a nemlineáris felszín alatti vízáramlás számítására, például: Thiruvengadam, Kumar (1997), Ewing és szerzőtársai (1999), Mathias és szerzőtársai (2008), Mathias, Todman (2010), Wen és szerzőtársai (2011), Khan és szerzőtársai (2017), Farkas-Karay (2018).



13. ábra: A Darcy-törvénnyel és a Forchheimer-egyenlettel számított fajlagos hozamok közötti eltérés. (Farkas-Karay 2018)

A 14. összefüggés csak egy megközelítés a sok közül, mellyel különböző szerzők a Forchheimer-paramétereket definiálni kívánták. A témában készült kísérleti eredményeket és félempirikus összefüggéseket Sidiropoulou és társai (2007) foglalták össze a teljesség igényével. A cikk alapján az 6. táblázatban foglaltam össze néhány jellemző  $b/a$  értéket a különböző talajtípusokra.

6. táblázat A  $b/a$  paraméter mért és különböző szerzők által megadott félempirikus összefüggésekkel számított értékei különböző kőzetanyagra. (1): Ward 1964, (2): Ergun 1952, (3): Bear 2012, (4): Sidiropoulou et al. 2007, (5): Arbhahirama, Dinoy 1973, (6): Ahmed, Sunada 1969, (7): Tyadi, Todd 1970.

| Kőzet-típus       | Szem-<br>átmérő<br>[m] | Poro-<br>zítás [-] | Mért $a$<br>[s/m] | Mért $b$<br>[s <sup>2</sup> /m <sup>2</sup> ] | $b/a$<br>Mérésekből<br>[s/m] | $b/a$<br>(1) | $b/a$<br>(2) és<br>(3) | $b/a$<br>(4) | Hivat-<br>kozások |
|-------------------|------------------------|--------------------|-------------------|---|------------------------------|--------------|------------------------|--------------|-------------------|
| Homok             | 0.001                  | 0.381              | 115               | 3450  | 30                           | 0.29         | 0.19                   | 24           | (5)               |
| Homok             | 0.00076                | -                  | 380               | 4540  | 12                           | 0.22         | -                      | 21           | (6)               |
| Folyami<br>kavics | 0.084                  | -                  | 0.06              | 15  | 250                          | 25           | -                      | 197          | (7)               |

A Sidiropoulou és társai által bemutatott eredmények alapján elmondható, hogy a  $b/a$  hányados értéke jobban köthető egy-egy kőzet- vagy talajtípushoz, mint külön-külön az  $a$  és  $b$  paraméterek (Farkas-Karay 2018). Jól látható, hogy a különböző szerzők által félempirikus összefüggésekkel meghatározott arányok nagy szórást mutatnak, helyenként több nagyságrenddel is eltérhetnek a kísérleti értékektől. Ebből következik, hogy az egyes talajokra vonatkozó  $b/a$  szélső határait nem lehet teljes bizonyossággal megállapítani, közelítő értékekkel, nagy tartományon lehet őket jellemezni.

## 7.2. A PROCESSING MODFLOW ÉS A NON-LINEAR FLOW PROCESS PROGRAMOK

TDK dolgozatom keretein belül törekedtem a talajmintában esetleg létrejövő nemlineáris áramlási viszonyok kimutatására, ehhez a MODFLOW Nonlinear Flow Process modulját használtam (Mayaud et al 2015).

A MODFLOW véges differencia módszeren alapuló numerikus modellező szoftver, mely nyílt forráskódú és ingyenes. Az ehhez tartozó Nonlinear Flow Process kiegészítés (későbbiekben NLFP) lehetővé teszi az áramlási térben való nemlineáris áramlás modellezését. A sebességek növekedésével az áramlás fokozatosan válik laminárisból átmenetivé majd turbulenssé. A programcsomag lehetővé teszi a hagyományos MODFLOW modellben nemlineáris áramlás kialakulását. Alkalmazásakor egyedül a Forchheimer paraméterek hányadosát, a  $b/a$  arányt kell meghatározni, az  $a$  paramétert a 15. egyenlet felhasználásával számolja a program (Mayaud et al. 2015). Ebből következik, hogy minél nagyobb  $b/a$  értéke, annál jelentősebb hatása lesz a Forchheimer-egyenletben lévő kvadratikus tagnak.

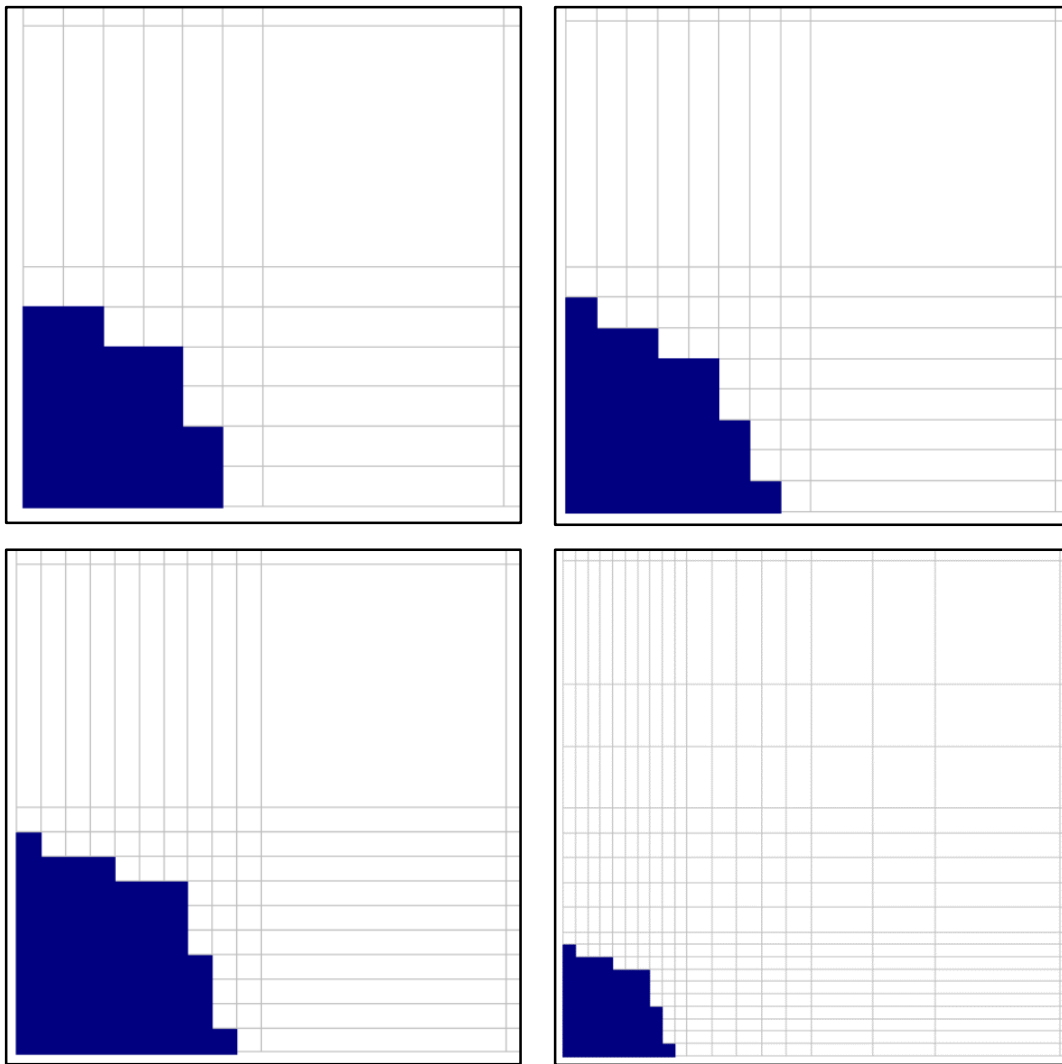
A MODFLOW-NLFP futtatásához szükséges adatfájlokat a Processing MODFLOW szoftver segítségével állítottam elő. A Processing MODFLOW (későbbiekben PM) egy egyszerű grafikus felület, mely segítséget jelent a geometria megrajzolásában és az eredmények bináris fájlokból való kiolvasásában, de nemlineáris futtatást nem lehet benne végezni. Az NLFP a MODFLOW semelyik grafikus interfésszel rendelkező változatában sincs benne, ez egy kiegészítő modul.

A PM-mel létrehozott .dat kiterjesztésű állományokat egy NAME.dat elnevezésű fájl „fogja össze” az NLFP számára. Az ebben a fájlban felsorolt állományokat fogja beolvasatni a hivatalosan CFP\_NLFP\_final\_verison.exe (a továbbiakban CFP\_NLFP) nevet viselő programba. Az .exe kiterjesztésű fájlban szereplő CFP (Conduit Flow Process) elnevezés arra utal, hogy a program képes csőhálózatokban kialakuló áramlások modellezésére, de én ezt a részét nem használtam fel dolgozatomban. E program segítségével a végeredményeim txt kiterjesztésű és bináris fájlokban kaptam meg. Ezen fájlok beolvasására a PM csak részint alkalmas.

### **7.3. A NUMERIKUS MODELL FELÉPÍTÉSE**

Az alkalmazott véges differencia modell méreteit a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási laboratóriumában található kismintamodell geometriája alapján határoztam meg. A modell körcikk alaprajzú, víztérig tartó sugara 128 cm. A könnyebb kezelhetőség érdekében a numerikus modell alapterületének egy 130x130 cm-es nagyságú négyzetet állítottam be, 1x1 cm-es cellakiosztással. A termelőkutat reprezentáló cellát az eredmények pontossága érdekében kisebb cellákra bontottam (14. ábra). A cellafelosztás mindaddig értelmezhető, amíg a szomszédos cellák oldalaránya nem haladja meg az 1:10-es értéket. Kezdetben a cellát 6 oszlopra és 6 sorra osztottam fel (14. bal felső ábra), majd ezeket az értékeket 8-ra (14. jobb felső ábra) és 10-re (14. bal alsó ábra) növeltem. Ha 10 sornál és 10 oszlopnál nagyobb felosztásszámot alkalmazunk, akkor már nem csak az anyakutat szimbolizáló cella, hanem a szomszédos cellák felosztása is szükséges, egy ilyen példa látható a 14. ábra jobb alsó sarkában. Azt tapasztaltam, figyelembe véve az oldalarányra vonatkozó szabályt, hogy akkor kaptam a legjobb eredményt, ha azt az egy cellát 100 kisebb cellára bontottam.

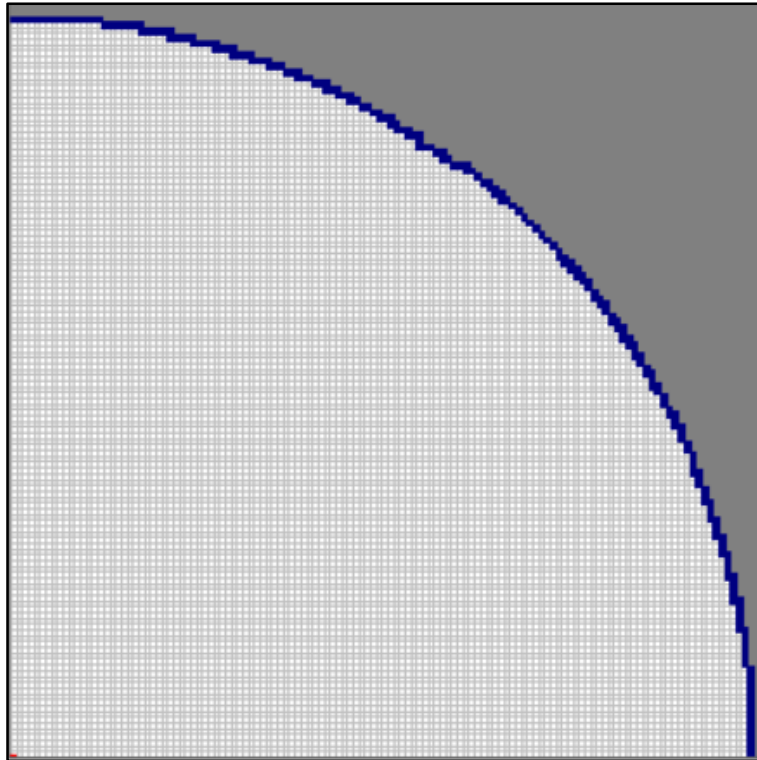
Innentől kezdve a kiértékelt eredményeim ezzel a felosztással értelmezhetők.



**14. ábra: Különböző cellafinomítások szemléltetése a termelőkút környezetében**

Ahhoz, hogy a legjobb geometriai közelítést érjem el a laborban lévő modellhez képest és az NLFP a valós víztartón vizsgálja a nemlinearitás hatását. Elsőként szükségem volt arra, hogy egyenként definiáljam az egyes cellák áramlásban betöltött szerepét. A modell három érték beolvasására képes, „0” szimbolizálja az inaktív cellákat, melyekben nincs áramlás, „-1” értéket kell beadni a víztartó pereméhez és az „1”-et értelmezi aktív, azaz a víztartóban jelen lévő celláknak. Ez alapján a fizikai modell alaki közelítése az 15. ábra szerint adódott. A körcikken belül elhelyezkedő cellákat láttam el „1”-es számmal, míg a körcikken kívül esőket „0”-val jellemeztem. Magán a körcikken megjelenő kék lépcsőzetes jelölés jelenti a peremet, itt a PM-et „-1”-es értékkel láttam el.





**15. ábra: Alapmodell geometriája a peremfeltételekkel**

A modell egy réteget tartalmaz, melynek vastagsága a kismintamodellbe beépített 0-1-es homokréteg vastagságával, azaz 0,50 méterrel egyezik meg. A vízáramlás ebben a rétegben szabad felszínű. A rétegvastagságot két paraméter segítségével tudtam beállítani, megadtam a réteg alsó síkjának a magasságát (0,00 m), illetve a réteg felső síkjának a szintjét (0,50 m).

A modellen belüli mértékegységek beállítására csak az időlépések esetén van lehetőség, ezt másodpercre állítottam. A hossz mértékegységének beállítása csak a PM által előállított fájlokban, kézi utómunkával adható meg, emiatt törekednem kellett, hogy mindenhol azonos mértékegységeket használjak, ez jelen esetben métert jelentett.

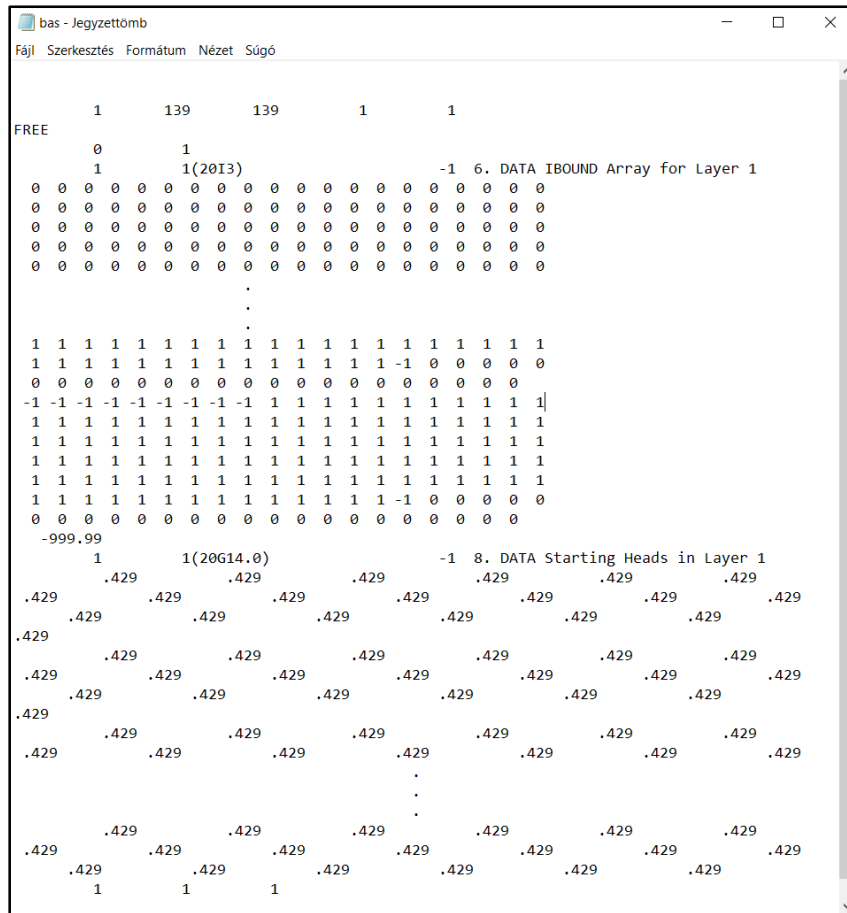
A modellbe épített peremfeltétel cellái fix szintekkel rendelkeznek, a teljes modellterben homogén talajt feltételezve azonos szivárgási tényező értékeket állítottam be. Ezeket az egyes vizsgálatokra külön-külön a labor kisminta egy-egy méréséből előállított eredményeim alapján határoztam meg. A modell egészéről elmondható, hogy a megadott talajfizikai paramétereket csak ott értelmezi, ahol a modell aktív cellákat tartalmaz.

#### 7.4. A PM ÁLTAL ELŐÁLLÍTOTT FÁJLOK

A beállítások után az előállított .txt kiterjesztésű fájlok olyan formátumúvá tétele volt a feladatom, amit a fent említett CFP\_NLFP program képes beolvasni és kiértékelni. A nehézséget az jelentette, hogy a program sikeres lefutásához szükséges 7 darab adatfájl (az összeset egybefogó NAME\_p.dat, bas\_p.dat, dis\_p.dat, bcf\_p.dat, NLFP\_p.dat, oc\_p.dat, pcg2\_p.dat) előállítására volt szükség. A fájlok neveit „\_p” jelöléssel láttam el a könnyebb megérthetőség érdekében, jelezvén, hogy ezek a lefutáshoz elengedhetetlen állományok, a későbbiekben is így hivatkozok rájuk. Ezen jelölés hozzátétele azért is volt fontos, hogy meg tudjam különböztetni a PM által automatikusan előállított fájljait azoktól, amiket én utómunkával később véglegesítettem a futtatáshoz szükséges formára. A PM a szükségesek közül csak 4 darabot állít elő magától, ezek a következők: bas.dat, bcf.dat, oc.dat és pcg2.dat. Ezek közül kettőt (bas.dat és bcf.dat) még kézzel finomítanom kellett. A kimaradt hármat teljesen saját kezűleg kell elkészíteni a PM által előállított négy állomány adatai alapján.

A NAME fájlban felsorolt és a szoftver által beolvasott adatfájlok fő funkciói az 8. táblázatban olvashatóak, illetve alább részletesen leírom a létrehozásuk menetét és a funkcióikat.

A PM-ből nyert bas.dat tartalmazza a modellben beállított rétegek, oszlopok és sorok, valamint a számítási lépcsők számát. Megtalálható benne az idő mértékegységéhez hozzárendelt szám (1 – secundum), a beadott peremfeltétel-„zászlók”, a kezdeti nyomásszint, a számítási lépcsők száma, a számítási lépcsőkön belüli időlépések és az időlépési szorzók (16. ábra).



16. ábra: PM által előállított bas.dat fájl

A bcf.dat állományban található a következő PM-nek beadott paraméterek: a nedvesítéssel kapcsolatos paraméterek (a jelen modell esetében nincs jelentősége), az anizotrópia faktort, az oszlopok szélességét, a sorok magasságát, a szivárgási tényezőt, a réteg aljának a magasságát és, hogy a réteg szabad felszínű.

Az oc.dat és pcg2.dat egy az egyben megegyezik az oc\_p.dat és pcg2\_p.dat fájlokkal, így ez a kettő már készen áll a CFP\_NLFP-ben való futtatásra.

A három kézi úton előállítandó állomány mellett a bas.dat és bcf.dat kiterjesztésű fájlokban változtatásokat kellett eszközölnöm, máskülönben az NLFP-vel történő numerikus modell futása sikertelen.

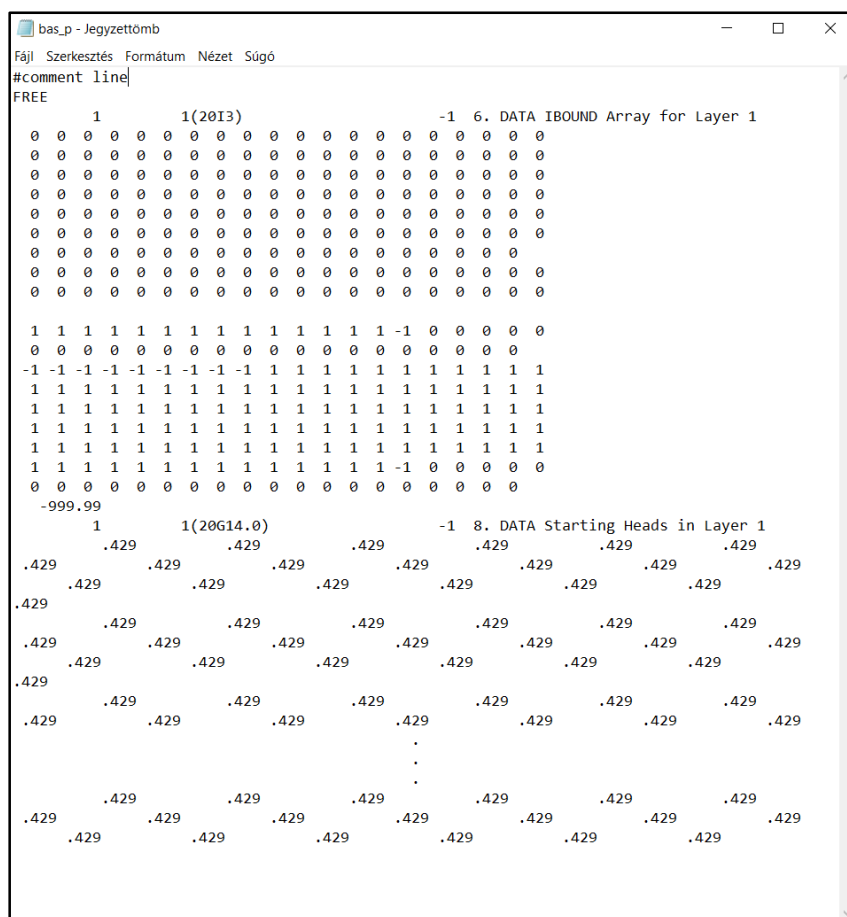
A 7. táblázatban rendszereztem, hogy mely állományok álltak rendelkezésemre a PM-ből, melyeket kellett módosítanom és melyeket kellett kézzel megírnom a CFP\_NLFP sikeres futtatásához.

7. táblázat: A .dat kiterjesztésű állományok rendszerezése

|   | PM által előállított .dat állományok | Kézi módosítás nélküli .dat állományok | Kézi módosítással előállított .dat állományok | Kézzel készített .dat állományok      |
|---|--------------------------------------|--|---|---------------------------------------|
| CFP_NLFP_final_version.exe futtatásához módosítást nem igénylő .dat állományok                  | oc.dat<br>pcg2.dat<br>wel.dat        | oc_p.dat<br>pcg2_p.dat<br>wel_p.dat    |   |                                       |
| CFP_NLFP_final_version.exe futtatásához módosítást igénylő .dat állományok                      | bas.dat<br>bcf.dat                   |  | bas_p.dat<br>bcf_p.dat                        |                                       |
| CFP_NLFP_final_version.exe futtatásához szükséges, de PM által elő nem állított .dat állományok |                                      |  |   | dis_p.dat<br>NLFP_p.dat<br>NAME_p.dat |

A bas\_p.dat a bas.dat-ból állítható elő, a peremfeltétel és a felsőperem szintjén kívüli többi adatra a bas\_p.dat-nak nincsen szüksége, ezeket a sikeres lefutás érdekében ki kell törölni (17. ábra).

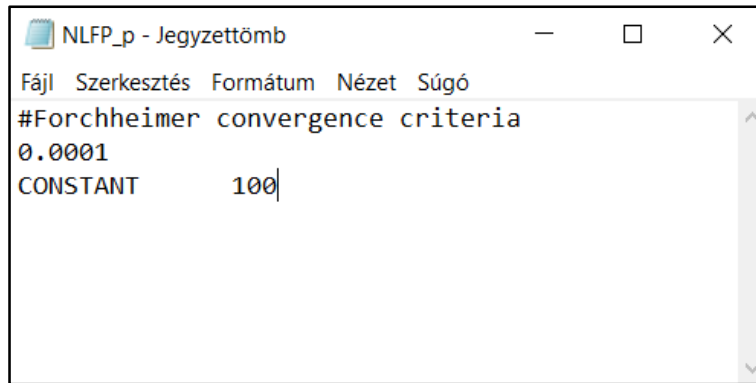
Ahhoz, hogy a bcf\_p.dat állomány előálljon, a bcf.dat-ból a nedvesítéssel kapcsolatos paramétereken, a szabad felszínű rétegen és az anizotrópia faktoron kívül mindent el kell távolítani és a bas.dat fájlból hozzá kell írni a szivárgási tényező nagyságát. Ezekkel együtt már négy állományt tud beolvasni a CFP\_NLFP.



17. ábra: CFP\_NLFP\_final\_verison.exe programhoz szükséges bas\_p.dat fájl

A dis\_p.dat megírásához a PM által előállított bas.dat és bcf.dat fájlokra volt szükségem. A bas.dat-ból felhasználtam a rétegek, oszlopok és sorok számát, a számítási lépcsők számát és az idő mértékegységéhez hozzárendelt számot. Ezt ki kellett egészítenem a hossz mértékegységéhez hozzárendelt számmal (2 – méter), majd a bcf.dat állományból az oszlopok szélességét, a sorok magasságát és a réteg aljának vastagságát kellett átvennem. A PM-ben beállított réteg felső síkjának magasságértékével is kiegészítésre szorult a fájl. Ez után ismét a bas.dat állományból volt szükségem 3 darab paraméterre, az alkalmazott egy darab számítási lépcső sorszámára, a számítási lépcsőn belüli időlépésekre és az időlépési szorzóra. Végül meg kellett adnom, hogy a modellben időben állandó (Ss – Steady-State) vagy időben változó-e (Tr – Transient) az áramlás.

Ahhoz, hogy a CFP\_NLFP program nemlineáris áramlási tagot is számolni tudjon, két további paraméter megadása nélkülözhetetlen. Szükség van a Forchheimer konvergencia kritériumra és a „b/a” arányszámra, ezeket az NLFP\_p.dat-ba kell beírni (18. ábra).



18. ábra: CFP\_NLFP\_final\_version.exe program lefutásához szükséges NLFP\_p.dat

A NAME\_p.dat állományba a fent említett 6 darab fájlnek kell feltüntetni a pontos nevét. A fájlok elnevezését, illetve funkciójukat a 8. táblázatban mutatom be.

8. táblázat: CFP\_NLFP\_final\_version.exe program lefutásához szükséges NAME\_p.dat fájl tartalma

| Fájl neve  | Fájl funkciója  |
|------------|---|
| dis_p.dat  | geometriai kialakítás, mértékegységek és időlépések meghatározása |
| bas_p.dat  | peremfeltételek és kezdeti feltételek definiálása                 |
| bcf_p.dat  | szivárgáshidraulikai paraméterek megadása                         |
| oc_p.dat   | kimeneti file-ok generálása                                       |
| pcg2_p.dat | a numerikus megoldó paramétereinek definiálása                    |
| NLFP_p.dat | a Forchheimer-paraméterek megadása                                |

A CFP\_NLFP futási eredménye egy OUTPUT.dat állomány, ebben jelennek meg a beállított paraméterek és kiolvasható belőle a kitermelt vízhozam értéke. Az OUTPUT.dat-on kívül előáll még négy bináris file, melyek a cellánkénti nyomásszintet, leszívást, a vízmérleget és a celláról celláról való áramlást tartalmazzák. Ezeket a PM programmal lehet .txt kiterjesztésű fájlá alakítani, majd előkészíteni a numerikus modell által számított eredmények feldolgozásához.

## **7.5. KEZDETI FUTTATÁSOK EREDMÉNYEINEK BEMUTATÁSA**

### **7.5.1. VÍZKIVÉTEL KÚTTAL**

Az 7.3. fejezetben bemutatott modellben először egy szivattyúzott kutat helyeztem el. A kút kitermelt vízhozamának a labor kismintán mért legnagyobb, jónak elfogadott értéket adtam be [ $\text{m}^3/\text{s}$ ] mértékegységben ( $9,66 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ ). A PM ilyen feltételek mellett előállított állományokon kívül egy wel.dat fájlt is előállított, ez módosítás nélkül használható volt a CFP\_NLFP futtatásánál, csak a fájlra való hivatkozással ki kellett egészíteni a NAME fájlt.

A beállított feltételek mellett lefuttattam a programot és így megkaptam .dat kiterjesztésű fájlokat. A CFP\_NLFP által előállított heads.dat állományt beolvastattam a Processing MODFLOW-ba, majd ezeket .txt kiterjesztésű fájlba exportáltam. Az így előállt adatsorok értelmezhetősége jelentős mértékben egyszerűsödött. A könnyebb feldolgozás érdekében az állományban szereplő adatokat Microsoft Excel táblázatkezelő programba másoltam (ezt a művelet sorozatot: MODFLOW-ba beolvasást, .txt-be exportálást, végül Excelbe való átmásolást a későbbiekben 3 fázisú műveletnek fogom nevezni). Ezzel megkaptam egy 139 sorból és 139 oszlopból álló táblázatot, melyben minden egyes cella a numerikus modell egy darab elemével azonosítható. Az Excel celláiban megjelenő értékek az elemközepén lévő vízoszlop magasságát jelenti [m] mértékegységben.

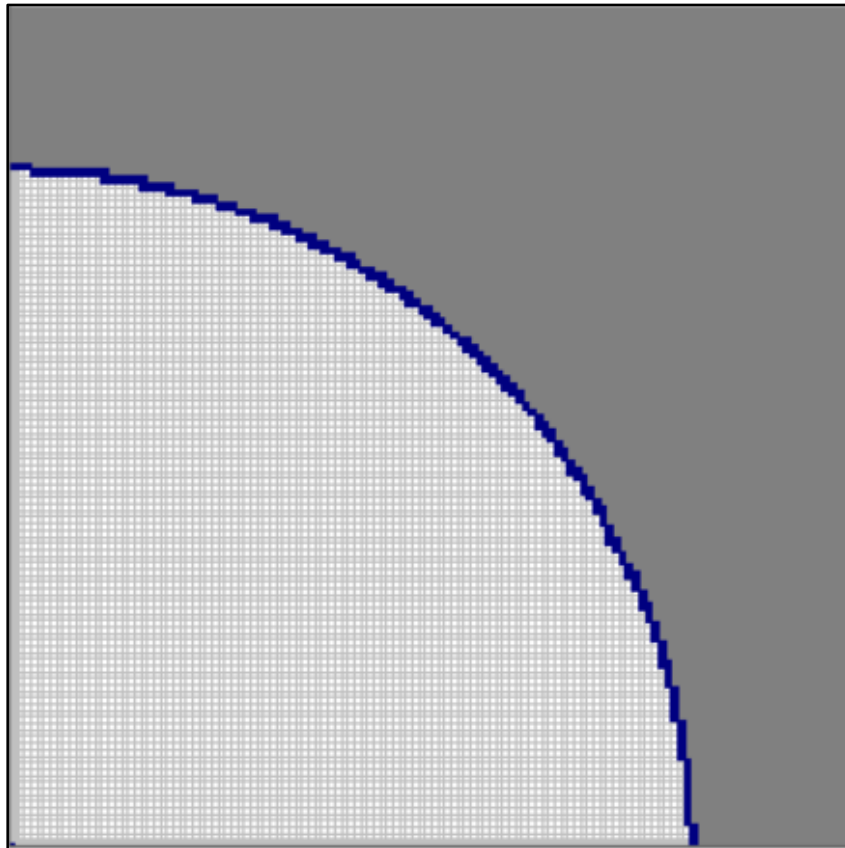
A kiértékeléskor egy nagy problémába ütköztem. A numerikus modell eredményei alapján a kút celláiban a víznyomás 0-ra csökken. A cellák a MODFLOW-ban használt elnevezés alapján „kiszáradnak”, és az „újranedvesítés” (rewetting) próbálkozások is rendre kudarcot vallottak. A vízmérleg emiatt hibás lett, a hiba okát egyelőre nem tudtam feltárni.

### **7.5.2. VÍZKIVÉTEL FIX KIFOLYÁSI PEREMMEL**

A kút alkalmazása helyett a PM-et visszaállítottam a kút nélküli verzióra és a kút helyére egy alsó fix perem értéket adtam meg, ami azzal jár, hogy kitermelt vízhozam érték beadása nem lehetséges. Ez a peremérték megegyezett a labor kismintán az anyakútban mért legalacsonyabb nyomásszinttel. A CFP\_NLFP futtatás után a modell eredményeit a 3 fázisú művelet után értékeltem. Összehasonlítottam a kismintamodell megfigyelőkútjaiban mért és a numerikus modell által meghatározott vízoszlopmagasságok szintjeit. Az egyes megfigyelőkutakhoz tartozó értékpárok nem mutattak egyezést se az anyakúthoz közel, se attól távolodva. A numerikus modell felső peremét ezért a tizedik megfigyelőkúthoz tartozó sugár mentén

helyeztem el, hogy a víz a kisminta modellterébe való belépésekor esetleg kialakuló eltéréseket kiszűrjem.

Míg a 15. ábrán szemléltetett esetben a felső peremen kialakuló nyomásmagasság értéke az egész másfél éves mérési idő alatt állandó volt (0,54 m), addig az utolsó megfigyelőkútban lévő vízszint nem. Ez az érték a leszívás mértékének függvényében az egyes mérések esetében eltérő volt, így mindig azt a nyomásmagasságot használtam a PM-ban, amelyik mérést a numerikus modellezéssel való kiértékelésre kijelöltem. Az 19. ábrán bemutatom azt a kijelölt felső peremet, melyet már az anyakút és az utolsó megfigyelőkút távolságával adtam meg. A peremfeltétel beállítására használt jelölések (-1,0,1) megegyeznek a 7.3. fejezetben leírtakkal. Ezzel a változtatással a fix felső peremnél felmerülő esetleges eltéréseket semmisnek lehet tekinteni.



**19. ábra: Az utolsó megfigyelőkút az új felső perem**

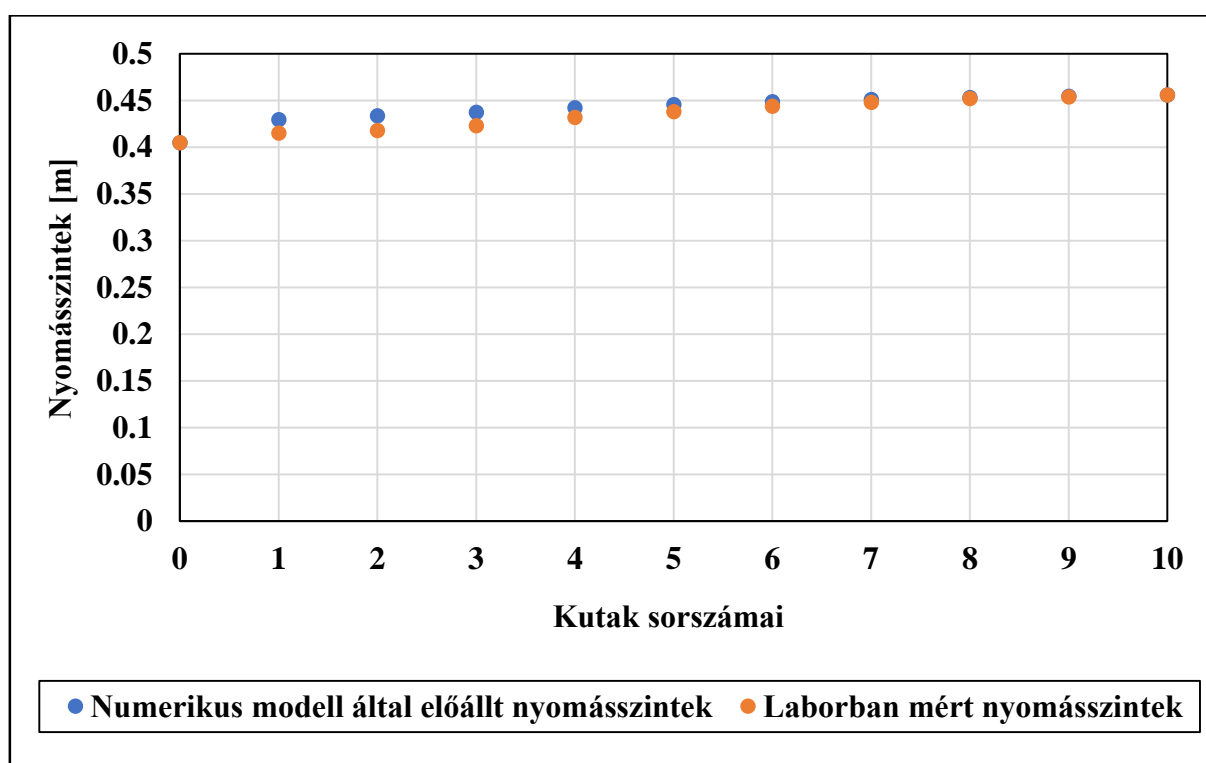


## 7.6. EREDMÉNYEK KIÉRTÉKELÉSE

### 7.6.1. KIS HOZAMÚ MODELLVÁLTOZAT

A 13. ábrán bemutatott elmélet szerint a kis vízhozamértékek esetén a Darcy és Forchheimer elmélet között nincsen eltérés így a numerikus modellezés során ennek az igazolására törekedtem. Kiválasztottam egy olyan labor kismintán végzett mérést, ahol a legkisebb mért vízhozam érték állt elő. Ez a vízhozam 0,17 l/min volt. Ehhez a méréshez tartozó felső- és alsó peremszinteket és a szivárgási tényezőt a kismintamodell eredményei alapján beadtam a PM-nek. Az alsó perem 0,405 m, az felső perem 0,456 m és a szivárgási tényező  $2,75 \cdot 10^{-4}$  m/s volt. Az általa előállított állományokat kibővítettem azokkal, amik szükségesek a CFP\_NLFP lefuttatásához. Ebben az esetben az NLFP-t még figyelmen kívül hagytam. A futtatás utáni eredményfájlokat a 3 fázisú művelet elvégzése után értékeltem ki.

Összehasonlítottam a numerikus modellt a laborban lévő kismintamoddellel. Azt tapasztaltam, hogy a két eset nyomásszintjei jó egyezést mutatnak azonos szivárgási tényező esetén (20. ábra). Az első néhány megfigyelőkút esetében látható apró eltérések a mért adatok pontatlan leolvasásából vagy a numerikus modell idealizációjából adódhatnak.



20. ábra: Kis vízhozam esetén vizsgált nyomásszintek

Ezután vizsgáltam azokat az eseteket, amikor a „b/a” 0-ról 100-ra, 1000-re és 10000-re növeltem. Mind a három esetben lefuttattam a CFP\_NLFP-t és azt tapasztaltam, hogy ha az „b/a”-t irreálisan nagyra növeltem, a nyomásszintekben akkor sem adódik változás, tehát a laborban mért értékek és a PM által előállított vízoszlopmagasságok megegyeznek. Ez alapján kijelenthető, hogy ezen a szakaszon a modellben nincs nemlineáris áramlás.

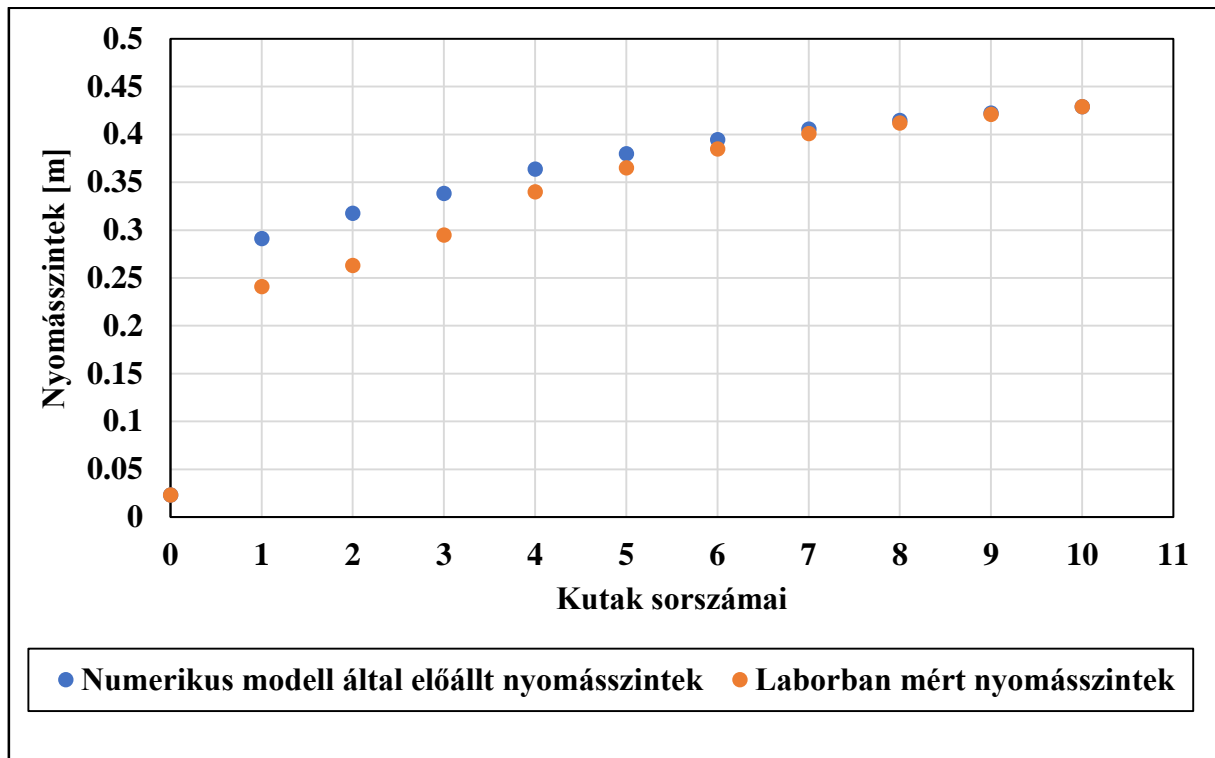
A vízfelszínben kapott kevesebb, mint 5%-os eltérés mellett a numerikus modellel kapott hozamok minden esetben jócskán a mért hozamok alatt maradtak (0,17 l/perc helyett 0,03 l/perc), függetlenül attól, hogy az NLFP-ben a „b/a” hányados mekkora értékre volt beállítva. Ez rámutat arra, hogy a laborban lévő kismintamodellben érvényesül valami olyan hatás, amit a numerikus modell nem vesz figyelembe. Az eltérés oka a numerikus modell idealizáltságából eredhet, de a pontos okok megállapításához további futtatások szükségesek.

#### **7.6.2. NAGY HOZAMÚ MODELLVÁLTOZAT**

A kis vízhozamú mérések numerikus vizsgálata mellett fontosnak tartottam a nagy hozamú kísérletek vizsgálatát is. Kiválasztottam a laborban azt a legnagyobb hozamú mérést, amit a fizikai modell eredményeinek kiértékelésénél el is fogadtam. Ez a vízhozam érték 0,58 l/min volt.

Az első futtatást a labormodellben mért és számolt adatok alapján végeztem el. Az alsó perem 0,023 m, az felső perem 0,429 m és a szivárgási tényező  $2,54 \cdot 10^{-4}$  m/s volt. A PM előállította az állományait, ezt kiegészítettem a még meg nem lévő, de futtatáshoz szükséges fájlokkal, majd lefuttattam a CFP\_NLFP-t  $b/a=0$  értékkel. Az így kapott eredményeket a 3 fázisú művelet elvégzése után kiértékeltem. Összehasonlítottam a labormodellben regisztrált nyomásszinteket a CFP\_NLFP-vel előállítottakkal, a két adatsor pontjai azonban nem estek egybe (21. ábra) és az OUTPUT.dat fájlban a kitermelt vízhozam értéke ( $7,47 \cdot 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s) sem egyezett meg. Kisebb értékre adódott, mint a laborban mért vízhozam ( $9,66 \cdot 10^{-6}$  m<sup>3</sup>/s). Úgy gondoltam, ez lehet a vízszintbeli eltérések hibaforrása. Így kerestem azt a szivárgási tényezőt, amivel a numerikus modell azt a kitermelt hozamot eredményezi, amit a labormodell alapján számoltam. A labor által regisztrált adatokból számított szivárgási tényező ( $2,54 \cdot 10^{-4}$  m/s) és az a szivárgási tényező ( $3,33 \cdot 10^{-4}$  m/s), amivel a program futtatása utáni vízhozamérték egyenlő lett a laborban mért vízhozammal majdnem teljesen megegyezett, így ezt a módosítást nem tekintettem mérvadónak. A megváltoztatott szivárgási tényező esetén lefutott modell NLFP nélkül a

nyomásszintek egyezésében nem mutatott javulást, tehát a szivárgási tényező változtatása nem jelentett érdembeli változást a nyomásszintek nagyságában.



21. ábra: NLFP nélkül lefuttatott modell

A vizsgálataimat azzal folytattam, hogy a módosított szivárgási tényező mellett a CFP\_NLFP-vel figyelembe vettem az NLFP-n beállított konvergencia kritériumot és a „b/a” arány értékét. A „b/a” arányt a kis hozamoknál bemutatottak alapján, 0, 100, 1000 és 10000 értékkel vizsgáltam. Azt kaptam, hogy a változtatott NLFP-k esetén a vízhozam értékek is változtak, ez már a legkisebb általam vizsgált b/a arányszámnál is megmutatkozott.

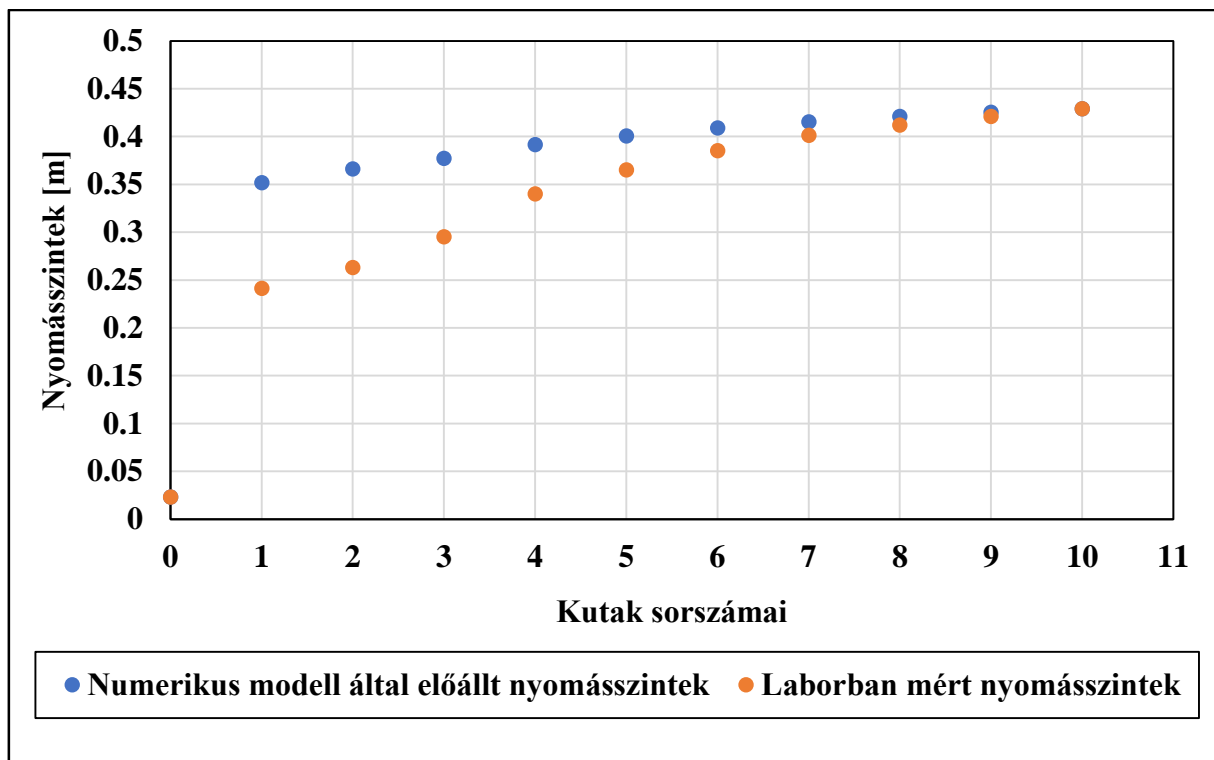
9. táblázat: Különböző b/a értékek mellett kialakuló vízhozamok

| b/a [s/m]             | 0        | 100      | 1000     | 10000    |
|-----------------------|----------|----------|----------|----------|
| Q [m <sup>3</sup> /s] | 9.65E-06 | 8.86E-06 | 5.75E-06 | 2.49E-06 |

A csökkenő hozam a nemlineáris áramlás hatására kialakuló, a lamináris esetnél nagyobb veszteségekkel magyarázható, ez látható az 9. táblázatban. A „b/a” paraméter változtatásával változtak az áramlás jellemzői, ami azt mutatja, hogy a Forchheimer-egyenletben szereplő „b”

paramétertől függő négyzetes tag értéke nem zérus. Ez alapján kijelenthető, hogy a modellben nagy leszívások esetén kialakul nemlineáris áramlás.

A laborban mért és numerikusan modellezett nyomásszintek közötti eltérés már a  $b/a=0$  megoldás esetében is jelen van, ez felfedezhető a nemlineáris modellezés során is, így a vízhozam értékének a változása a nemlineáris áramlás jelenlétének tudható be. A nagyhozamú méréseknél semmilyen változtatás („ $b/a$ ”, „ $k$ ” értékek növelése vagy csökkentése) hatására nem sikerült egyezést elérni a mért és a számított nyomásszintek között (22. ábra). Ennek oka a kis hozamoknál is említett feltételezés, miszerint a numerikus modellezésnél alkalmazott idealizációk nem vesznek figyelembe valamely, a kismintában jelenlévő, de egyelőre még nem feltárt jelenséget.



22. ábra: NLFP-t figyelembe vevő futtatás,  $b/a=1000$  esetén

## **7.7. TOVÁBBI TERVEK A NUMERIKUS MODELL FEJLESZTÉSÉRE**

A numerikus modellezéssel kapott eredményeim javítása és pontosítása érdekében további modellváltozatok kidolgozására van szükség. Az alábbi módosítások lehetnek célravezetők:

- A nyomásszintkülönbségek javítása érdekében a PM-be beadott idealizált modellgeometrián további finomításokat eszközölhetek.
- Módosítom a kútként reprezentált alsó perem palástján lévő szivárgási tényezőket, úgy, hogy eltérjen a víztartón értelmezett szivárgási tényezőktől. Ezzel a szivárgási tényezők eltéréssel közelíthetném a kútfalon elszenvedett nyomásvesztéseket.
- A modellt homogén és izotróp tulajdonságait felülbírálván heterogén mintát hozhatnék létre (az történhet akár a szivárgási tényező, akár a b/a tényező módosításával), emellett az anizotrópia hatását is vizsgálhatnám.
- PEST (Parameter Estimation model wrapper) alkalmazásával a kalibrálandó paraméterek értékeit könnyen pontosítani tudnám, ezzel javíthatnám modellváltozataimat.

## **7.8. TOVÁBBI TERVEK A KISMINTAMODELLEZÉSSEL**

További céljaim közé tartozik a szivárgási- és kúthidraulikai vizsgálataim folytatása más szemeloszlású talajmintára. Ebben az esetben is vizsgálhatnám a szivárgási tényezőt, a kútpaláston kialakuló szakadás arányát és a víztartón kialakuló áramlási viszonyokat.

Ezen túl vizsgálni szeretném a felületi utánpótlódás és párolgás hatását a kismintamodellen. Elemezni lehetne, hogy milyen hatással van ez a szivárgási tényezőre, a kútellenállásra és az áramlási viszonyokra a különböző talajminták esetében.

## 8. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatom keretein belül szivárgás- és kúthidraulikai vizsgálatokat végeztem kisminta- és numerikus modellezéssel. A laboratóriumi méréseimet 2018 augusztus óta végeztem, mely során 453 mérést hajtottam végre. Az előállt adathalmazt több szempont szerint értékeltem ki, melyek a szivárgás- és kúthidraulikán túl a nemlineáris áramlás numerikus modellezésére is kitértek.

Méréseimet folytatva a már meglévő és TDK dolgozatban összefoglalt eredményeim halmazát bővítettem. Ellenőriztem, hogy több mérés esetén az addig megfogalmazott megállapítások helytálló-e vagy ellentmondásos kiértékelések születtek. Kiértékeltem három különböző, egyaránt 5 %-os átteresztőfelülettel rendelkező termelőkúttal végzett méréseim eredményeit, és az ebből levont és szakirodalmak által alátámasztható megállapításokra törekedtem.

A laborban lévő kismintamodell megfigyelőkútjain regisztrált adatok alapján, megfigyelőkútpáronként szivárgási tényezőket számoltam, majd képeztem ezek átlagát, így minden mérésemre megállapítottam egy átlagos szivárgási tényezőt. Kimutattam a szivárgási tényező időbeli változását.

E mellett vizsgáltam a különböző kútkialakítások esetén, hogy a Darcy-törvény értelmében vett leszívás és vízhozam értékek közötti lineáris kapcsolat alakul-e ki, ezeket ábrával szemléltettem. Azt tapasztaltam, hogy a kútcseré utáni mérésorok a talaj átrendeződése miatt nem szolgálnak megbízható eredményekkel, azonban a talajmozgás lejátszódása után mért mérésorok görbéje egybeesik. Elmondható, hogy a nagyobb perforációval ellátott kutak esetében egy adott hozamhoz nagyobb leszívás értékek tartoznak.

Ezen túl a termelőkutat további kúthidraulikai vizsgálatoknak vetettem alá. Regisztráltam a kútpaláston kialakuló szakadás mértékét mind a három termelőkút esetében, majd összehasonlítottam Öllös (1958) munkájával. A kútpaláston belül ( $h_b$ ) és kútpaláston kívül ( $h_k$ ) lévő nyomáskülönbségeket a leszíváshoz arányosítva megkaptam, hogy a teljes leszívás mértékének mekkora részét képezi a csak a kútpaláston kialakuló szakadás, ennek mértékét %-ban határoztam meg. Az 1,0 mm-es kút esetében a maximális leszíváshoz 15 %-os, a 2,0 mm-es kút esetében 17%-os és a 2,5 mm-esnél 18%-os érték adódik. Általánosan kijelenthető, hogy minél nagyobb lyukátmérőjű kúttal végeztem méréseimet, egyre nagyobb lett a kútpaláston kialakuló kúttellenállás értéke.

A szivárgási tényező változása, az anyakút termelőképességének nemlinearitása és a kútbeli szakadás megléte mind eltérnek a homogén, lamináris áramlással jellemezhető idealizációktól. Ez szükségessé teszi a modellben kialakuló áramlási viszonyok beható elemzését. Eredményeim alapján arra következtettem, hogy a modellterbe  $Re=10$ -ig és  $3\text{ cm/s}$ -os belépési sebességig az áramlás biztosan a lamináris tartományba esik. Ebben a tartományban a Darcy-törvény érvényes. Ezen értékek felett már átmeneti, illetve turbulens áramlásról beszélünk.

Mindezek mellett a termelőkút három különböző magasságában, a talajréteg aljától  $5$ ,  $15$  és  $25\text{ cm}$ -re, vizsgáltam a nyomásszintek magasságát. Azt tapasztaltam, hogy kis leszívások esetén a  $3$  pontban mért nyomásszintek egyezést mutattak. Azonban a leszívás növelésével a vízoszlopmagasságok közötti differencia nőtt. Tehát a legkisebb nyomásérték mindig a kúttalaphoz legközelebb eső pontnál alakul ki.

A laboratóriumi vizsgálatok értékelése után a Mosonyi-Kovács modelltörvény alapján a kismintamodellen mért eredményeimet átszámítottam valós méretekre. Mivel a modelltörvény a Darcy-törvényen alapul, a valós méretre átszámított eredményeim közül azokat tekintem megbízhatónak, amik már a korábban meghatározott lamináris áramlási tartományba esnek.

Ezeket túl fontosnak tartottam, hogy numerikus modellezéssel ellenőrizzem, hogy a teljes víztartón kialakul-e nemlineáris áramlás. Ehhez a Processing MODFLOW NLFP modulját használtam. Az NLFP a PM-nek egy olyan bővítménye, ami a Forchheimer-egyenleten alapul, így ha az általam vizsgált víztartón valóban van nemlinearitás, akkor ez ennek a programcsomagnak az alkalmazásával kimutatható. A modellezés alatt többféle modellgeometriát használtam, hogy az esetleg hibaforrásokat elkerüljem. Változtattam a peremfeltételeket, hogy minél több eredmény álljon a rendelkezésemre. Kis vízhozam beállítása esetén azt tapasztaltam, hogy a modellben az áramlás lamináris, azonban a numerikus modell által számolt vízhozam hatodrésze a laborban mért vízhozam értékének. Nagy vízhozam beadása esetén a nemlineáris áramlás jelenlétét a  $b/a$  arány változtatásával és az így kapott egyre kisebb vízhozamok alapján bebizonyítottam.

Az általam elvégzett és bemutatott szivárgáshidraulikai és kúthidraulikai laboreredmények és numerikus modelleredmények további ismeretekkel bővíthetik a próbaszivattyúzásokor kialakuló szabadfelszínű vízáramlásról rendelkezésre álló információkat. Korábbi kutatásom folytatásával több, a szakirodalmi előzmények alapján is elfogadható eredményt tudtam kimutatni. A mérések folytatásával és a numerikus modell fejlesztésével a kialakuló áramlási viszonyok még teljesebb megismerését tűztem ki további célomnak.

## FELHASZNÁLT IRODALOM

- **Ahmed, N., Sunada, D. K. (1969)** – Nonlinear flow in porous media. Journal of Hydraulic Division, ASCE, 95 (6), pp 1847-1857
- **Arbhabhirama, A., Dinoy, A. A. (1973)** – Friction factor and Reynolds number in porous media flow. Journal of the Hydraulic Division, ASCE, 99 (6), pp 901-911
- **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)
- **Barta E., Hajnal G., Karay Gy., Vasvári V. (2013)** - Determination of the coefficient of permeability by physical model test and numerical modelling, in: iaahr (ed.): proceedings of the 35th IAHR congress, beijing: tsinghua university press, 2013. Paper cd. 11 p. (ISBN: 978-7-89414-588-8)
- **Bear, J. (1972)**: dynamics of fluids in porous media. New York: Dover. (ISBN 0-486-65675-6)
- **Darcy, H. (1856)**: Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon. p. 647, Paris
- **Dupuit, J. É. J. (1863)**: Etudes theoriques et pratiques sur le mouvement des eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains permeables. Paris, 304 p.
- **Dybbs, A., Edwards, R. V. (1984)**: A new look at porous media fluid mechanics - darcy to turbulent. In: fundamentals of transport phenomena in porous media : proc. Of the NATO advanced study institute on mechanics of fluids in porous media, newark, delaware, usa, 18.-27. Juli 1982. Hrsg.: bear, j., dordrecht: nijhoff. (ISBN 90-247-2982-3)
- **Ergun, S. (1952)** – Fluid Flow through packed columns. Chemical Engineering Progress, 48 pp 89-94.
- **Ewing, R. E., Lazavor, R. D., Lyons, S. L., Papavassiliou, D. V., Pasciak, J., Qin, G. (1999)** – Numerical well model for non-Darcy flow through isotropic porous media. Computational Geosciences, 3 (3), pp 185-204.
- **Fand, R. M.; Kim, B. Y. K.; Lam, A. C. C.; Phan, R. T. (1987)**: Resistance to the flow of fluids through simple and complex porous media whose matrices are composed of randomly packed spheres. In: Journal of Fluids Engineering – transactions of the ASME 109(3): 268-274. (ISSN 0098-2202)



- **Farkas D., Hajnal G., Vasvári V. (2018)** – Validation of a physical and numerical model to solve problems of seepage flow
- **Farkas-Karay Gyöngyi (2018)** – Repedezett és karsztos kőzetek szivárgáshidraulikai vizsgálata, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, Doktori értekezés
- **Forchheimer, P.H. (1901)** – Wasserbewegung durch Boden. Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure, 45, pp 1782-1788
- **Haszpra, O.(2008)** - Hidraulika I., Műegyetemi Kiadó, 14. utánnomás, pp. 135-138
- **Hegedűs N. (2018)** – Kúthidraulikai vizsgálatok kismintamodellezéssel, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék, TDK
- **Hlushkou, D., Tallarek, U. (2006):** Transition from creeping via viscous-inertial to turbulent flow in fixed beds. In: journal of chromatography a 1126(1-2): 70-85. – ISSN 0021-9673
- **Ivicsics L. (1968):** Hidromechanikai modellkísérletek, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, pp. 1-30.
- **Juhász J. (2002):** Hidrogeológia, Akadémia kiadó, Budapest
- **Khan, M. I., Hayat, T., Alsaedi, A. (2017)** – Numerical analysis for Darcy-Forchheimer flow in presence of homogeneous reactions. Results in Physics, 7, pp 2644-2650
- **Klotz, D. (1971):** Untersuchung von Grundwasserströmungen Durch Modellversuche im Maßstab 1:1. In: Geologica Bavarica 64: 75-119.
- **Kovács Gy. (1972):** A szivárgás hidraulikája, Akadémiai Kiadó, Budapest
- **Mathias, S. A., Butler, A. P., Zhan, H. (2008)** – Approximate solution for Forchheimer flow to a well. Journal of Hydraulic Engineering, 134 (9), pp 1318-1325
- **Mathias, S. A., Todman, L. C. (2010)** – Step-drawdown tests and the Forchheimer equation. Water Resources Research, 46 (7), W07514, 9 p
- **Mayaud, C., Walker P., Hergarten, S., Birk, S. (2015)** – Nonlinear flow process: a new package to compute nonlinear flow in MODFLOW. Groundwater, 53 (4), pp 645-650
- **Mosonyi E. (1955):** Hidraulikai hasonlóság a kismintatörvények és a kísérletek értékelése, a várható eredmények, Kézirat, Felsőoktatási Jegyzetellátó Vállalat, Budapest. pp. 41-44.

- **Nagy, I. V. & Karadi, G. (1961):** Untersuchungen über den Gültigkeitsbereich des Gesetzes von Darcy. In: Österreichische Wasserwirtschaft: OeWW 13(12): 281-287. – ISSN 0029-9588
- **Öllös G. (1957):** A kútpaláston kialakuló vízmozgásnak és a kút vízhozamának vizsgálata, Hidrológiai Közlöny 37. évf. 1957. 1. szám, pp. 26-33.
- **Öllös G. (1970):** Kúthidraulika, Kézirat, Tankönyvkiadó, Budapest, pp. 21-25.
- **Sidiropoulou, M. G., Moutsopoulos, K. N., Tsihrintzis, V. A. (2007)** – Determination of Forchheimer Equation coefficients a and b. Hydrological Process, 21 (4), pp 534-554
- **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)
- **Székely F. (2011):** kúthidraulikai modellezés és adatelemzés 1/3. Előadás, ELTE, Budapest, 2011.12.01., pp. 2.
- **Thiruvengadam, M., Kumar, G. P. (1997)** – Validity of Forchheimer equation in radial flow through coarse granular media. Journal of Engineering Mechanics, 123 (7), pp 696-705
- **Todd, D. K., Mays, L. W. (2005)** - Groundwater Hydrology, 3rd Edition, Printed: John Wiley and Sons Inc., Hoboken, New Jersey, USA, pp. 225.
- **Trussell, R. R., Chang, M. (1999):** Review of flow through porous media as applied to head loss in water filters. In: journal of environmental engineering 125 (11): 998-1006. – ISSN 0733-9372
- **Tyagi, A. K., Todd, D. K. (1970)** – Discussion of „Non-linear flow in porous media”, by N Ahmed and DK Sunada. Journal of Hydraulic Divison, ASCE, 96 (8), pp 1734-1738
- **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.
- **Walton, W. C. (1962)** - Selected analytical methods for well and aquifer evaluation, Bull. 49, Illinois State Water Survey, Urbana, 81 pp., 1962
- **Ward, J. C. (1964)** – Turbulent flow in porous media. Journal of Hydraulic Divison, ASCE, 90 (5), pp 1-12

- **Wen, Z., Huang, G., Zhan, H. (2011)** – Non-Darcian flow to a well in a leaky aquifer using the Forchheimer equation. *Hydrogeology Journal*, 19 (3), pp 563-572.
- **Williams, D. E. (1985)**: *Modern Techniques in Well Design*, American Water Works Association, 1985 September pp. 68-74.

## **KÖSZÖNETNYÍLVÁNÍTÁS**

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 szépen a Magyar Államnak, hogy az UNKP-19-1 kódú pályázat anyagilag támogatta dolgozatom létrejöttét.

# **MELLÉKLETEK**



1. kép: 1,0 mm lyukátmérőjű kút perforációja



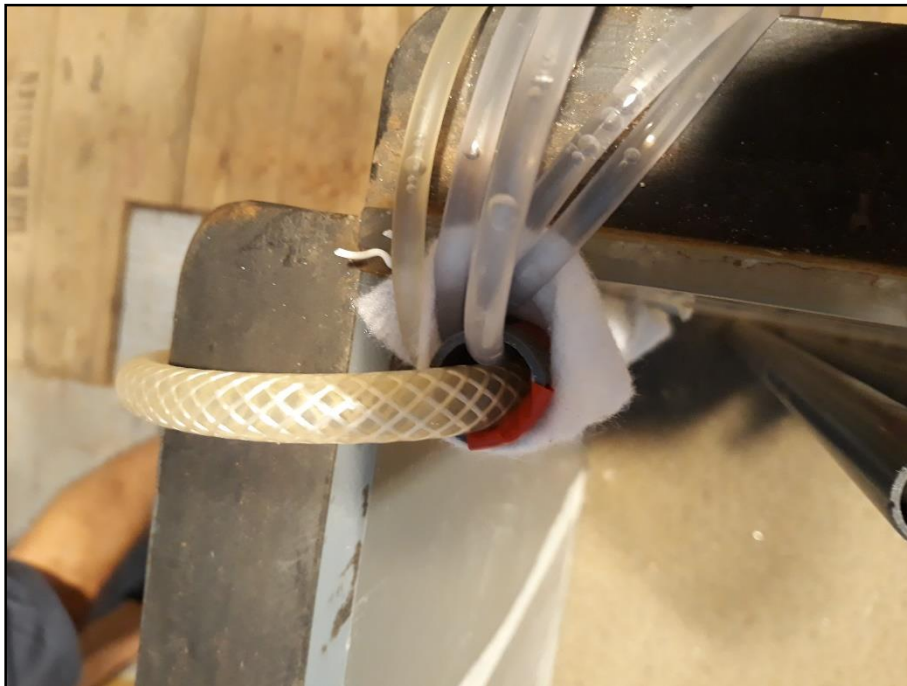
2. kép: Megfigyelőkutak perforált szakaszának geotextíliával való borítása



3. kép: Megfigyelőkutak beépítése



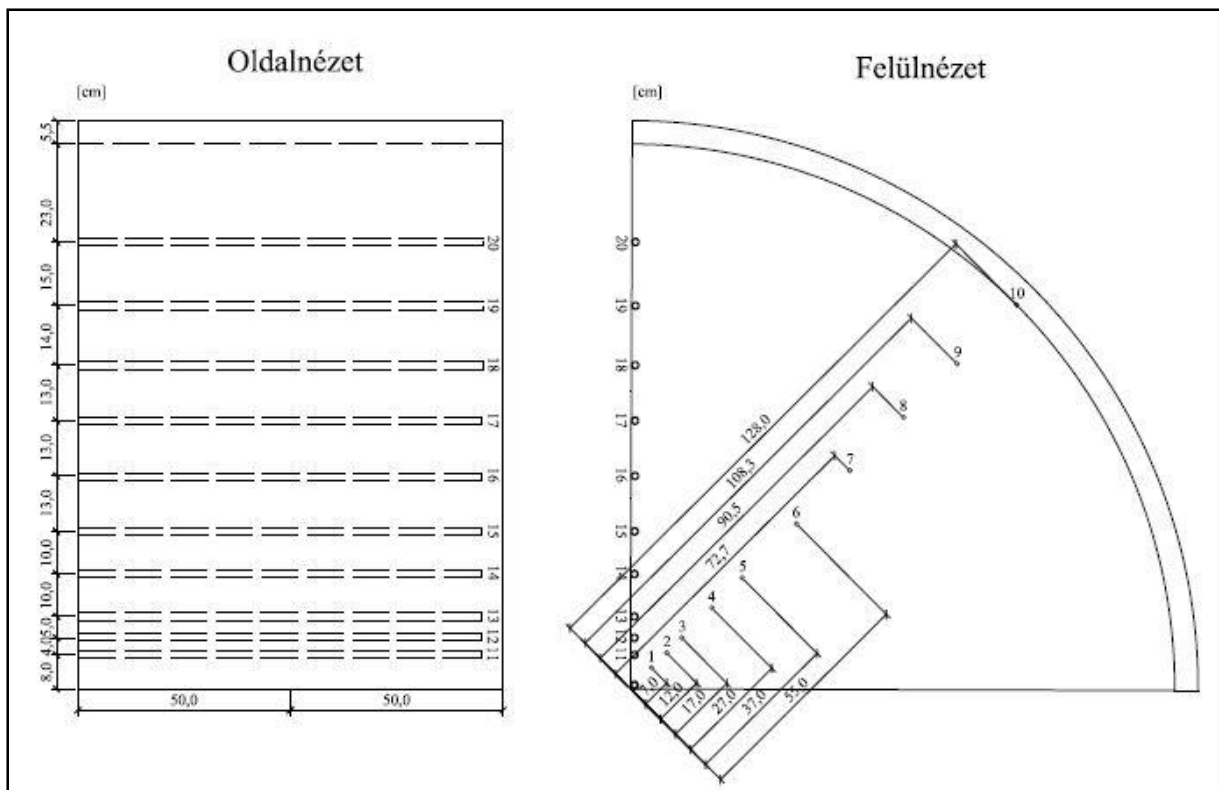
**4. kép: Homokkal feltöltött modell**



**5. kép: Buborékképződés a kútpaláston lévő piezométerekben**



6. kép: Alsó peremként szolgáló bukó és hőmérője



1. ábra: Kismintamodell oldal- és felülnézeti ábrája