PTE Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar

Környezetmérnöki szak

TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI DOLGOZAT
2015

A hódmezővásárhelyi gyökérzónás mintatelep transzport folyamatainak részletes elemzése, a műtárgy belső pontjain végzett mérések segítségével

A dolgozatot készítette:
Szekeres Anett

Témavezető:
Dittrich Ernő

Konzulensek:
Klincsik Mihály
Somfai Dávid

Tartalom

1. Bevezetés 6

2. Szakirodalmi feltárás 8

2.1. A természet-közeli szennyvíztisztítók 8

2.1.1. A természet-közeli szennyvíztisztítók felépítése, főbb típusai, működése 8

2.1.2. A hosszanti átfolyású gyökérzónás szennyvíztisztító telep lényeges tulajdonságai 9

2.2. A tudomány jelenlegi állása, napjainkban használt modellek 10

2.2.1. Modellezési kísérletek, jelenleg használt modellek 10

2.3. A konzervatív nyomjelző anyag mérések statisztikai vizsgálatához szükséges elméleti és matematikai összefüggések 11

2.3.1. Konzervatív nyomjelző anyag transzport vizsgálat 11

2.3.2. 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzport egyenlet 11

2.3.3. Sorba kapcsolt elkevert reaktor kaszkád modell 14

2.3.4. További eloszlás típusok sűrűségfüggvényei 14

2.3.4. R^2 definiálása 15

3. Anyag és alkalmazott módszerek 17

3.1. A hódmezővásárhelyi gyökérzónás mintatelep bemutatása 17

3.2. A statisztikai vizsgálatokhoz szükséges matematikai eljárások és szoftverek bemutatása 19

3.2.1. A statisztikai vizsgálatokhoz szükséges függvények előzetes szűrése 19

3.2.2. Az eloszlás típusok sűrűségfüggvényeinek további részletes elemzéséhez használt szoftver bemutatása 20

3.2.3 A Maple környezetben egyedileg elkészített program eddigi eredményei 21

3.2.4. Osztott konvektív-diszperzív transzport modell 23

3.2.5. Az osztott konvektív-diszperzív modell illesztési eredményei 24

3.2.6. A mérési pontokon átáramló tényleges vízhozam meghatározása a függvény alatti terület finomításával az illesztési kép és az R^2 segítségével 25

4. Eredmények és értékelés 27

4.1. Az öt függvény illeszkedésének mértéke, függvényképek 27

4.1.1. 2007.09.02-i mérés 27

4.1.2. 2007.10.07-i mérés 29

4.1.3. 2008.02.08-i mérés 29

4.1.4. 2008.05.29-i mérés 30

4.2. R^2 átlagának kiszámítása a függvény típusok sorrendjének megállapításához 32

4.2.1. A függvények illeszkedésének alakulása a műtárgy korának előrehaladtával 32

4.2.2. A műtárgyban zajló áramlás képe felülnézetből a függvények illeszkedésének mértéke alapján 33
4.2.3. Metszetenkénti értékelés 34
4.2.4. Alsó és felső pontok R^2 értékeinek összehasonlítása 35
4.2.5. A végleges sorrend 37
4.3. Függvény alatti terület optimalizálás 38
4.4. Az osztott konvektív-diszperzív transzport modell illesztési eredményei 41
4.5. Összefoglalás 46
4.5. További kutatási irányok 47
Mellékletek ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
1. Melléklet A vízszintes átfolyású gyökérzónás műtárgy ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
2. Melléklet A statisztikai vizsgálatokhoz használt adatsorok: a hódmezővásárhelyi vízszintes átfolyású gyökérzónás műtárgy belső pontjaira vonatkozó koncentráció-, idő-, és függvény alatti területek mérési eredményei az egyes mérési időpontokban..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
3.Melléklet: Fatigue Life, Frechet, Inverz Gauss, LogNormal és Pearson5 függvények R^2 értéke az egyes időpontokban az egyes mérési pontokra ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
4.Melléklet: Fatigue Life, Frechet, Inverz Gauss, LogNormal és Pearson 5 függvények illesztési képe az egyes időpontokban az egyes mérési pontokra ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
5. Melléklet Az R^2 alakulása az idő függvényében a X. pontra és a belső pontokra az egyes függvények esetében ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
6. Melléklet Az eredeti és a módosított függvény alatti területek, és a hozzájuk tartozó R^2 értékek ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
7. Melléklet Az osztott konvektív-diszperzív transzport modell Frechet-vel optimalizált függvény alatti területtel kapott eredményei, a szükséges területmódosítások mértéke, és az így kapott R^2 értékek ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
8. Melléklet Az illesztések finomításának lépései során elért eredmények a Frechet sűrűségfüggvény vizsgálatától a korrigált függvény alatti területtel rendelkező osztott konvektív-diszperzív transzport modellel elért illeszkedésekig, és e kettő közötti javulás mértéke %-ban kifejezve.**Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
9. Melléklet Az osztott modell illesztési képei..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
10. Melléklet A főáram és a mellékáram aránya ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

Ábrajegyzék

1. ábra Vízszintes átfolyású gyökérzónás műtárgy sematikus rajza a drének helyzetével, oldalnézet (Dittrich 2006b) 8
2. ábra Vízszintes átfolyású gyökérzónás szennyvíztisztító műtárgy a drének elhelyezkedésével (felülnézet) 9
3. ábra A hódmezővásárhelyi gyökérzónás mintatelep függőleges, és vízszintes átfolyású műtárgya az utótisztító tóval (fotó: Dittrich Ernő 2007.07.16.) 17
4. ábra A vízszintes átfolyású műtárgy felülnézeti rajza a mérési pontokkal 18
5. ábra A vízszintes átfolyású műtárgyban kialakított mintavételi helyek (Dittrich E. 2007.09.02.) 18
6. ábra Az osztódrén helyzete a hosszanti átfolyású műtárgyban 19
7. ábra Az 1 dimenziós osztott konvektív-diszperzív transzport modell és a Frechet eloszlás illeszkedése az S4 jelű mérési eredményekre (Dittrich et al. 2013) 25
8. ábra A vízszintes átfolyású műtárgy második szelvénye a mintavételi helyekkel 26
9. ábra Példa a 2008.05.29-i mérés eredményeként kapott kétcsúcsú függvényre (VIII.a pont) 32
10. ábra A függvények illeszkedésének alakulása a műtárgy korának függvényében 33
11. ábra Az illeszkedés mértéke az I-IX pontokra, felső 34
12. ábra Az illeszkedés mértéke az I-IX pontokra, alsó 34
13. ábra A függvények alakulása az egyes szelvényekben 35
14. ábra Függvények illeszkedése az alsó és felső mérési pontokra 36
15. ábra Az egyes függvények illeszkedésének mértéke a korábbi eredmények és a belső pontok esetében 38
16. ábra A III.f mérési pont esetében az illeszkedés mértékének alakulása a függvény alatti terület függvény alatti terület ismeretében 39
17. ábra A főáram és a mellékáram alakulása a műtárgy hossza mentén 45
18. ábra A hosszanti átfolyású gyökérzónás műtárgy (fotó: Dittrich Ernő 2007.10.07.) ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
19. ábra A beépítésre előkészített perforált csövek (fotó: Dittrich Ernő (2007.07.17.) ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
20. ábra A Frechet eloszlás illeszkedésének alakulása az idő függvényében a X. pontra és a belső pontokra ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
21. ábra A Pearson5 eloszlás illeszkedésének alakulása az idő függvényében a X. pontra és a belső pontokra ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
22. ábra A LogNormal eloszlás illeszkedésének alakulása az idő függvényében a X. pontra és a belső pontokra ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
23. ábra A Fatigue Life eloszlás illeszkedésének alakulása az idő függvényében a X. pontra és a belső pontokra ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**
24. ábra Az Inverz Gauss eloszlás illeszkedésének alakulása az idő függvényében a X. pontra és a belső pontokra ..... **Hiba! A könyvjelző nem létezik.**

Táblázatjegyzék

1. táblázat A statisztikai vizsgálatokhoz használt adatsorok, 2007.09.02. 21
2. táblázat A statisztikai vizsgálatokhoz használt adatsorok, 2007.10.07. 22
3. táblázat A statisztikai vizsgálatokhoz használt adatsorok, 2008.02.08. 23
4. táblázat A statisztikai vizsgálatokhoz használt adatsorok, 2008.05.29. 27
5. táblázat : Fatigue Life, Frechet, Inverz Gauss, LogNormal és Pearson5 függvények R^2 értéke az egyes időpontokban az egyes mérési pontokra, 1. szelvény 27
6. táblázat : Fatigue Life, Frechet, Inverz Gauss, LogNormal és Pearson5 függvények R^2 értéke az egyes időpontokban az egyes mérési pontokra, 2. szelvény 28
7. táblázat : Fatigue Life, Frechet, Inverz Gauss, LogNormal és Pearson5 függvények R^2 értéke az egyes időpontokban az egyes mérési pontokra, 3. szelvény 29
8. táblázat Fatigue Life, Frechet, Inverz Gauss, LogNormal és Pearson5 függvények illesztési képe az egyes időpontokban az egyes mérési pontokra 29
9. táblázat A két Inverz Gauss függvény illesztési képe 30
10. táblázat Az R^2 átlagai az egyes mérési időpontokban az egyes függvényekre az illesztés sorrendjében 31
11. táblázat Metszetenként alsó és felső értékekre meghatározott R^2-ek alakulása 34
12. táblázat A mérési eredmények átlagai az alsó és felső pontokra 35
13. táblázat A belső pontok végleges sorrendjének összehasonlítása a X. pont és a nemzetközi adatsorokkal 36
14. táblázat: A konstans és a korrigált függvény alatti területű Frechet eloszlás illeszkedésének összehasonlítása 39
15. táblázat Eredeti és módosított függvény alatti területek és az azokhoz tartozó R^2 értékek 40
16. táblázat A függvény alatti terület vizsgálata az egyes szelvények esetén 41
17. táblázat Az áramlás vertikális rétegződésének vizsgálata 41
18. táblázat Az egyes finomítási módszerekkel kapott eredmények, és a javulás mértéke 42
19. táblázat Az S értékek vizsgálata az egyes szelvények esetében alsó és felső pontokat külön elemezve 43
20. táblázat A főáram és a mellékáram aránya a teljes térfogatáramban a műtárgy hossza mentén 43

1. Bevezetés

Manapság a környezetvédelmi problémák rákényszerítik az emberiséget arra, hogy a környezetük hosszú távú fenntartása érdekében olyan módszereket, eljárásokat dolgozzanak ki, melyek csökkentik a környezet terhelését. Mind a levegőbe, mind a talajba, mind pedig a vizekbe jelentős mennyiségű szennyezőanyag jut. Ennek csökkentése érdekében számos szakember dolgozik azon, hogy megfelelő technológiák révén az emissziót visszaszorítsák. Az egyik fontos terület a vizek tisztaságának védelme. Ennek érdekében a bevezetendő szennyvizek minél nagyobb fokú tisztítására kell törekedni. A jelenleg legelterjedtebb technológiai csoport az intenzív szennyvíztisztítás, ide tartoznak például az eleveniszapos vagy csepegtetőtestes eljárások. A másik típuscsoportot az extenzív technológiák képezik, ezeket más néven természet-közeli szennyvíztisztító rendszereknek szokás nevezni. Ezek az eljárások méretezési módszereiket tekintve még nem olyan kiforrottak, mint az intenzív technológiák eljárásai.

A természet-közeli eljárások közül az egyik legelterjedtebb az ún. gyökzónás szennyvíztisztítás. A világ számos országában építettek gyökérzónás szennyvíztisztító telepeket, sokat közülük kutatási céllal. Sajnos Magyarországon csak kevés ilyen telep található, annak ellenére, hogy kiváló alternatíva lehet kisméretű kibocsátások és kisebb települések szennyvizének tisztítására. Ennek oka egyrészt az, hogy sokan nem ismerik a technológiát, másrészt pedig túl sok a negatív tapasztalat a már megépült telepek üzemelésével kapcsolatban. A negatív tapasztalatok okai nagyrészt a nem megfelelő tervezési módszerekben keresendők **(Dittrich 2006a)**. Sajnos a nemzetközi méretezési eljárások nálunk kudarcot vallottak, ugyanis a hazai telepek, elsősorban az időjárási viszonyokhoz nem tudtak kellő mértékben alkalmazkodni, mely nem megfelelő üzemelési eredményekben mutatkozik meg **(Dittrich 2013)**. A gyökérzónás műtárgyak tervezése részben a tudományos háttér kiforratlansága, részben pedig a műtárgyakban zajló bonyolult áramlástani és lebontási folyamatok, továbbá az időjárási viszonyoktól való erőteljes függése miatt igen nehézkes és bizonytalan.

A folyamatokat komplexen leírni igen nehéz, azonban a részfolyamatok külön-külön történő elemzése célravezető lehet. Éppen ezért választottam dolgozatom témájául a rendszer egyik alappillérét, az áramlástani folyamatok vizsgálatát. A munkám során olyan kutatási irányelvet követtem, mely a műtárgyban kialakuló áramlás mélyebb vizsgálatának segítségével pontosabban leírja a műtárgyban zajló transzport folyamatokat. Ezek az eredmények segíthetnek a jelenleg használt tervezési módszerek finomításában azáltal, hogy a modellek rugalmasabban tudják kezelni az áramlást befolyásoló műtárgy-specifikus paramétereket.

A vizsgált témával nemzetközi szinten is viszonylag kisszámú publikáció foglalkozik, annak nagy bonyolultsága miatt, melyet tovább nehezítenek az összetett méréstechnikai problémák is. A hódmezővásárhelyi gyökérzónás mintatelepen Dittrich Ernő témavezetőm által végzett specifikus mérések azonban egy nemzetközi szinten is részletes kutatást tett lehetővé a számomra. Klincsik Mihály konzulensem segítségével kidolgoztak egy módszert a gyökérzónás telep transzport folyamatainak vizsgálatára, és a mintatelep kifolyási szelvényében mért eredményekre elvégezték. Munkám során ezeket a módszereket

alkalmaztam a műtárgy belső mérési pontjainak vizsgálatára is, majd a közben felvetődő problémák megoldására új eljárást dolgoztam ki.

Vizsgálataim célja végső soron egy nemzetközi szinten is újszerű eljárásrendszer ellenőrzése illetve pontosítása annak érdekében, hogy hozzájárulhassak a témával foglalkozó modellek fejlesztéséhez.

2. Szakirodalmi feltárás

2.1. A természet-közeli szennyvíztisztítók

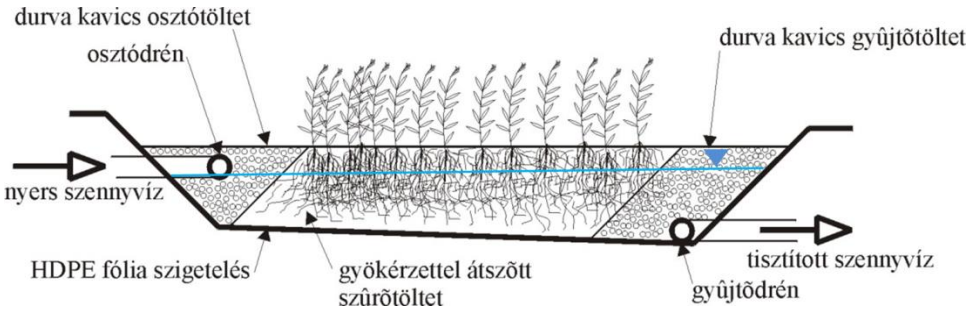
2.1.1. A természet-közeli szennyvíztisztítók felépítése, főbb típusai, működése

A természet-közeli, más néven gyökérzónás szennyvíztisztítók a felszín alatti átfolyású épített wetland-ek (mocsarak) csoportjába sorolhatók. Gyökérzónás szennyvíztisztító rendszerek esetében megkülönböztetünk függőleges és vízszintes átfolyású rendszereket, valamint multistage rendszereket, mely az előző kettő kombinálásából született azok előnyeinek nagyobb hatásfokú kihasználása érdekében. Az alábbi tulajdonságok mindegyik műtárgy típusra vonatkoznak. A továbbiakban azonban, mivel a dolgozatomban kizárólag a vízszintes átfolyású műtárgyak áramlástani viszonyaival foglalkozom, ennek a típusnak a konstrukcióját szeretném részletesebben bemutatni.

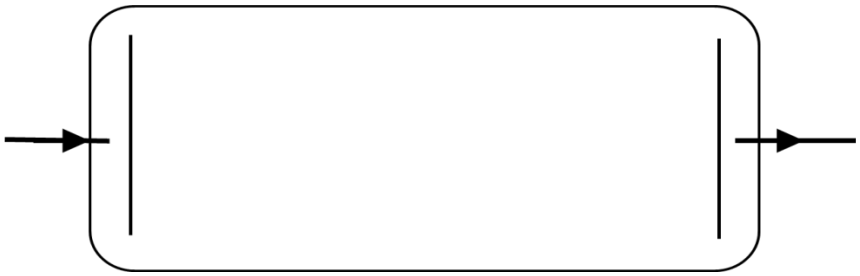
A gyökérzónás szennyvíztisztító rendszerek lényege, hogy a bevezetett szennyvíz teljes térfogatárama a műtárgy töltetén keresztül szivárog át. A töltet anyaga lehet különböző szemcseméretű kavics, homok, zúzalék, talaj, vagy ezek keveréke, az a fontos, hogy jó szivárgási tényezője legyen. Leggyakrabban frakcionált kavicsot vagy frakcionált homokot használnak **(Dittrich 2006a)**. A műtárgy töltetét általában valamilyen vízi-mocsári makrofiton gyökerei szövik át. A beültetett növényzet általában sás, nád, gyékény, vagy káka. A növények gyökérzete ideális esetben teljesen átszövi a szűrőtöltetet. A medence alja és oldala a gyökérzetnek ellenálló HDPE fóliával bélelt, mely megakadályozza a víz műtárgyból való kiszivárgását.

A hosszanti átfolyású műtárgyakba a szennyvíz bevezetése osztódrénen keresztül történik. Ez az áramlás irányára merőlegesen helyezkedik el az **1-2. ábrán** látható módon a szűrőtöltetnél nagyobb szemcseméretű osztótöltetben. Az osztódrén egy perforált cső, melynek segítségével a szennyvíz a műtárgyba egyenletesen kerül bevezetésre. A tisztított víz kivezetése a gyűjtőtöltetben az osztódrénhez hasonló kialakítású gyűjtődrénen keresztül történik. A gyűjtőtöltet az osztótöltethez hasonló anyagú és frakciójú. A bevezetés a műtárgy felső harmadában, míg a kivezetés a medence fenekén történik. A töltet mélysége 0,6-1m között javasolt. A szennyvíz műtárgybeli tartózkodási ideje kb. 2-7 nap **(Crites 1994).**

A műtárgy vázlatos rajzát és a drének helyzetét az alábbi két ábra szemlélteti:



1. ábra Vízszintes átfolyású gyökérzónás műtárgy sematikus rajza a drének helyzetével, oldalnézet (Dittrich 2006b)



2. ábra Vízszintes átfolyású gyökérzónás szennyvíztisztító műtárgy a drének elhelyezkedésével (felülnézet)

A szennyvíz tisztítása annak műtárgybeli tartózkodási ideje alatt összetett folyamatokon keresztül történik meg. A mechanikai tisztítást a töltet végzi, mely ülepítés, szűrés és adszorpció révén eltávolítja a vízből a lebegő anyagok, és kolloidok mennyiségének nagy részét. A biológiai tisztítás a műtárgyba ültetett vízi-mocsári növények gyökérzetének hatására történik meg. A biológiai és kémiai (abszorpció, kicsapódás, bomlás) folyamatok csökkentik a szennyvízben a szervesanyag, mikroszennyezők, nehézfémek, növényi tápanyag valamint a vírusok, baktériumok mennyiségét **(Jobbágy 1995).**

2.1.2. A hosszanti átfolyású gyökérzónás szennyvíztisztító telep lényeges tulajdonságai

A gyökérzónás műtárgyakra nem permanens változó felszínű szivárgás jellemző **(Dittrich 2006c)**. Ez már önmagában is nehezíti a modellezés paraméterezését. A bennük zajló különféle folyamatok számos tényezője ugyanis sztochasztikus jellegű **(Kadlec 1997).** Ha az áramlástani jellemzőket vizsgáljuk, az ún. eltömődési folyamatoknak kiemelt jelentősége van, mely hidraulikai rövidzárlatokat, és hidraulikai hatásfok-csökkenést okozhat. Ezeket a folyamatokat legfőképpen a gyökérzet növekedése, és a szennyvízzel bevezetett lebegőanyag blokkolódása, a szerves-anyag lebontásához kötődő biofilm-aktivitás következtében fellépő póruscsökkenés, valamint téli időszakban a töltetfagyás okozza. A töltet mechanikai tömörödése, a kémiai kiválások a töltetben, és a képződött gázbuborékok blokkolódása szintén befolyásoló tényezők lehetnek.

Az eltömődési folyamatok közül kiemelem a biofilm-aktivitás fogalmát. A töltet pórusainak egy része a biofilm-aktivitás következtében eltömődik, ezáltal a szennyvíz a kisebb ellenállás irányába haladva új utakat keres. Az eltömődött részek szervesanyag-ellátottsága így csökken, a biofilm-réteg elkezd leépülni. Ezzel szemben az új áramlási pályák a nagyobb terhelés miatt előbb-utóbb eltömődnek, ezzel egy időben a régi pályák az aktivitás-csökkenés következtében újra megnyílnak **(Laber et al. 2003).**

A medence nem megfelelő alakja konstrukciós problémákat okozhat. A műtárgy a következőképpen tudja befolyásolni az áramlást: a műtárgy alakja és hidraulikai viszonyai (holtterek, egyenlőtlen sebességeloszlás) alapvetően határozzák meg az áramlási viszonyokat, a porozitástól függ a szivárgási tényező, az inaktív pórusrendszer aránya befolyásolja a tartózkodási időt, az osztó-és gyűjtődrén kialakításának pontatlanságai miatt a szennyvíz be-, és elvezetés nem tökéletes, így az áramlás vonala jelentősen torzulhat.

Az áramlástani jellemzőkhöz szorosan hozzátartozik a tartózkodási idő vizsgálata. Ezt döntően a töltet és a drén tulajdonságai határozzák meg.

A másik fontos tényező a hidraulikai terhelés változékonysága. Ezt a befolyó tömegáram, valamint a párolgás (evapotranszspiráció), és a csapadék mennyisége határozza meg. A párolgás következtében egyes esetekben akár 88%-os töményedés, míg heves esőzések hatására rövid időre akár 100%-os hígulás is előfordulhat **(Netter 1994)**.

A gyökérzetnek komoly áramlástorzító hatása van. Megállapították, hogy a gyökérzet tömegének 70%-a a töltet felső 30%-ban található meg **(Breen et al. 1995)**. Ezáltal egy vertikális rétegződés alakul ki: a felső rétegekben a szivárgás lassú, kanyargós, jelentős mértékű visszakeveredés figyelhető meg, míg az alsóbb rétegekben a terhelés miatt egy gyorsabb kényszer-áramlás alakul ki. Ennek fontos szerepe lesz a későbbiekben a mérési eredmények kiértékelésénél.

A transzport folyamatok vizsgálatakor tehát a diszperzió és a konvekció mellett az előbb említett folyamatokat is figyelembe kell venni. Azt, hogy ezek a folyamatok mennyire befolyásolják az áramlási képet, a későbbiekben fogom vizsgálni.

2.2. A tudomány jelenlegi állása, napjainkban használt modellek

Az elmúlt években egyre több komplex dinamikus modell jelent meg a gyökérzónás szennyvíztisztító műtárgyakban zajló folyamatok leírására. Mivel ezeknek a folyamatoknak jelentős része sztochasztikus jellegű, ezért ezek a modellek egyelőre csak a pillanatnyi állapot leírására képesek. A tervezéshez azonban ez nem elég, a teljes folyamatok ismeretére van szükség. Ez természetesen nehéz feladat a folyamatok összetettsége miatt, de az egyes részfeladatokat vizsgálva, és azokat külön-külön fejlesztve végül komplett képet kaphatunk a műtárgyban zajló, mindezidáig találgatásokkal övezett eseményekről.

A dolgozattal, mint már említettem, az egyik irányvonal továbbfejlesztése a cél, ez pedig nem más, mint a műtárgyban zajló transzport folyamatok az eddigi nemzetközi publikációknál pontosabb leírása. Az áramlási jellemzőkkel eddig kevesen foglalkoztak, hazai kutatási eredmények pedig az általam vizsgált műtárggyal kapcsolatos kutatásokon kívül ismereteim szerint nincsenek.

2.2.1. Modellezési kísérletek, jelenleg használt modellek

Mivel a telepek üzemeltetésére jellemző paraméterek (tartózkodási idő, befolyó, és elfolyó koncentráció, terhelési viszonyok, hidraulikai terhelés, és a növényzet) szórása jelentős, így a modellezés nehézségekbe ütközik. Számos kutató több éves munkájának köszönhetően ennek ellenére többféle modell is napvilágot látott. Ezek két csoportba oszthatók **(Kumar et al. 2011)**:

- empirikus modellek:
  - black box modell
  - wetland modell (elsőrendű lebontási kinetikai modell)
  - időtől független lebontási modell
  - sorba kapcsolt reaktor kaszkád modell
  - monod-kinetikán alapuló modellek
  - neurális hálózati modellek
- folyamat alapú modellek:

- Hydrus 2D
- FITOVERT
- STELLA
- PHWAT
- 2 dimenziós mechanikus modell
- CWM1

Ezek közül a Hydrus 2D, FITOVERT, STELLA, PHWAT és a CWM1 rendelkezik transzport modullal a szoftveren belül, melyek mindegyike a hagyományos konvektív-diszperzív illetve a sorba kapcsolt reaktor kaszkád modelleket használja. Ezek alapjait a következő fejezetben mutatom be. Kutatási munkám és eredményeim ezen tarnszport modulok fejlesztéséhez, módosításához járulhatnak hozzá.

2.3. A konzervatív nyomjelző anyag mérések statisztikai vizsgálatához szükséges elméleti és matematikai összefüggések

2.3.1. Konzervatív nyomjelző anyag transzport vizsgálat

A konzervatív nyomjelző anyag transzport vizsgálatok igen elterjedtek a reaktorok áramlástani viszonyainak feltárására **(Levenspiel 1972, Horváth 1972)**. A módszer alapelve az, hogy a reaktor bevezetési szelvényébe konzervatív nyomjelző anyagot juttatunk, majd mérjük a reaktor kifolyási szelvényében, esetleg a műtárgy belső pontjain a konzervatív nyomjelző anyag koncentráció időbeni alakulását. Ilyen vizsgálatokat általában a tartózkodási idő és a diszperzió vizsgálatán keresztül a tisztítási mechanizmusok leírásának céljából végeztek egyes szerzők, én most elsősorban transzport folyamatok alakulására fókuszálok, ezek minél pontosabb leírására úgy, hogy a későbbiekben további kutatási munkával ezekből az eredményekből a tartózkodási idő, a szivárgási sebesség és a diszperziós tényező számítható legyen.

2.3.2. 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzport egyenlet

Az 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzport egyenlet konzervatív anyagra vonatkozóan:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - \frac{q}{\varepsilon}\frac{\partial C}{\partial x} \qquad (1)$$

Ahol

$\mathbf{D_x}$ [m^2/h] az ún. hosszirányú diszperziós tényező
$\mathbf{q}$ [1/h] fajlagos hidraulikai terhelés és
$\boldsymbol{\varepsilon}$ a vizsgálati időpontra jellemző porozitás értéke

Az egyenlet analitikus megoldása, a koncentráció impulzusszerű bevezetése, és zárt reaktort feltételezése mellett **(Kovács et al. 2002)**:

$$C(x,t) = \frac{M}{2 \cdot w \cdot m \cdot \varepsilon_0 \cdot \sqrt{\pi \cdot D_x \cdot t}} \cdot e^{-\frac{(x-vt)^2}{4 D_x t}} \qquad (2)$$

Az egyenlet alakjából látszik, hogy ha a C(x,t)-x síknegyeden ábrázoljuk, Gauss-eloszlást kapunk. Ez egy kétparaméteres Gauss-eloszlás. Várható értéke:

$$\mathbf{l = v_x \cdot \bar{t}} \qquad \mathbf{(3)}$$

Szórása:

$$\boldsymbol{\sigma = \sqrt{2 \cdot D_x \cdot t}} \qquad \mathbf{(4)}$$

Ahol:

M [kg]: a bevezetett nyomjelző anyag tömege,
w [m]: a szivárgási zóna szélessége,
m [m]: a szivárgási zóna magassága,
$\boldsymbol{\varepsilon_0}$ [-]: töltet porozitása,
t [h]: eltelt idő,
x [m]: szivárgási iránnyal párhuzamos távolság,
$\mathbf{v_x}$ [m/h]: pórusbeli szivárgási sebesség.

Mivel a méréseket nem a műtárgy teljes hosszában végezzük, hanem adott helyeken bizonyos időpillanatokban, így a függvényt a C(x,t)-t síknegyeden kell vizsgálnunk. Ez az eloszlás már nem Gauss eloszlás, mert a kezdeti gyors felfutást egy hosszabb, farokszerű lefutás követi. A nemzetközi szakirodalomban ezt Fick-féle eloszlásként írták le, mely a fenti analitikus megoldás C(x,t)-t síknegyeden értelmezett sűrűségfüggvénye.

A Fick-féle eloszlás egyenlete **(Kovács et al. 2002)**:

$$\mathbf{c(t, x = L) = \frac{M}{2 \cdot m \cdot w \cdot n \cdot \sqrt{\pi \cdot D_x \cdot \frac{t^3}{t_{össz}^2}}} e^{-\frac{(L - v_x \cdot t)^2}{4 D_x t}}} \qquad \mathbf{(5)}$$

Várható értéke:

$$\boldsymbol{\bar{t} = \frac{L}{v_x}} \qquad \mathbf{(6)}$$

Szórása:

$$\boldsymbol{\sigma^2 = \frac{2 D_x L}{v_x^3}} \qquad \mathbf{(7)}$$

A függvény lefutásának hosszú farokszerű elnyúlását okozza, hogy a molekuláris diffúzió révén sokkal lassabb keveredési folyamatok alakulnak ki, mint egy turbulens diffúzió esetén, ezáltal a kisebb, holttérszerűen viselkedő pórusokba bekerülő nyomjelző anyag sokkal lassabban mosódik ki. Többek között ennek a folyamatnak leírására vezették be a késleltetési tényezőt, mely a holtterekben zajló lassabb keveredési viszonyokat leíró újabb paraméter, továbbá a korrigált diszperziós tényezőt, mely az elkeveredési viszonyok elkenődését okozza a diffúziós anyagcsere által a makro- és mikropórusok között. A korrigált diszperziós tényezővel és a késleltetési tényezővel való korrekció beépítésével az 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzport egyenlet analitikus megoldása a következőképpen módosul:

$$C(x,t) = \frac{M}{2 \cdot w \cdot m \cdot n \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot D_e \cdot t}{R}}} \cdot e^{-\frac{(x-vt)^2}{\frac{4D_e t}{R}}} \qquad (8)$$

Mint látható, ez is egy két paraméteres Gauss eloszlás. Itt fontos megjegyezni, hogy ha a késleltetési tényezőt külön paraméterként vizsgálnánk, akkor már nem beszélhetnénk kétparaméteres Gauss eloszlásról, ezért a D_x/R hányadost választjuk egyik paraméternek, a másik paramétert a v_x adja.

Ugyanezt a módosítást átvezethetjük a Fick-féle eloszlásba (**(5.) egyenlet**), azaz a C(x,t)-t síknegyedre is, így a következő egyenletet kapjuk:

$$c(t, x = L) = \frac{L}{2 \cdot \sqrt{\frac{\pi \cdot D_x \cdot t^3}{R}}} e^{-\frac{(L - v_x \cdot t)^2}{\frac{4D_x t}{R}}} \qquad (9)$$

melynek varianciája és szórásnégyzete:

$$\bar{t} = \frac{L}{v_x} \qquad (10)$$

$$\sigma^2 = \frac{2D_x L}{R \cdot v_x^3} \qquad (11)$$

A **(9.) egyenletből** levezethető, hogy a Fick-féle eloszlás nem más, mint tulajdonképpen egy ugyancsak kétparaméteres Inverz Gauss eloszlás **(Dittrich 2013)**. Az eloszlás sűrűségfüggvényének alakja így a következőképpen alakul:

$$c(t, x = L) = \frac{1}{2}\sqrt{2}\sqrt{\frac{R \cdot L^2}{2 \cdot D_x \cdot \pi \cdot t^3}} \cdot e^{-\frac{1}{4} \cdot \frac{R \cdot \left(t - \frac{L}{v_x}\right)^2 \cdot}{\frac{1}{v_x^2} D_x t}} \qquad (12)$$

A kétparaméteres Inverz Gauss eloszlás problémája, hogy mivel az út hosszát ismerjük, a b paraméter értékéből a **(13.) egyenlet** segítségével a szivárgási sebesség számítható.

$$c + b = \frac{L_x}{v_x} \qquad (13)$$

Ezzel szemben az a paraméterből csak a D_x/R hányadost tudjuk kifejezni, a D_x-et nem:

$$a = \frac{L^2}{2D_x} \qquad (14)$$

Az R meghatározása külön egyenletek bevezetésével közvetve, nagy bizonytalanság árán végezhető el. A háromparaméteres Gauss eloszlás ezzel szemben amellett, hogy jobban illeszkedik, megoldást is ad a problémára. Ennél ugyanis megjelenik a c paraméter is, mely az abszolút késleltetési időt jelöli (nem összetévesztendő a relatív késleltetési tényezővel (R)). Az R értéke így közvetett úton, jó közelítéssel számítható az alábbi összefüggésből **(Dittrich et al 2014a)**:

$$R = \frac{c+b}{b} \qquad (15)$$

Így számíthatóvá válik a v_x mellett a D_x és R is, melyek a műtárgyban zajló transzport folyamatok leírásához elengedhetetlenek.

2.3.3. Sorba kapcsolt elkevert reaktor kaszkád modell

A második leggyakoribb modell a transzport folyamatok jellemzésére a sorba kapcsolt elkevert reaktor kaszkád modell. A modell elve: egymás után egyenlő térfogatú tökéletesen kevert reaktorokat kapcsolunk sorba, stacioner áramlás mellett, úgy, hogy az összekötő csövek térfogata legyen elhanyagolhatóan kicsi. Az első időpillanatban az első tökéletesen elkevert reaktorban a koncentráció **(Dittrich 2008a)**:

$$c_{1,0} = \frac{M_0}{V_1} \qquad (16)$$

N darab reaktor esetén a térfogat:

$$\sum V = n \cdot V_i \qquad (17)$$

A tartózkodási idő pedig:

$$\overline{t_{\sum V}} = \bar{t} \cdot n \qquad (18)$$

Így n darab sorba kapcsolt reaktor esetén a koncentráció impulzusra adott válaszfüggvénye:

$$f(t) = \frac{\left(\frac{t}{a}\right)^{b-1} e^{\left(-\frac{t}{a}\right)}}{a \cdot \Gamma(b)} \qquad (19)$$

A válaszfüggvény Gamma eloszlású **(Martin 2000).**

Végtelen számú reaktor esetén a rendszer egy olyan csővezetékkel egyenértékű, melyben dugószerű áramlás zajlik. Egyetlen reaktor esetén pedig, mivel tökéletesen elkevert reaktorról beszélünk, a diffúzió értéke a végtelenbe tart. Ha egy valódi gyökérzónás műtárgyat szeretnénk vizsgálni, meghatározható, hogy ezen végletek között hány darab tökéletesen elkevert reaktor segítségével írható le a műtárgyban zajló áramlás.

2.3.4. További eloszlás típusok sűrűségfüggvényei

A **2.3.2.** és **2.3.3. fejezetekben** két eloszlástípust ismertettem a C(x,t)-t síknegyedre vonatkozóan. Az 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzport egyenlet C(x,t)-t síknegyeden értelmezett sűrűségfüggvénye Inverz Gauss eloszlású, míg a sorba kapcsolt tökéletesen elkevert reaktor-kaszkád modellé Gamma eloszlást ad. A további kutatás ismertetéséhez szükség van néhány további függvény bemutatására is. Ezen függvények előzetes szűréssel lettek kiválasztva annak alapján, hogy a függvények alakja megfelel-e a kezdeti feltételeknek, majd konzervatív nyomjelzőanyag vizsgálatok mérési eredményeire való illeszkedés mértékének sorrendje alapján kiválasztásra került az öt legjobban illeszkedő eloszlástípus sűrűség függvénye (lásd **3.2.1. fejezet**) **(Dittrich 2013)**:

- Inverz Gauss eloszlás (3 paraméteres) (lásd **2.3.2. fejezet**)

sűrűségfüggvénye:

$$\mathbf{f(t,a,b,c) = \frac{1}{2}\sqrt{2}\sqrt{\frac{a}{\pi(t-c)^3}\, e^{-\frac{1a(t-c-b)^2}{2\ b^2(t-c)}}}} \qquad \mathbf{(20)}$$

- LogNormal (3 paraméteres)
  sűrűségfüggvénye:

$$\mathbf{f(t,a,b,c) = \frac{1}{2}\frac{\sqrt{2}e^{-\frac{1(\ln(t-c)-a)^2}{2\quad b^2}}}{(t-c)b\sqrt{\pi}}} \qquad \mathbf{(21)}$$

- Pearson5 (3 paraméteres)
  sűrűségfüggvénye:

$$\mathbf{f(t,a,b,c) = \frac{e^{\left(-\frac{b}{t-c}\right)}}{b\cdot\Gamma(a)\cdot\left(\frac{t-c}{b}\right)^{(a+1)}}} \qquad \mathbf{(22)}$$

- Frechet (3 paraméteres)
  sűrűségfüggvénye:

$$\mathbf{f(t,a,b,c) = \frac{a}{b}\cdot\left(\frac{b}{t-c}\right)^{a+1} e^{\left(-\left(\frac{b}{t-c}\right)^{a}\right)}} \qquad \mathbf{(23)}$$

- Fatigue Life (3 paraméteres)

  sűrűségfüggvénye:

$$\mathbf{f(t,a,b,c) = \frac{1}{4}\frac{\sqrt{\frac{t-c}{b}}+\sqrt{\frac{b}{t-c}}\sqrt{2}e^{-\frac{1}{2}\frac{\left(\sqrt{\frac{t-c}{b}}-\sqrt{\frac{b}{t-c}}\right)^2}{a^2}}}{a(t-c)\sqrt{\pi}}} \qquad \mathbf{(24)}$$

2.3.4. R^2 definiálása

Munkám során az illesztések pontosságának meghatározását a mérnökök által gyakran használt négyzetes hiba (R^2) segítségével végeztem el **(Govindaraju et al. 2007)**. A később ismertetett illesztési eljárások tehát azon alapulnak, hogy a megfelelő illesztés elérése érdekében az illesztett függvény mérési pontokra történő illeszkedése a lehető legnagyobb R^2 érték mellett történjen (leginkább közelítsen 1-hez). Az R^2 alkalmazását a nemzetközi szakirodalmi eredményekkel történő összehasonlíthatóság indokolja. Ezzel az eljárással tulajdonképpen a mérési eredmények és a hozzá tartozó függvényértékek közötti eltérések standardizált függőleges távolságának minimumát keressük. R^2 értéke az alábbi összefüggésből számítható:

$$\mathbf{R^2 = 1 - \frac{SSE}{TSS}} \qquad \mathbf{(25)}$$

$$\mathbf{TSS = \sum(Y_i - Y)^2} \qquad \mathbf{(26)}$$

$$\mathbf{SSE = \sum(Y_i - y_i)^2} \qquad \mathbf{(27)}$$

Ahol:

TSS a négyzetes eltérések összege,
SSE a mért és illesztett értékek közötti négyzetes hiba összege,
$\mathbf{Y_i}$ mért értékek,
Y mért értékek átlaga,
$\mathbf{y_i}$ illesztett függvény értékei
$\mathbf{Y_i}$ értékhelyén értelmezve.

3. Anyag és alkalmazott módszerek

3.1. A hódmezővásárhelyi gyökérzónás mintatelep bemutatása

A hódmezővásárhelyi gyökérzónás szennyvíztisztító telep rövid bemutatása azért fontos, mert a felhasznált mérési eredményeim ebből a műtárgyból származnak **(Dittrich 2013)**.

A telep kísérleti céllal épült, tudományos kutatás alapjául szolgál egy belga-magyar kutatási együttműködés keretében. A bevezetett szennyvíz egy közeli tejházból érkezik, a napi terhelés 1-1,5m^3/nap.

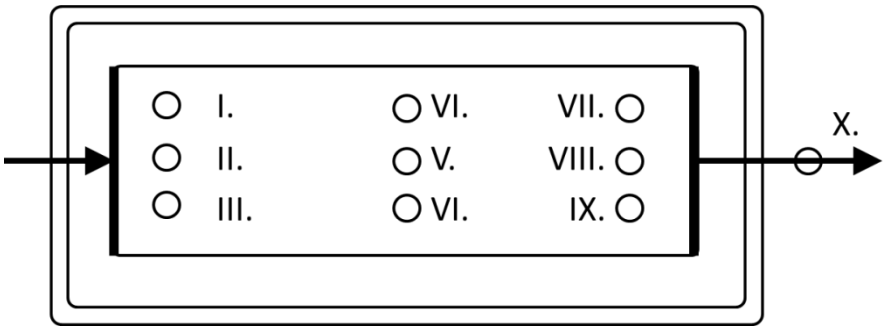
A mintatelep felépítése a következő: a szennyvíz először egy oldómedencébe kerül bevezetésre, ahol az ülepítés és anaerob biológiai lebontás zajlik. Innen egy átemelő műtárgy segítségével a függőleges átfolyású gyökérzónás reaktorba kerül. Itt különböző, elsősorban fizikai folyamatok és biokémiai reakciók révén tisztul. Ezt követi a hosszanti átfolyású műtárgy, ahol hosszabb ideig tartózkodik, mialatt komplex biológiai, kémiai és fizikai folyamatokon keresztül majdnem a végleges állapotába kerül. Ezután következik még egy utótisztító tó, majd a víz elszikkasztása egy nyárfás öntöző területen történik meg **(Dittrich 2013)**.

3. ábra A hódmezővásárhelyi gyökérzónás mintatelep függőleges, és vízszintes átfolyású műtárgya az utótisztító tóval (fotó: Dittrich Ernő 2007.07.16.)

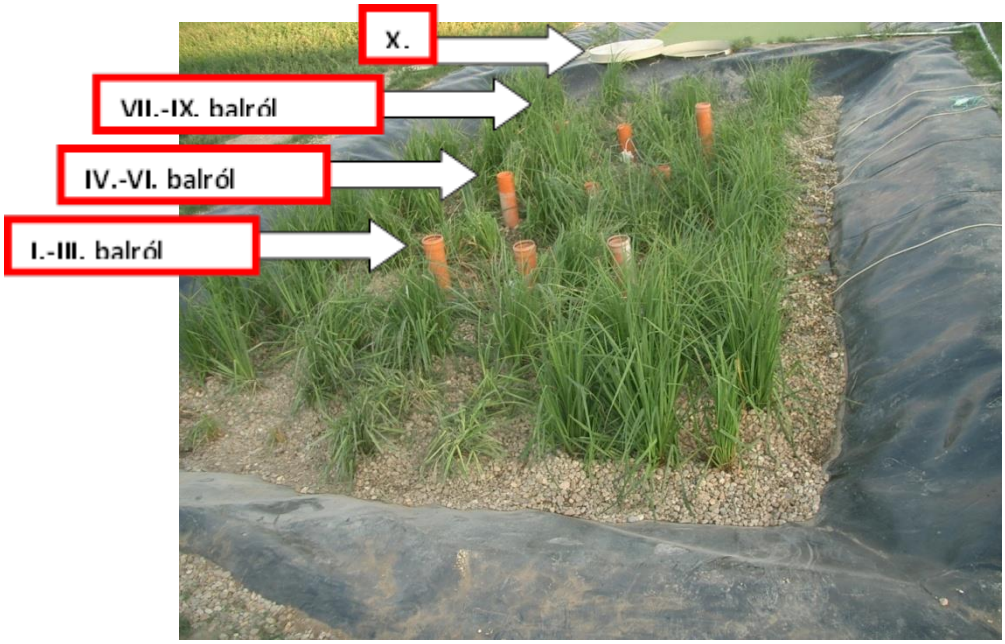
A telepen található hosszanti átfolyású gyökérzónás műtárgy részletes ismertetése az **1. sz. melléklet**ben található.

A telep üzemeltetése 2007.09.01-én kezdődött. Vizsgálataim szempontjából fontos az időpont, mivel az első mérési eredmények a 2007.09.02-i állapotokat tükrözik. A mintavételezéseket és az általam felhasznált mérési adatsorok létrehozását Kalocsai Edit 2008-ban végzett környezetmérnök hallgató, és Dittrich Ernő témavezetőm végezték el. A mintavételezés a következőképpen történt: a műtárgy belsejében 3 sorban 3, azaz összesen 9 mérési pont van, az alábbi ábrán látható módon I-IX-ig számozva. Ezeken a pontokon függőleges műanyag perforált csövek vannak a töltetbe beleállítva, és ezeken át történik a

mintavétel a vízmélység alsó és felső feléből a mérés zavarása nélkül. Ezáltal gyakorlatilag 18 mérési pont van. 4 alkalommal történt konzervatív nyomjelző anyag mérés, melynek adtasorait a **2. melléklet** tartalmazza. Van még egy külső, a műtárgy kivezető csövén lévő mérési pont is (X), ennek vizsgálata már megtörtént **(Dittrich 2013, Dittrich et al 2014a, Dittrich et al 2014b).** Az ott publikált eredmények tükrében végeztem el ugyanazokat a vizsgálatokat, illetve azok továbbfejlesztését a belső pontokra.

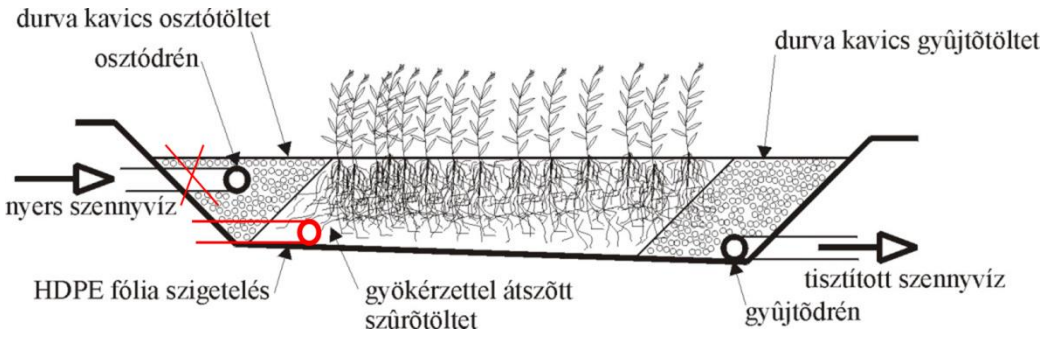


4. ábra A vízszintes átfolyású műtárgy felülnézeti rajza a mérési pontokkal



5. ábra A vízszintes átfolyású műtárgyban kialakított mintavételi helyek (Dittrich E. 2007.09.02.)

Itt fontos megjegyezni, hogy a tervezési gyakorlattal, és a kiviteli tervvel ellentétben az osztódrén helyzete eltérő helyen, a műtárgy alján, a rézsű talpvonalánál 0,8m-el beljebb került elhelyezésre, mely kivitelezési hiba és kihatással lesz a későbbi eredményekre.



6. ábra Az osztódrén helyzete a hosszanti átfolyású műtárgyban

3.2. A statisztikai vizsgálatokhoz szükséges matematikai eljárások és szoftverek bemutatása

3.2.1. A statisztikai vizsgálatokhoz szükséges függvények előzetes szűrése

Nemzetközi publikációkban olvasható, hogy egyes szerzők konzervatív nyomjelző anyagvizsgálataik során nem találták megfelelőnek sem az 1 dimenziós konzervatív nyomjelző anyag transzport, sem a sorba kapcsolt tökéletesen kevert reaktor kaszkád modell sűrűségfüggvényeinek illeszkedését hosszanti átfolyású gyökérzónás műtárgyakban. Ennek okát azonban nem közölték, és nem tudták egyértelműen bizonyítani, hogy ezek a modellek nem alkalmasak a transzport folyamatok leírására **(Breen et al. 1995, Rash et al. 1999, Batchelor et al. 1996, King et al. 1997)**. Első körben ezért meg kell vizsgálni az Inverz Gauss és a Gamma eloszlásokat. A negatív tapasztalatok miatt azonban szükséges további eloszlások vizsgálata, egyelőre pusztán statisztikai szempontból, fizikai tartalom nélkül annak érdekében, hogy megtaláljuk azt az eloszlás típust, mely a lehető legkisebb hibával közelíti a konzervatív nyomjelzőanyag vizsgálatok C(x,t)-t síknegyeden ábrázolt mérési eredményeit. Ez utóbbinak célja a konzervatív nyomjelző anyag mérési hiányosságok mérséklése.

A feladat megoldására alkalmas eloszlás függvény típusok előzetes szűrése Easy Fit program segítségével történt öt olyan nemzetközi mérési eredményre **(King et al 1997, Tanner et al, 1995)**, melyek elég részletesek voltak ahhoz, hogy ezek a vizsgálatok elvégezhetőek legyenek, továbbá a **3.1. fejezetben** említett X. mérési pontra. Azért ez a program lett kiválasztva, mert ebbe az összes fontos eloszlás típus be van építve, melyet a matematikai életben gyakran használnak. A program vizsgálta az illeszkedést az összes beépített eloszlástípusra, majd az illeszkedést Kolmogorov-Smirnov teszt, Anderson-Darling teszt, Chi-négyzet próba segítségével értékelte. Azon függvények, melyek nem adtak ki aszimmetrikus haranggörbe alakot, kizárásra kerültek, továbbá azok is, melyek a leggyengébb illeszkedési eredményeket adták. A Gamma eloszlás itt került kizárásra. További célirányos vizsgálatoknak, így a t=0 időpontban a C=0 feltétel teljesülése, e pont és az illesztett függvény maximuma közötti inflexiós pont, és az aszimmetrikus függvénykép kritériumainak a következő öt eloszlás felelt meg az illeszkedés sorrendjében:

- Fatigue Life (2P és 3P)
- Lognormál (2p és 3P)
- Frechet (2P és 3P)
- Pearson5 (2P és 3P)

- Inv. Gauss (2P (Fick-féle eloszlás) és 3P)

A fentebbi felsorolásban a „2P” 2 paraméteres és a „3P” 3 paraméteres eloszlást jelent. A konzervatív nyomjelző anyag transzport vizsgálataim során ezeket a függvényeket illesztettem rá a műtárgy belső pontjainak mérési eredményeire.

Az előzetes szűrés alapján bizonyításra került, hogy a Gamma eloszlás nem megfelelő illeszkedése miatt a jelenleg is használt sorba kapcsolt reaktor kaszkád modell nem alkalmas a hosszanti átfolyású gyökérzónás műtárgyak transzport folyamatainak megfelelő pontosságú leírására.

3.2.2. Az eloszlás típusok sűrűségfüggvényeinek további részletes elemzéséhez használt szoftver bemutatása

A munkám során a mérési eredmények C(x,t)-t síknegyeden ábrázolt pontjaira a **2.3.4.** és **3.2.1. fejezetekben** ismertetett függvények illesztését egy Maple 12 nevű szoftverben egy egyedileg elkészített program segítségével végeztem el **(Dittrich et al. 2014a)**. A program elve a következő feltételekből indul ki (ezek a paraméterek a vizsgálat idején biztosítva voltak):

- A műtárgy vízzáróan szigetelt, azaz a teljes térfogatáram átáramlik rajta.
- A műtárgy hidraulikai terhelése a mérés időtartama alatt konstans.
- A mérés ősszel történt, csapadékmentes időben, az evapotranszspiráció mértéke elhanyagolható.
- A háttér-koncentráció értéke zérus.
- A műtárgy kavics töltetű.
- Nincs felszíni átfolyás vagy egyéb jelentős hidraulikai rövidzárlat, ebből következik, hogy a függvény egycsúcsú, és a kezdőpont és maximum pont érték között egyetlen inflexiós pont van.
- A kezdeti időpillanatban a koncentráció a műtárgy minden pontján zérus: ha $t_0=0$, akkor $C_0=0$
- A koncentráció időben előrehaladva a végtelenben tart a nullához: ha $t\rightarrow\infty$ akkor $C_\infty\rightarrow 0$
- A függvény alatti területre 100%-os nyomjelzőanyag-visszatérülés esetén fennáll, hogy

  $$\mathbf{A=M/Q,} \qquad \mathbf{(28)}$$

  ahol:
  - A: a függvény alatti terület,
  - M: a beinjektált nyomjelző anyag tömeg,
  - Q: a szennyvíz hozam
- Az illesztett függvény a lehető legjobban illeszkedjen a mérési pontokhoz ($R^2\rightarrow 1$)

Az illesztett öt függvény mindegyike háromparaméteres, de a program a c=0 feltételt is vizsgálja, és bizonyos esetekben előfordul, hogy a függvény kétparaméteres változata adja a megfelelőbb illesztést. A c paraméter a késleltetést jelenti.

A program matematikai működésének elve:

A program az eloszlás sűrűségfüggvényének deriváltját 0-val egyenlővé téve keresi a függvény maximum helyének függvényeit a,b,c paraméterekre vonatkozóan. Ezt követően a mérési pontok maximumát definiálja a függvény előzetes közelítő maximum helyének, majd egyenlővé teszi ezt a maximumot az a, b, c maximum hely függvényeivel, és ezek segítségével számítja az a, b, c maximum helyhez tartozó közelítő értékeit. Ezt követően a legjobban illeszkedő függvény képeinek megkeresése numerikusan történik. A 0,5a – 1,5a, 0,5b – 1,5b és c=0 – t(max)/2 (t(max): a legnagyobb mért függvényértékhez tartozó időpont) közötti tartományban a program egy 3 dimenziós mátrixot rögzít, melynek oldalai 20x20x30 egyenlő szakaszra vannak osztva, mintegy rácsszerűen felosztva a teret. A rács metszéspontjai az a,b,c paraméterek értékeinek metszéspontjai. A program minden egyes rácspontban értelmezett a, b, c paraméter értékeire vizsgálja a függvény képét, majd kiválasztja az R^2 segítségével a legjobban illeszkedő függvényképet. Ezután ezen pont közvetlen környezetében végzi el ismét a felosztást. Az újabb felosztások segítségével addig végzi a közelítést, míg a kapott függvények képéhez tartozó R^2-ek értékeinél a 4. tizedes jegyben el nem tűnik az eltérés.

A program segítségével tehát megkapom az adott függvény legjobb R^2 melletti illesztési képét, valamint azokat az a, b, c paraméter értékeket, melyek mellett ez az illesztés létrejött. A vizsgálat eredményeit a **3. sz. melléklet** tartalmazza, ezen eredmények a **4.1.** és **4.2. fejezetben** kerülnek kiértékelésre.

3.2.3 A Maple környezetben egyedileg elkészített program eddigi eredményei

Az egyedileg készített Maple program illesztése eddig 9 mérési adatsorra történt meg. Ezek közül 5 adatsor nemzetközi szakirodalomból származik **(Tanner et al. 1995, King et al. 1997)** (jelölésük: N1, N2, N3, N4, N5). A másik négy adatsort a hódmezővásárhelyi vízszintes átfolyású műtárgy X. pontjának négy különböző időpontban vett mérési eredményei adják (jelülésük S1, S2, S3, S4). E 9 adatsor mérési pontjaira való illesztési eredményeket ismertetem röviden **(Dittrich et al. 2014a)** publikációja alapján.

Az öt nemzetközi szakirodalmi mérési sorozatból kettő (N2, N4) adott kifejezetten rossz eredményt. Ennek oka, hogy a műtárgyak növényzet nélküliek voltak. Ezen mérési sorozatok így kizárásra kerültek, további vizsgálatok a két műtárggyal kapcsolatban nem történtek. Az eredményekből levonható következtetés, hogy a további elemzések eredményei kizárólag a növényzettel beültetett műtárgyakra érvényesek.

A maradék hét adatsor vizsgálata szerint szép illeszkedést csak a Frechet és a Pearson5 függvények adtak, hiszen az illesztési eredmények mindegyike $R^2>0,95$ feletti értéket adott, de az előzetes szűrések során kapott sorrend is alátámasztja ezeknek a függvényeknek az illesztési helyességét (**3.2.1.** fejezet). A LogNormal, Inverz Gauss és Fatigue Life függvények esetén ezzel szemben bizonyos mérési eredmények nem érik el a 0,95 értéket, ezért ezek kizárhatóak a további elemzések szempontjából.

Az Inverz Gauss eloszlásról az eredmények szerint elmondható, hogy bár az újonnan kialakított műtárgyak mérési pontjaira az öt függvény közül ez illeszkedik a legjobban, azonban a műtárgy korával nő a pontatlansága.

Az alábbi táblázatban látható a függvények átlagos illeszkedése és sorrendje.

1. táblázat A függvények illeszkedési sorrendje a X. pontra és a nemzetközi adatsorokra (Dittrich 2013; Dittrich et al. 2014a)

Eloszlás típus	R^2 átlaga (-)	Sorrend
Frechet	0,9867	I.
Pearson5	0,9839	II.
Fatigue Life	0,9779	III.
Inverz Gauss	0,9769	IV.
LogNormál	0,9714	V.

Az eredmények azt mutatják, hogy a Frechet és Pearson5 eloszlások értékei igen közel vannak egymáshoz, ám a függvényképüket vizsgálva a Frechet mutatkozik rugalmasabbnak. A többi eloszlás e kettőtől nagyobb eltérést mutat.

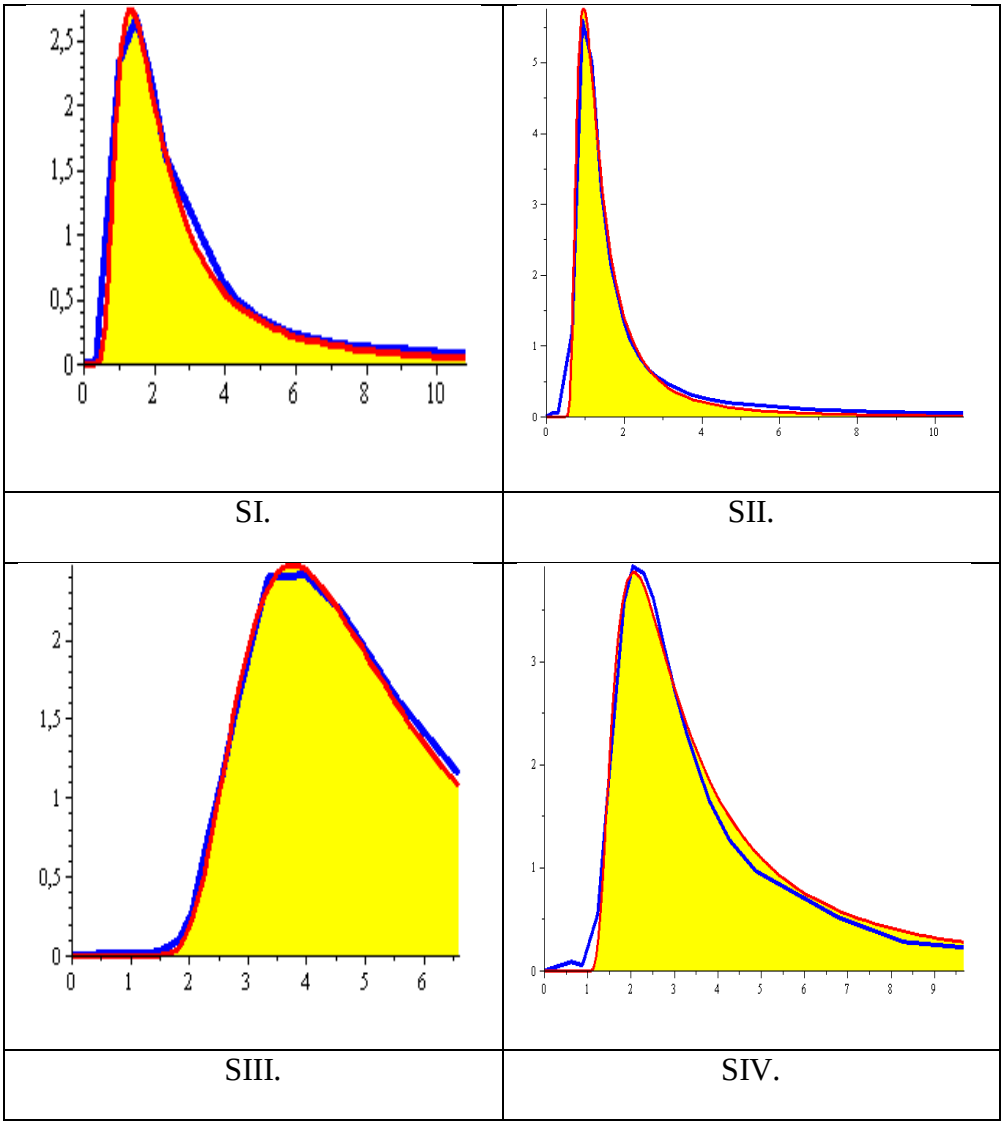
Ezzel az eredménnyel bizonyítást nyert, hogy a nemzetközileg elfogadott 1 dimenziós konvektív-diszperzív egyenlet C(x,t)-t síknegyeden vizsgált eloszlás sűrűségfüggvénye (Inverz Gauss) nem alkalmas a konzervatív nyomjelző anyag transzport vizsgálatok esetében a koncentráció idő szerinti alakulásának leírására megfelelő pontossággal.

Az eddigi eredmények tehát egyértelműen bizonyítják, hogy sem az 1 dimenziós konvektív-diszperzív egyenlet, sem a sorba kapcsolt elkevert reaktor modell nem alkalmas a hosszanti átfolyású kavicstöltetű gyökérzónás műtárgyak transzportfolyamatainak elemzésére **(Dittrich 2013)**.

Pozitív eredmény ezzel szemben az, hogy a diszkrét mérési pontok folytonos függvénnyel helyettesíthetők, ezáltal az áramlástani folyamatokat leíró paraméterek kiszámíthatóvá, a számítási hibák mérsékelhetővé válnak.

A Frechet eloszlás sűrűségfüggvényeinek illeszkedése az S1-S4 adatsorokra:

2. táblázat A Frechet eloszlás illesztési képei az SI-SIV. pontokra (Dittrich 2013)



3.2.4. Osztott konvektív-diszperzív transzport modell

E modell létrejöttének oka, mint később majd bizonyítást nyer, hogy míg az előbbi illesztések esetén az illesztési program alapfeltétele volt, hogy a függvény kizárólag egycsúcsú lehet, a valóságban a mérési eredmények képei nem csak egy csúcs jelenlétéről tanúskodnak. Ez különösen igaz az általam vizsgált belső pontok mérési eredményeire. Ennek a jelenségnek egyszerű oka, hogy a műtárgy alsó részében zajló kényszer-áramlások hatására kialakul egy főáram, a holtteresedésre hajlamos mikropórus rendszerben pedig egy lassabb mellékáram. Az osztott konvektív-diszperzív modell lényege, hogy egy függvény helyett két függvény összegével próbálja meg szimulálni a mérési pontokat. Az első görbe a főáramot követi, a második a mellékáramok leírására állít elő egy görbét. Mindkét görbe egy-egy Inverz Gauss eloszlású függvény. A rossz eredmények és a kizárás ellenére a függvény kiválasztásának egyszerű oka, hogy amíg a Frechet eloszlás sűrűségfüggvénye mögött fizikai tartalom mindeddig nem ismert, az Inverz Gauss ezzel szemben átvezethető a tervezési gyakorlatba a fizikai tényezők számíthatóságának segítségével (lásd **2.3.2. fejezet**) **(Dittrich et al. 2014b)**.

A modell felállításához azonban szükséges néhány kikötés:

- Mindkét Inverz Gauss görbére jellemző, hogy amennyiben
  $t_0=0$ akkor $C_0=0$,
  ha $t\rightarrow\infty$ akkor $C_\infty\rightarrow 0$
- Az 1. Inverz Gauss görbe késleltetése (c_1) a kiváló illeszkedésű Frechet eloszlás sűrűségfüggvényének c értékével közel egyenlő.
- A 2. Inverz Gauss görbe késleltetése nagyobb vagy egyenlő az 1. Inverz Gauss görbe késleltetésénél.
- A két Inverz Gauss görbe alatti terület meg kell, hogy egyezzen a 100% nyomjelző anyag visszatérülésre jellemző területtel:

  A(G)=M/Q (29)
- A két Inverz Gauss függvény összegéből előállított görbének a lehető legkisebb eltéréssel kell illeszkednie a mérési eredményekhez ($R^2\rightarrow 1$)

Mivel 100%-os nyomjelző anyag visszatérülést feltételezünk, ebből következik, hogy a két függvény alatti terület összegének egyenlőnek kell lenni a Frechet eloszlás illesztésekor használt függvény alatti területtel. A két Inverz Gauss függvény területének arányára bevezetésre került egy S paraméter, mely az 1. Inverz Gauss függvény és a teljes függvény alatti terület hányadosa.

A modell úgy működik, hogy először a mérési pontok gyorsan felfutó szakaszára illeszti az első Inverz Gauss görbét. Ezt követően előállítja az 1. görbe és a mérési pontok eltérését, majd az így kapott pontokra illeszti a 2. görbét.

Mivel az S paraméter értéke becsléssel lett meghatározva, a paraméter értékét addig kell finomítani, míg 0,01-os pontossággal el nem érjük a legjobb illeszkedést. Az illesztés a **3.2.2. fejezetben** bemutatott módszeren alapul, és szintén Maple környezetben történik. A numerikus optimalizációs idő csökkentése érdekében a módszer a korábban már illesztett Frechet eloszlás maximumhelyének környezetében keresi a két Inverz Gauss görbe maximumhelyét, ezzel a modell lefutását akadályozó szinguláris pontok is kikerülhetők **(Dittrich et al 2014b)**.

3.2.5. Az osztott konvektív-diszperzív modell illesztési eredményei

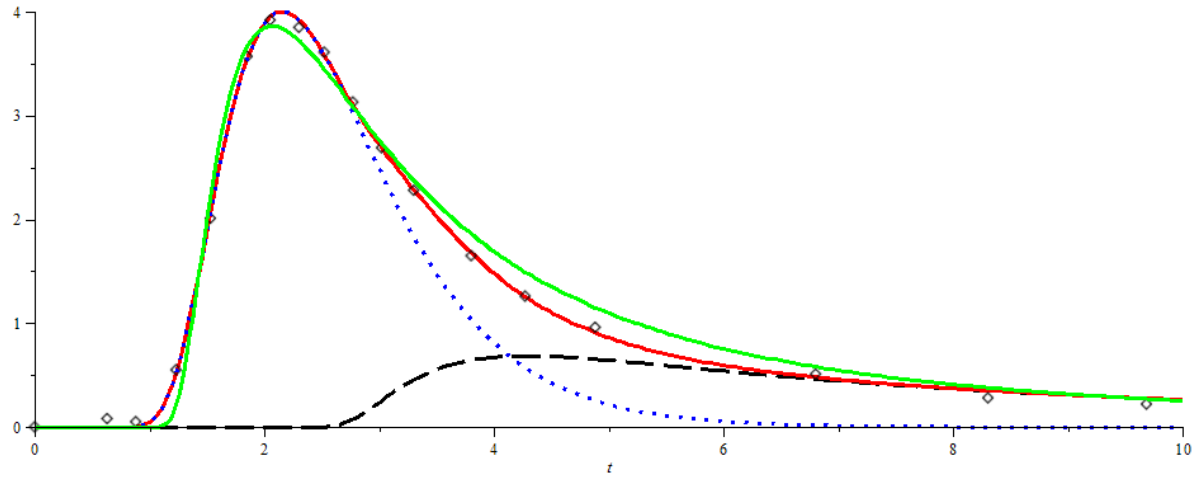
A modell illesztése a **3.2.3**. fejezetben ismertetett 7 mérési adatsorra történt meg, azaz a négy hódmezővásárhelyi mérésre, és a három nemzetközi mérési eredményre. (S1, S2, S3, S4, N1, N3, N5). A vizsgálat során kiderült, hogy az osztott modell jobban illeszkedik minden pontra még a nagyon jól illeszkedő a Frechet eloszlásnál is, és az összehasonlítás kedvéért az Inverz Gauss eloszlásnál ugyanez a tapasztalat. Az R^2 értékeket a következő táblázat tartalmazza:

3. táblázat A Frechet, Inverz Gauss eloszlások és az osztott modell illesztése a X. pontra és a nemzetközi adatsorokra (Dittrich et al. 2014b)

Adatsor	Frechet	Inverz Gauss	1 dimenziós osztott konv.-diszp. modell
N1	0,981	0,988	0,992
N3	0,992	0,981	0,995
N5	0,952	0,925	0,978
S1	0,997	0,998	0,999

S2	0,998	0,976	0,999
S3	0,998	0,975	0,999
S4	0,989	0,975	0,999
Átlag	**0,987**	**0,977**	**0,994**

Látható, hogy az osztott modell szinte minden esetben 99% feletti pontosságú illesztési eredményt adott, a hódmezővásárhelyi mérési eredményekre pedig kiemelkedő, 99,9%-os egyezés figyelhető meg. Ezen illesztések közül az S4 jelű mérési eredményt kiemelném, mely a hódmezővásárhelyi műtárgy kifolyási szelvényénél (X. pont) mért 2008.05.29-i adatsorra vonatkozik, a többi időponthoz tartozó eredmény a hivatkozott publikációkban **(Dittrich 2013, Dittrich et al. 2014b)** található.



7. ábra Az 1 dimenziós osztott konvektív-diszperzív transzport modell és a Frechet eloszlás illeszkedése az S4 jelű mérési eredményekre (Dittrich et al. 2013)

Az ábrán a zöld vonal a Frechet eloszlás illeszkedését mutatja, a pontozott vonal az 1. Inverz Gauss görbét, a szaggatott a 2. Inverz Gauss görbe, a piros vonal pedig a kettő függvény összegét, azaz az osztott konvektív-diszperzív modell lefutását. Az ábrán jól látható a kifejlesztett modell kiemelkedő pontossága.

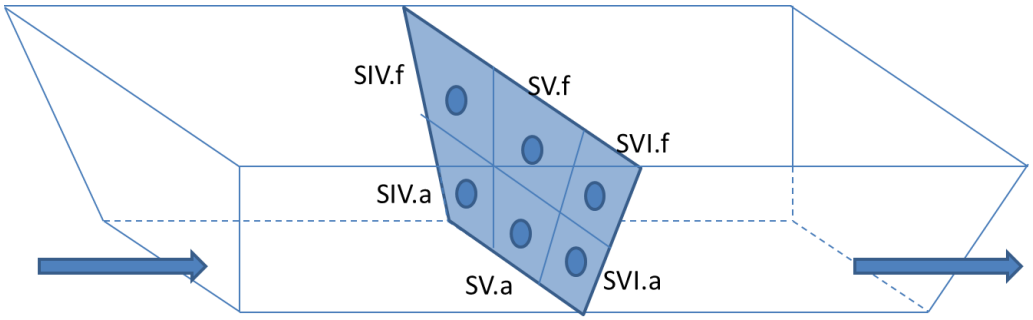
3.2.6. A mérési pontokon átáramló tényleges vízhozam meghatározása a függvény alatti terület finomításával az illesztési kép és az R^2 segítségével

Az eddigi programok úgy végzik el a számításokat, hogy közben a műtárgy minden pontjában konstans térfogatáramot feltételezünk, azaz az

$$A=M/Q, \qquad (30)$$

egyenlet alapján a függvény alatti terület is konstans. Mivel a műtárgy egy szelvényét vizsgálva a valóságban ez a **3.2.2. fejezetben** rögzített feltétel nem igaz a szelvény minden egyes pontjára, így minden mérési pontra sem. Ennek oka az áramlás keresztmetszet menti diverzitása. Az alábbi ábra a mérési szelvény elhelyezkedését szemlélteti a példa kedvéért a IV-VI. mérési pontokkal. A szelvény felosztása azt a felületet mutatja, melyen a szennyvíz keresztül haladva az adott pont feltételezett térfogatáramát adja. Ez azonban a valóságban

korántsem így van. Az adott terület porozitása, eltömődési folyamatai, biofilm-aktivitása, a növényzet gyökérzetének helyzete befolyásolja azt, hogy az egyes pontokon a teljes térfogatáram hány százaléka halad át ténylegesen. A térfogatáram műtárgybeli változékonysága pedig azt eredményezi, hogy a függvény alatti területeket sem vehetjük konstansnak.



8. ábra A vízszintes átfolyású műtárgy második szelvénye a mintavételi helyekkel

Mivel a Maple szoftverben egyedileg készített illesztési eljárás egyik bemenő adata a függvény alatti terület, a megoldás kézenfekvő: a konstans térfogatáram mellett feltételezett függvény alatti területre kapott legjobb illeszkedésből kiindulva manuálisan változtattam a függvény alatti terület értékét mindaddig, amíg meg nem kaptam azt az értéket 0,001 pontossággal, mely a legjobban közelítette a mérési pontokat. Az elv szerint, ha a végén összeadom a szelvény egyes pontjaira kapott függvény alatti területeket, megkapom az eredeti függvény alatti területek összegét:

$$\sum_{i=1}^{6} A_{i,korr} = \sum_{i=1}^{6} A_{i,konst} \qquad (31)$$

A számítás eredményeit a **4.3. fejezet** tartalmazza.

4. Eredmények és értékelés

Munkám során a **2. sz. mellékletben** található adatsorokra illesztettem a **2.3. fejezetben** bemutatott Fatigue Life, Frechet, Invez Gauss, LogNormal, és Pearson5 függvényeket. Az illesztéshez a **3.2.2. fejezetben** ismertetett Maple szoftverben egyedileg készített programot használtam. A program bemeneti értékeit tehát a **2. melléklet** koncentráció és idő értékei, valamint az előre definiált függvény alatti területek adják. Az illesztés eredményeképpen megkaptam a mérési pontok helyzetét, valamint az illesztett függvény képét, továbbá az illeszkedés mértékét (R^2), és az a,b,c paraméterek értékeit. A következő alfejezetek során keresem azt a függvényt, mely legjobban illeszkedik a hódmezővásárhelyi gyökérzónás műtárgy belső pontjainak mérési eredményeire, és legrugalmasabban kezeli a műtárgyban kialakuló áramlástorzító folyamatokat. Kutatási munkám ezen részének célja megvizsgálni azt, hogy **Dittrich (2013)** munkájában a kifolyási pontra legjobbnak ítélt Frechet eloszlás a belső pontok esetében is a legjobb illeszkedést adja-e. Először bemutatom azokat a kapott illeszkedéseket, melyek a vizsgálat szempontjából értékes eredményeket tartalmaznak, és általánosságban jellemzem az adott függvényképeket, kitérve arra, hogy az illesztési kép milyen fizikai folyamatok jelenlétét tükrözi. Ezt követően a mérési pontokra kapott R^2 értékek alapján hasonlítom össze az egyes függvényeket, ehhez ezen értékek különböző szempontok szerint vett átlagát vizsgálom. A kiértékelés során folyamatos összehasonlításokat végzek a korábbi eredményekkel (lásd **3.2.3. fejezet**).

A kiértékelést a további célirányos vizsgálati módszerek megjelölésével, és azok eredményeivel folytatom. Először ismertetem a függvény alatti területek optimalizálásával kapott illeszkedések eredményeit, majd az eredményeket elemezve bemutatom az optimalizálás során felmerülő problémákat, és azok okait, valamint a probléma megoldását. Ezt követően az osztott konvektív-diszperzív modell eredményeit részletezem, kitérve az egyes paraméterek jelentőségére, a függvény alatti területek értékeiből levonható következtetésekre, valamint a két Inverz Gauss függvény területének arányainak alakulására.

Az egyes pontokra kapott R^2 értékeket, valamint a függvények illesztési képeit a **3-4. sz. melléklet** tartalmazza. A függvény alatti terület optimalizálásának eredményeit, és a kapott függvényképeket azok hibái miatt csak röviden mutatom be a **4.3. fejezetben**, a többi függvény képének bemutatásától eltekintek. Az osztott modell függvényképeit a **9. sz. melléklet** tartalmazza. A továbbiakban ezen mellékletek figyelembe vételével végzem el a kiértékelést.

4.1. Az öt függvény illeszkedésének mértéke, függvényképek

A következő négy alfejezetben bemutatom az egyes mérési időpontokban a kapott illesztések eredményeit, és ismertetem a műtárgyban zajló áramlástani folyamatok alakulását az illesztési képek elemzésének segítségével.

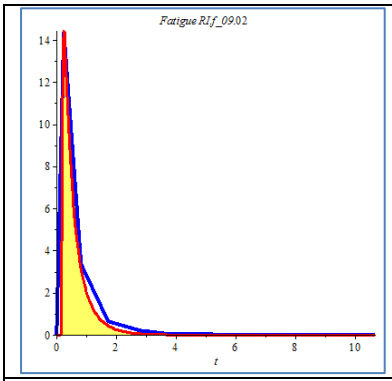
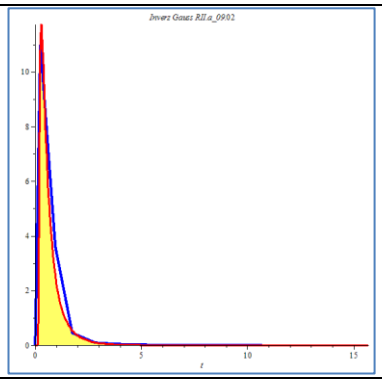
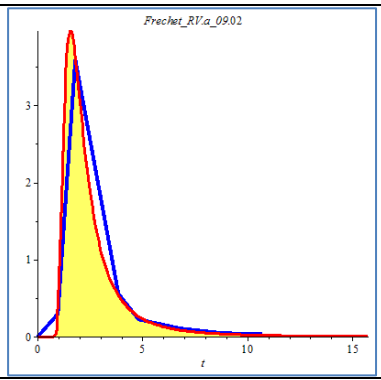
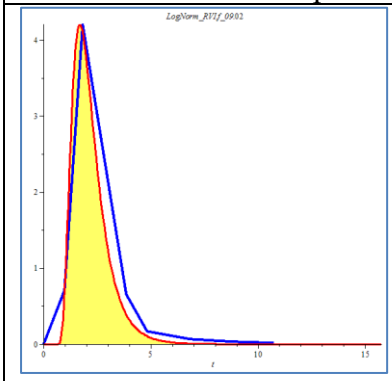
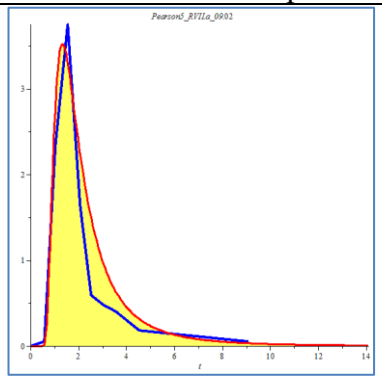
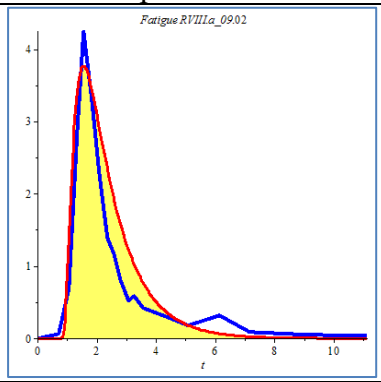
4.1.1. 2007.09.02-i mérés

Ez a mérés elsősorban azért érdekes, mert a mintavételi adatok a kétnapos műtárgyra vonatkoznak. (Az üzembe helyezés 2007.09.01-én történt.) Általánosságban elmondható, hogy az I-III. pontokra való illesztések szép eredményeket adtak. Ezekre a pontokra gyors felfutású, csúcsos görbék jellemzőek. A IV-VI. pontokra, azaz a második szelvényre

szélesebb, laposabb görbék jellemzőek a diszperzió hatásának érvényesülése miatt. A VII-IX pontok esetében a mérési eredmények már nem simultak bele a függvény lefutásába, hanem kisebb-nagyobb kiugrásokat tartalmaztak, így az illesztés eredménye jelentősen romlott.

Az alábbi táblázat néhány függvényképet mutat be az előbbi értékelés alátámasztására, a többi mérési pontra az öt függvény illesztése a **4. sz. mellékletben** található. (A függőleges tengelyen a konzervatív nyomjelző anyag koncentráció [mg/l], a vízszintes tengelyen pedig az eltelt idő [h] értékei vannak feltüntetve, a kék vonal a mérési eredmények diszkrét pontjait köti össze, míg a piros vonal a függvényt, a sárga színezés pedig a függvény alatti területet jelöli.)

4. táblázat A függvények illeszkedései az 1. mérési időpontra

		
Fatigue-Life eloszlás illeszkedése az I. felső pontra	Inverz Gauss eloszlás illeszkedése a II. alsó pontra	Frechet eloszlás illeszkedése az V. alsó pontra
		
LogNormal eloszlás illeszkedése a VI. felső pontra	Pearson5 eloszlás illeszkedése a VII. alsó pontra	Fatigue Life eloszlás illeszkedése a VIII. alsó pontra

Itt fontos megemlítenem, hogy a VII. alsó pontra kaptam először kifejezetten rossz eredményeket, ezeket a következő táblázat tartalmazza. Jól látható, hogy ennél a pontnál egyik függvény sem tudta kellő rugalmassággal kezelni a mérési eredmények szokatlan helyzetét, csak a Frechet eloszlás adott 0,95 feletti eredményt.

5. táblázat Az egyes függvények illeszkedése a VII.a pontra

Eloszlás típus	**R^2 értéke**
Fatigue Life	0,8047

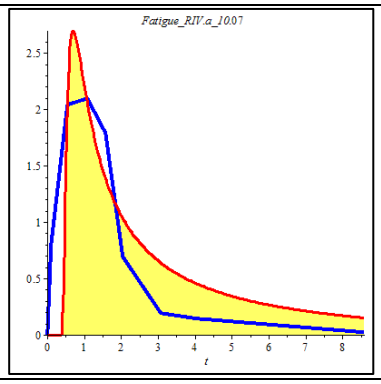
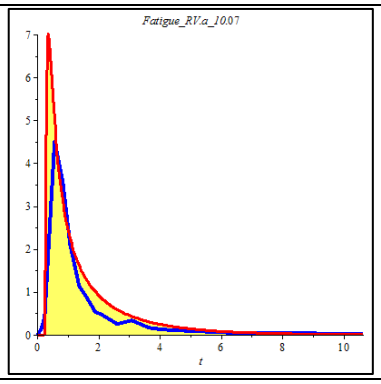
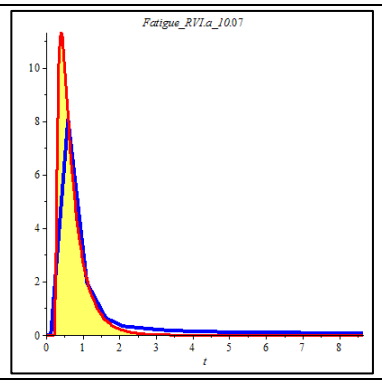
Frechet	0,9651
Inverz Gauss	0,8126
LogNormal	0,8481
Pearson	0,8576

Az első mérési időpontra az R^2 értékek átlaga minden függvény esetében 0,95 feletti értéket adott (lásd **4.2.1. fejezet**).

4.1.2. 2007.10.07-i mérés

Ennek a mérésnek az eredményei a kicsit több mint egy hónapos műtárgy áramlástani rendszerének alakulását tükrözi. Az első három mérési pont esetén itt is hasonlóan szép illesztéseket kaptam. A második szelvény esetében azonban itt csak a IV. pontra kaptam laposabb függvényeket a 09.02-i mérésekhez hasonlóan, az V-VI. pontok függvényeinek képe ezzel szemben ugyanolyan karcsú, mint az első szelvény függvényképei. Ez a jelenség valószínűleg a **3.2.6. fejezetben** ismertetett inhomogén térfogatáram-eloszlás következménye. A harmadik szelvény függvényképei is hasonlóak a szeptemberi mérés eredményeihez. A IV. pont képeit egy tetszőlegesen kiválasztott függvényre, a Fatigue Life eloszlásra mutatom be az összehasonlíthatóság kedvéért, de bármelyik függvény jól illusztrálta volna a fenti megállapítást.

6. táblázat Fatigue Life eloszlás illeszkedése a IV-V-VI. mérési helyek alsó mintavételi pontjaira

		
IV.a	V.a	VI.a

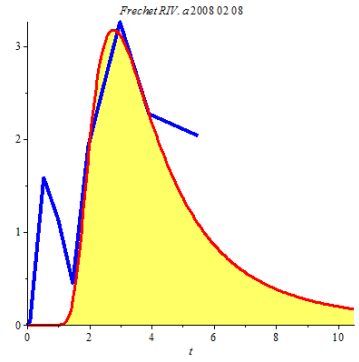
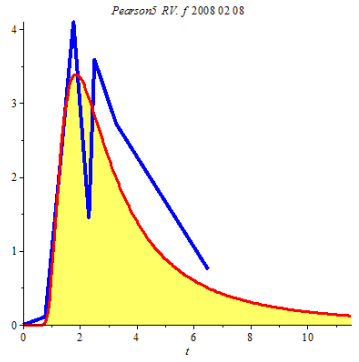
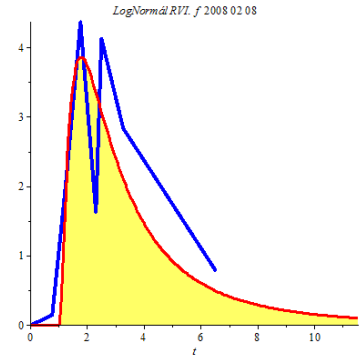
A függvények illeszkedésének mértéke nem sokkal maradt el a szeptemberi eredményektől, de a LogNormal és az Inverz Gauss esetében ez az átlag 0,95 R^2 érték alá esett (lásd **4.2.1. fejezet**).

4.1.3. 2008.02.08-i mérés

Ezen időpont méréseire volt talán a legnehezebb függvényt illeszteni. Az első két szelvény esetében (I-VI. pont) minden függvény képe azt tükrözte, hogy a megadott függvény alatti terület túl kicsi, kizárólag a harmadik szelvény esetében egyezik meg közelítőleg a mérési pontok által kirajzolt területtel. Ennek a jelenségnek az volt az oka, hogy a szennyvíz műszaki hiba miatt egy ideig előtisztítás nélkül lett rávezetve a függőleges átfolyású műtárgyra, és ennek hatása a vízszintes átfolyású műtárgyban is jelentős mértékű eltömődésekhez vezetett. A szennyeződés később el lett távolítva a töltet átmosásával, így a későbbi mérési

eredményeket ez már nem befolyásolta. A másik ok az, hogy az öt hónapos műtárgyban a sás gyökérzete is kellően kifejlődött már, így az is további áramlásbeli torzulásokat eredményezett. A főáram mellett tehát a holtterek kialakulása, az intenzív biofilm-aktivitás, és az eltömődési folyamatok miatt jelentős a mellékáram szerepe. Ez a függvény képeken a következőképpen mutatkozik meg:

7. táblázat: A mellékáram intenzív jelenlétét mutató függvényképek

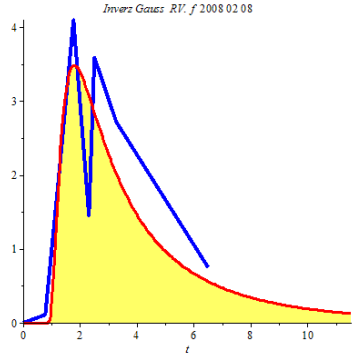
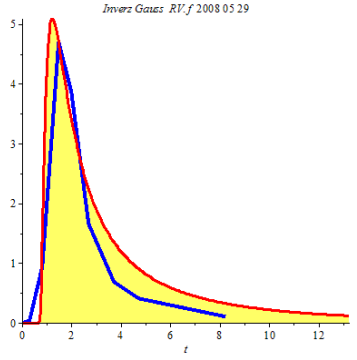
		
Frechet eloszlás illeszkedése a IV. alsó pontra	Pearson5 eloszlás illeszkedése az V. felső pontra	LogNormal eloszlás illeszkedése a VI. felső pontra

A grafikonok egyértelműen mutatják, hogy ezen mérési pontok esetében fontos szerepe lesz a később elemzésre kerülő osztott konvektív-diszperzív modell alkalmazásának (**3.2.4. fejezet**). Ezen kívül a függvény alatti területek **3.2.6. fejezetben** módszertanilag bemutatott optimalizálása is szükséges.

4.1.4. 2008.05.29-i mérés

Az utolsó mérési időpont eredményei már szebb képet adnak, köszönhetően a műtárgytöltet megtisztításának. Ezeket a mérési eredményeket összehasonlítva a 02.08-i méréssel, megkapjuk, hogy a magas lebegőanyag tartalmú szennyvíz-rávezetés mennyiben járult hozzá a mérési eredmények torzulásához. Vegyük például az Inverz Gauss 02.08-i és 05.29-i mérés V. felső mérési pontra illesztett képeit és az azokhoz tartozó R^2 értékeket:

8. táblázat A direkt szennyvíz rávezetés mellékáramok kialakulásához való hozzájárulásának bemutatása egy tetszőeleges pontra való tetszőlegesen választott függvény 3. és 4. mérési időpontra vonatkozó illesztési képének összehasonlításával

2008.02.08.	2008.05.29.
	

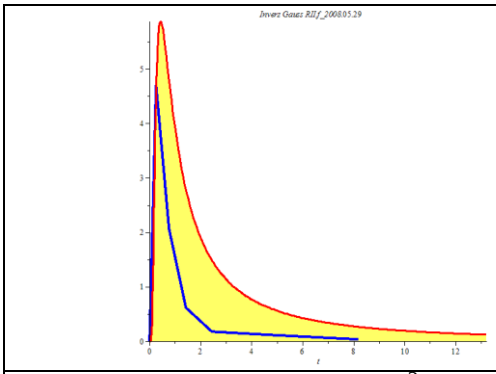
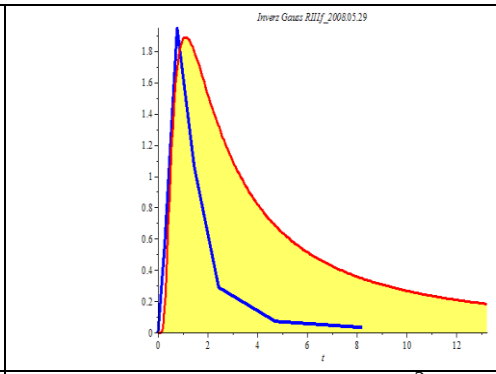
R^2=0,7860100	R^2=0,9467878

Az eredmények nem meglepően jelentősen eltérőek. A műtárgy tisztítását követően a második csúcs eltűnt, de a függvény képét vizsgálva az is feltűnik, hogy eredetileg is egy hasonló alakú függvényt próbált a program a mérési pontokra illeszteni.

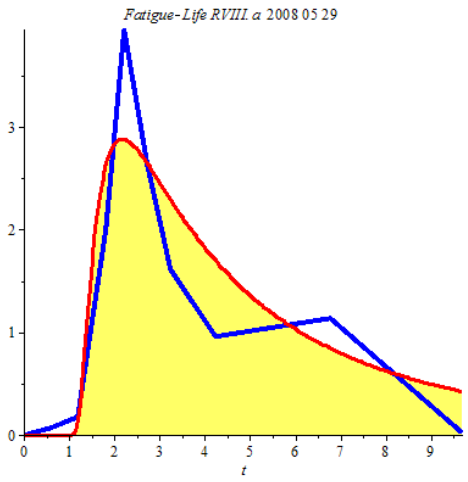
Ehhez a mérési időponthoz tartozik azonban egy említést érdemlő illesztési probléma. A **4. sz. mellékletben** feltüntetett illesztések közül kiemelendő hogy a II. és III. felső mérési pontok esetében az Inverz Gauss függvény illesztése első körben egyáltalán nem ment végbe. A paraméterek manuális módosítása tette lehetővé azt az illeszkedést, amit végül sikerült elérni. Elsősorban a b paraméter értékét kellett oly mértékben módosítani, hogy az szinte irreális értéket vett fel, és emellett is a II. pont esetében az R^2 értéke csupán 0,236, míg a III. mérési pontnál ez a szám mindössze 0,253. A b érték irrealitásának magyarázata a következő: mivel a b paraméter értéke a bevezetéstől való távolság és a szivárgási sebesség hányadosaként állítható elő ($b=L_x/v_x$), és az L_x értéke konstans, ebből következik, hogy minél nagyobb számot írunk a b helyére, az annál kisebb szivárgási sebességet feltételez. A körülbelül 25%-os egyezést b= 35.000 érték mellett értem el azon tapasztalatom mellett, hogy a b paraméter értékének egyre nagyobb mértékű növelésével egyre kisebb mértékben nő csak az R^2 értéke. Következtetéseim szerint tehát amennyiben a $b_{\rightarrow}\infty$, akkor $v_{x_{\rightarrow}}0$, tehát közel zérus a szivárgási sebesség ezekben a mérési zónákban. Ez azonban nem teljesül, hiszen a gyors felfutású függvények képeiből látszik, hogy a főáramnak itt jelentős szerepe van. Az illesztési képek egyértelműen mutatják, hogy az illesztési hiba a nem megfelelő (majdnem kétszeres) függvény alatti terület hibájából ered. A keresztmetszet mentén kialakuló áramlástani egyenlőtlenségeket kompenzálni kell, melyre **3.2.6. fejezetben** módszertanilag bemutatott eljárást dolgoztam ki.

A további vizsgálatokat a fenti R^2 értékekkel végeztem el. A két függvény illesztési képe:

9. táblázat A két Inverz Gauss függvény illesztési képe

	
II. felső mérési pont, R^2=0,236	III. felső mérési pont, R^2=0,253

Az utolsó mérési időpont egyes illesztési képeire is fennáll, hogy a kétcsúcsú görbe illesztése nagyobb illesztési pontosságot adna, ezért itt is szükség lesz az osztott modell használatára. Az egyik leg szembetűnőbb példát a VIII.a pont illesztési képe adja:



9. ábra Példa a 2008.05.29-i mérés eredményeként kapott kétcsúcsú függvényre (VIII.a pont)

4.2. R^2 átlagának kiszámítása a függvény típusok sorrendjének megállapításához

A továbbiakban a **3. sz. mellékletben** ismertetett R^2 értékek különböző szempontok szerint vett átlagát fogom kiértékelni.

4.2.1. A függvények illeszkedésének alakulása a műtárgy korának előrehaladtával

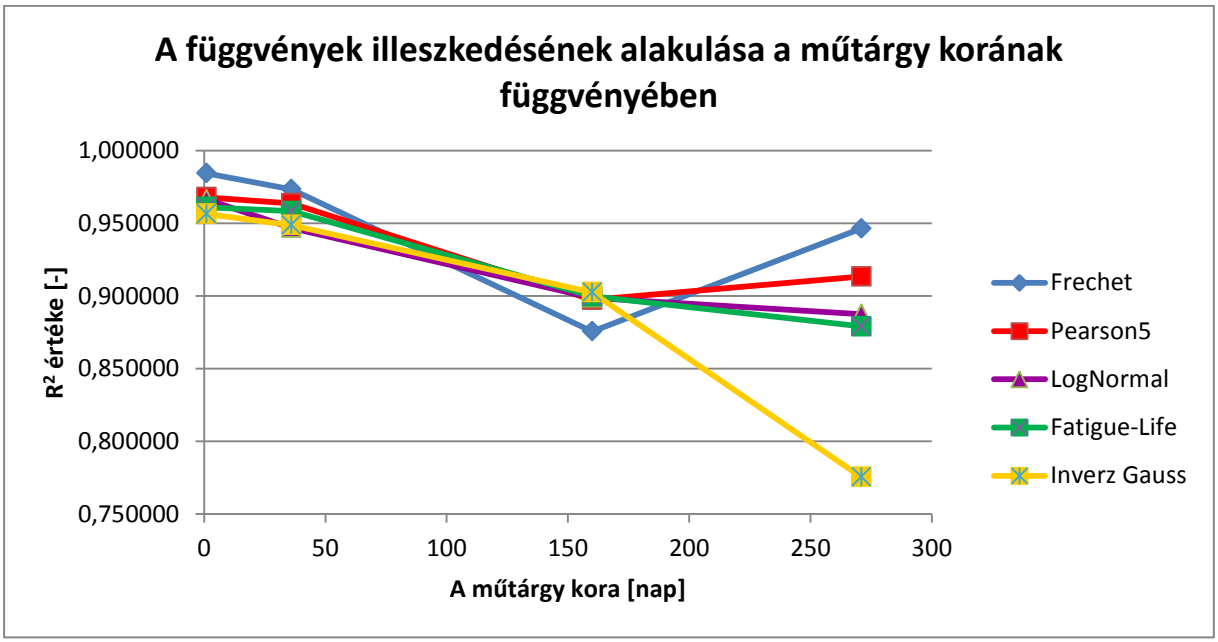
A 3.2.3. fejezetben említettem egy feltevést, mi szerint az Inverz Gauss eloszlás illeszkedése a műtárgy korával csökken. Fizikai háttér nélkül ugyan, de megvizsgáltam azt is, hogy ez a feltételezés jellemző-e a többi függvényre. Először vettem az egyes függvények átlagát az egyes mérési időpontokra vonatkozóan, amit az alábbi táblázat tartalmaz:

10. táblázat Az R^2 átlagai az egyes mérési időpontokban az egyes függvényekre az illesztés sorrendjében

	R^2 értékei			
Eloszlás típus	2007.09.02	2007.10.07	2008.02.08	2008.05.29
Frechet	0,984546	0,973443	0,875733	0,946450
Pearson5	0,967940	0,963841	0,897407	0,913429
LogNormal	0,966497	0,946875	0,898795	0,887550
Fatigue-Life	0,961163	0,958451	0,899836	0,879096
Inverz Gauss	0,956540	0,948844	0,902576	0,775451

A fenti táblázatból egyértelműen kitűnik, hogy az illeszkedések az új műtárgy esetében minden függvénynél megfelelőek voltak, ahogyan azt a **4.1.1. fejezetben** már taglaltam, azonban a műtárgy korának előrehaladtával a függvények egyre nehezebben tudták követni a mérési pontokat. (A kiemelt értékek azokat az eredményeket jelölik, melyek nem érik el a 0,95 értéket.) Az alábbi diagram mutatja az R^2-ek alakulását a műtárgy korának függvényében. Az **5. sz. mellékletben** ugyanezt minden függvényre külön-külön ábrázoltam, mind a X-es pontra, mind a belső pontokra. Az a feltevés, hogy a műtárgy korával a pontatlanság mértéke nő, csak az Inverz Gauss esetében mutatkozik meg egyértelműen, a többi függvény esetében teljesen változó, hogy akár a X-es pont, akár a belső pontok esetén hogyan alakul az illeszkedés. A Frechet eloszlásnál a harmadik mérési időpontban kapott negatív csúcsra magyarázatot egyelőre nem találtunk, ez további kutatást igényel.

Összességében megállapítható, hogy az illeszkedés eredményei az idő előrehaladtával romlottak, az utolsó időpontban tapasztalható javulás a műtárgy töltet átmosásának következménye. Az idő előrehaladásával az áramlás torzulása abban mutatkozik meg, hogy egyes mérési pontoknak nem csak egy maximum értékük van. Ezért válik szükségessé az osztott konvektív-diszperzív transzport egyenlet alkalmazása, melynek vizsgálati eredményeit a továbbiakban mutatom be.



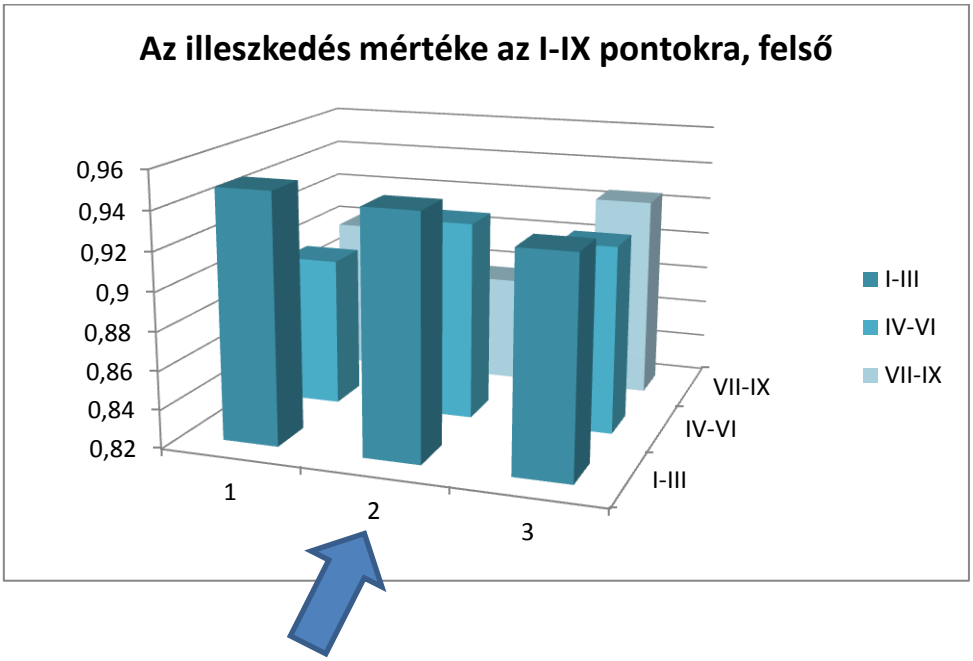
10. ábra A függvények illeszkedésének alakulása a műtárgy korának függvényében

4.2.2. A műtárgyban zajló áramlás képe felülnézetből a függvények illeszkedésének mértéke alapján

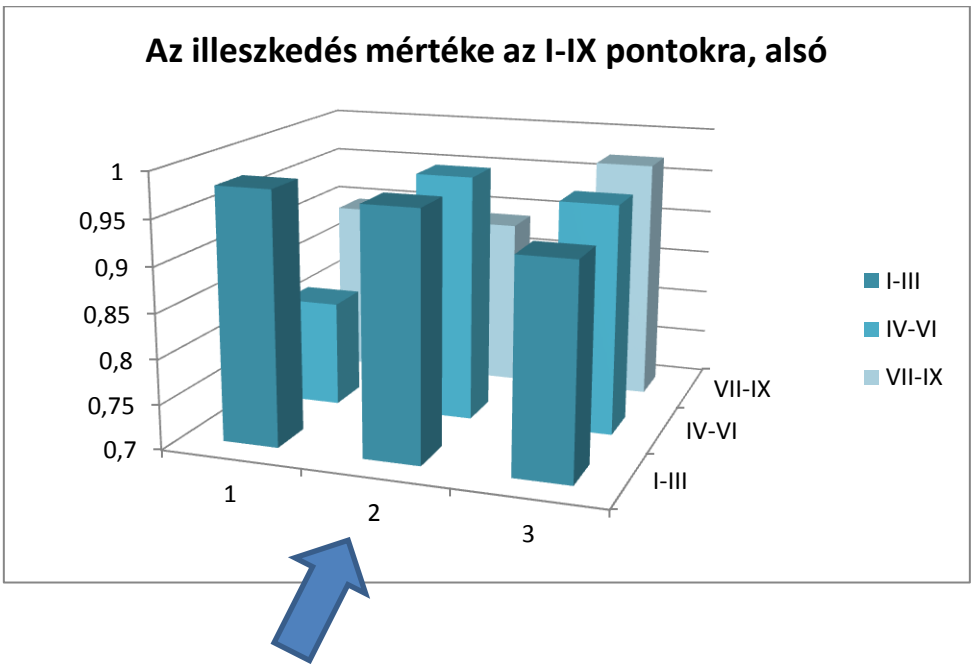
Az áramlási képet az alsó és felső pontokat külön véve fogom elemezni. Az átlagokat úgy alakítottam ki, hogy az adott mérési pont minden időpontjára, mind az öt eloszlás eredményét átlagoltam, így megkaptam minden egyes mérési pontra vonatkozó R^2 átlagokat. A feltételezésem az volt, hogy a jobb eredményeket a középső sáv, azaz a II-V-VIII. pontok fogják adni, a legkevésbé pedig az I,III,VII,IX pontok fognak illeszkedni. A nyíl mutatja a szennyvíz műtárgyba való beáramlásának irányát. A következő eredményeket kaptam:

A diagramon a függőleges tengelyen az R^2-ek értéke szerepel, a vízszinteseken a hosszirányú áramlási sávok (1-3), és keresztirányú (I-III; IV-VI; VII-IX) metszetek szerepelnek.

11. ábra Az illeszkedés mértéke az I-IX pontokra, felső



12. ábra Az illeszkedés mértéke az I-IX pontokra, alsó



Várakozásommal ellentétben teljesen más áramlási képet kaptam. Az a feltételezés, hogy a műtárgy sarkaiban a holtteresedés miatt rosszabb illeszkedési eredményeket kapok, megcáfolódott. Az eredmények szerint az illeszkedés mértéke nem is annyira a műtárgy alakjától, hanem a térfogatáram belső eloszlásától függ, melyet legfőképpen az eltömődési folyamatok és a gyökérzet eloszlása okozza.

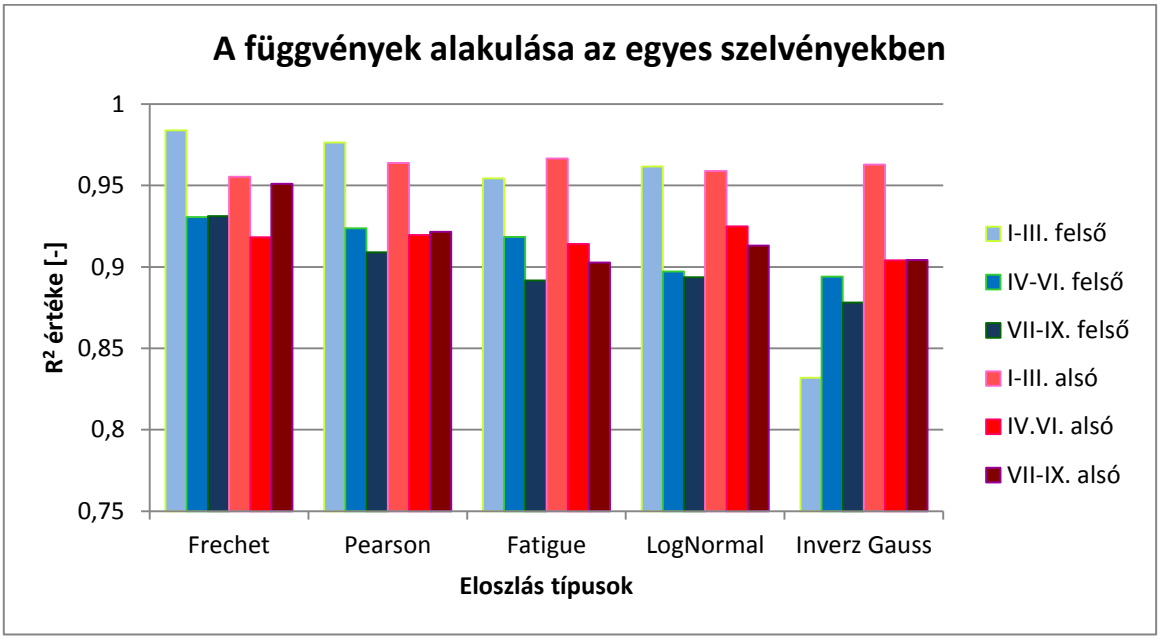
4.2.3. Metszetenkénti értékelés

Feltételezésem szerint a műtárgyban a műtárgy hossza egyre jelentősebb az áramlás torzulásának mértéke az eltömődési folyamatoknak, holttereknek, visszakeveredésnek

köszönhetően. Az előző fejezet tapasztalatai és jelen feltevéseim szerint az első 3 mérési pont alsó értékeire lesz a legmegfelelőbb az illeszkedés, míg a legrosszabb a VII-IX pontok felső értékeinél várható. A következő táblázat tartalmazza a tényleges eredményeket a függvények illeszkedési sorrendjében.

11. táblázat Metszetenként alsó és felső értékekre meghatározott R^2-ek alakulása

Eloszlás típus	R^2 értékeinek metszetenkénti átlaga						
	I-III. felső	I-III. alsó	IV-VI. felső	IV.VI. alsó	VII-IX. felső	VII-IX. alsó	átlag
Frechet	0,983923	0,955334	0,930588	0,918168	0,931216	0,951030	**0,945043**
Pearson	0,976345	0,963857	0,923679	0,919549	0,908881	0,921614	**0,935654**
LogNormal	0,961698	0,958981	0,897200	0,924870	0,893634	0,913192	**0,924929**
Fatigue Life	0,954448	0,966543	0,918408	0,914013	0,891673	0,902734	**0,924637**
Inverz Gauss	0,831850	0,962815	0,894039	0,903958	0,878151	0,904303	**0,895853**



13. ábra A függvények alakulása az egyes szelvényekben

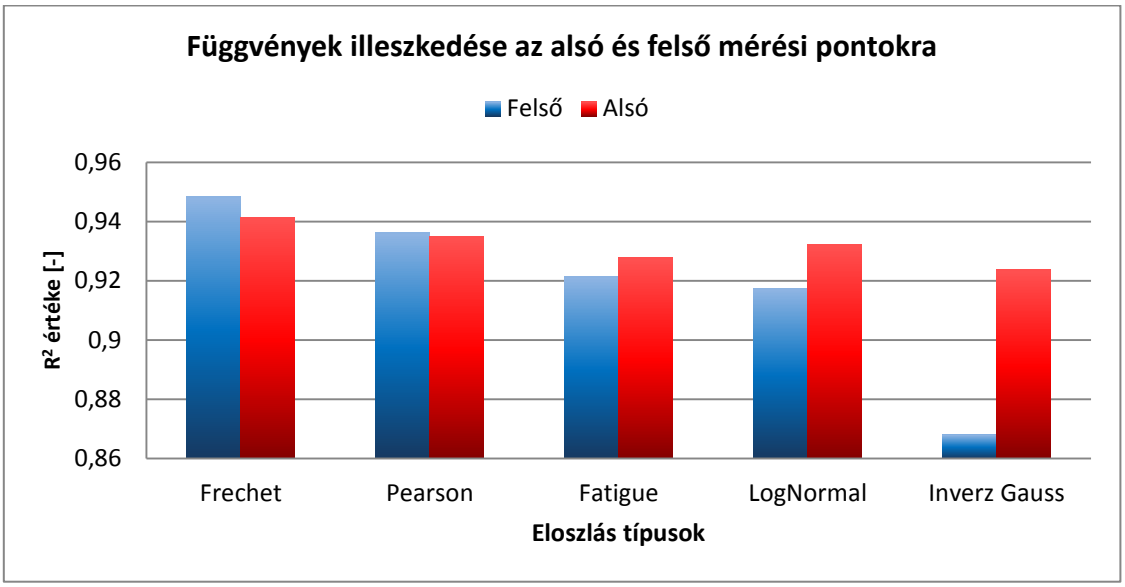
A diagramból egyértelműen látszik, hogy a műtárgy hossza mentén valóban romlanak az értékek szinte minden függvény esetében. Az Inverz Gauss esetében egy komoly mélypontot mutat az ábra az I-III. felső pontok esetében, ennek a magyarázatát a következő fejezetben ismertetem.

4.2.4. Alsó és felső pontok R^2 értékeinek összehasonlítása

A következő vizsgálatnál már csak az alsó és felső mérési pontok illeszkedési eredményeit különítettem el, ugyanis feltételezésem szerint ez a vizsgálat kimutatja, hogy a nem megfelelően kialakított osztódrén helyzete, valamint a gyökérzet által kialakult áramlásbeli rétegződés következtében az alsó és felső mérési pontok értékei eltérőek lehetnek.

12. táblázat A mérési eredmények átlagai az alsó és felső pontokra

Eloszlás típus	Felső		Alsó	
	R^2 átlag	sorrend	R^2 átlag	sorrend
Frechet	0,948576	1	0,941510	1
Pearson	0,936302	2	0,935006	2
Fatigue	0,921510	3	0,927763	4
LogNormal	0,917511	4	0,932348	3
Inverz Gauss	0,868013	5	0,923692	5



14. ábra Függvények illeszkedése az alsó és felső mérési pontokra

A táblázatból és a diagramból leolvasható, hogy az alsó pontokra jóval kiegyenlítettebb az egyes függvények illeszkedése, mindegyik elég jól követi a mérési pontokat. A felső pontok esetében azonban kizárólag a Frechet és a Pearson5 esetében adott az alsónál jobb illeszkedést, a többi esetében gyengébb eredményeket kaptam, az Inverz Gauss esetében pedig kimondottan rossz eredményt adott a felső pontok R^2 átlaga.

A függvények illeszkedési sorrendjének felállításakor ismét azt az eredményt kaptam, hogy a Frechet és a Pearson5 az első kettő, az Inverz Gauss az ötödik helyen áll, a Fatigue Life a felső, a LogNormal pedig az alsó helyen áll a harmadik helyen.

Az alsó mérési pontoknál azért szebbek az eredmények a legtöbb esetben, mert ott intenzívebb áramlás alakult ki a bevezetésnek, és a ritkább gyökérzetnek köszönhetően fellépő kényszeráramlások révén. A felsőbb rétegben a lassabb áramlásnak, és a sűrűbb gyökérzetnek köszönhetően több a visszakeveredés, a holttér, és a jobb oxigén ellátottság következtében valószínűsíthetően a biofilm-aktivitás is intenzívebb, ezekhez a torzító tényezőkhöz pedig a függvények illesztési eljárás nehezebben tud alkalmazkodni.

4.2.5. A végleges sorrend

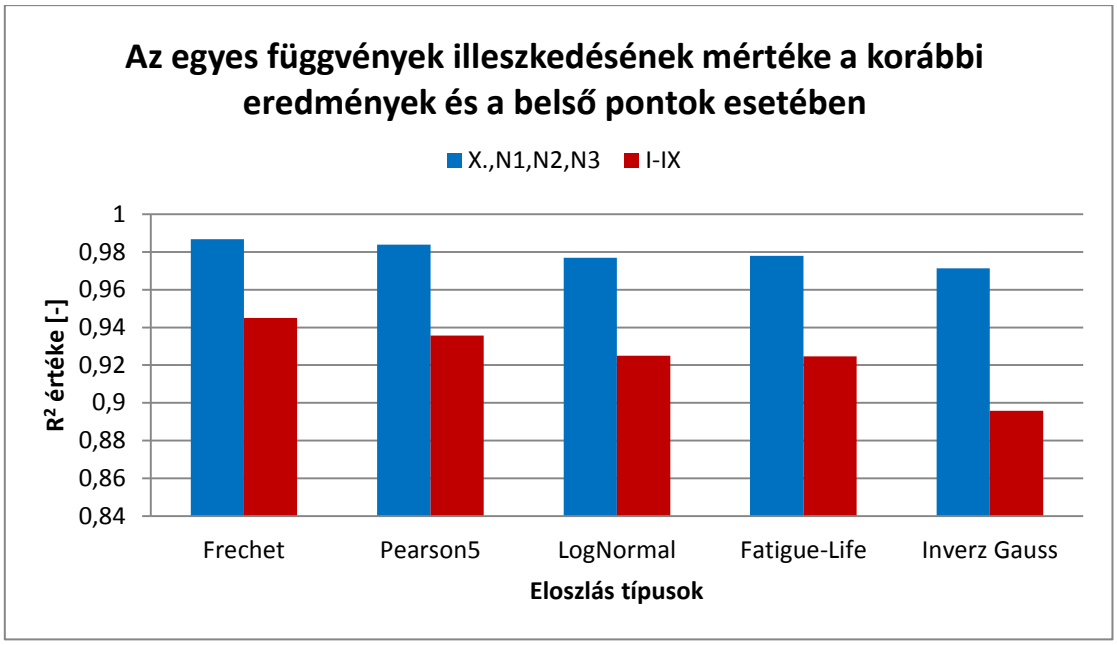
A 3.2.3. fejezetben ismertettem az alábbi függvények illeszkedésének mértékét a X. pontra, illetve 3 nemzetközi mérési eredményre vonatkozóan **(Dittrich et al. 2014a)**. Ezek az eredmények műtárgy kifolyási pontjára vonatkoznak. Vizsgálataim a belső, I-IX. pontokra terjedtek ki, melyekre a sorrend a következőképpen alakult:

13. táblázat A belső pontok végleges sorrendjének összehasonlítása a X. pont és a nemzetközi adatsorokkal

Eloszlás típus	X.,N1,N2,N3	Sorrend	I-IX	Sorrend
Frechet	0,9867	1	0,9450	1
Pearson5	0,9839	2	0,9357	2
LogNormal	**0,9769**	**4**	**0,9249**	**3**
Fatigue Life	**0,9779**	**3**	**0,9246**	**4**
Inverz Gauss	0,9714	5	0,8959	5

A táblázat 2-3. oszlopa az eddig publikált eredményeket tartalmazza, míg a 4-5. oszlop az általam kapott eredményeket. Szembetűnő, hogy a sorrend a korábban publikáltakkal közel azonosan alakult. A két legjobban illeszkedő függvény tehát a Frechet, és a Pearson5, az koncentráció alakulását a legkevésbé az Inverz Gauss követte. A LogNormal és a Fatigue Life sorrendje ugyan felcserélődött, azonban ha jobban megvizsgáljuk az eredményeket, feltűnik, hogy a két érték a többihez képest igen közel esik egymáshoz, a korábbi mérési eredmények esetében 0,001 az eltérés mértéke, míg a belső mérési pontoknál 0,0003. A korábbi elemzések során is többször tapasztaltam, hogy e kettő sorrendje helyenként felcserélődik, azonban mivel a sorrend a többi eloszlás típus esetében mindvégig állandó, és e kettő a 3. és 4. helyen váltja egymást, a továbbiakban nem érdemes ezekkel foglalkozni.

Az eredményekből az is kiderül, hogy a belső pontok esetében nagyobb az R^2-ek átlagának szórása, valamint az, hogy a belső pontokra rosszabb illeszkedéseket kaptam. A korábbi eredmények és a belső pontok közötti átlagos R^2 érték eltérés 0,054. Fontos kiemelni, hogy egyik függvény R^2 átlaga sem érte el a 0,95 értéket, azaz egyik sem illeszkedik kiválóan a mérési pontokra. A függvények átlagos R^2 értékeit a következő diagram szemlélteti:



15. ábra Az egyes függvények illeszkedésének mértéke a korábbi eredmények és a belső pontok esetében

4.3. Függvény alatti terület optimalizálás

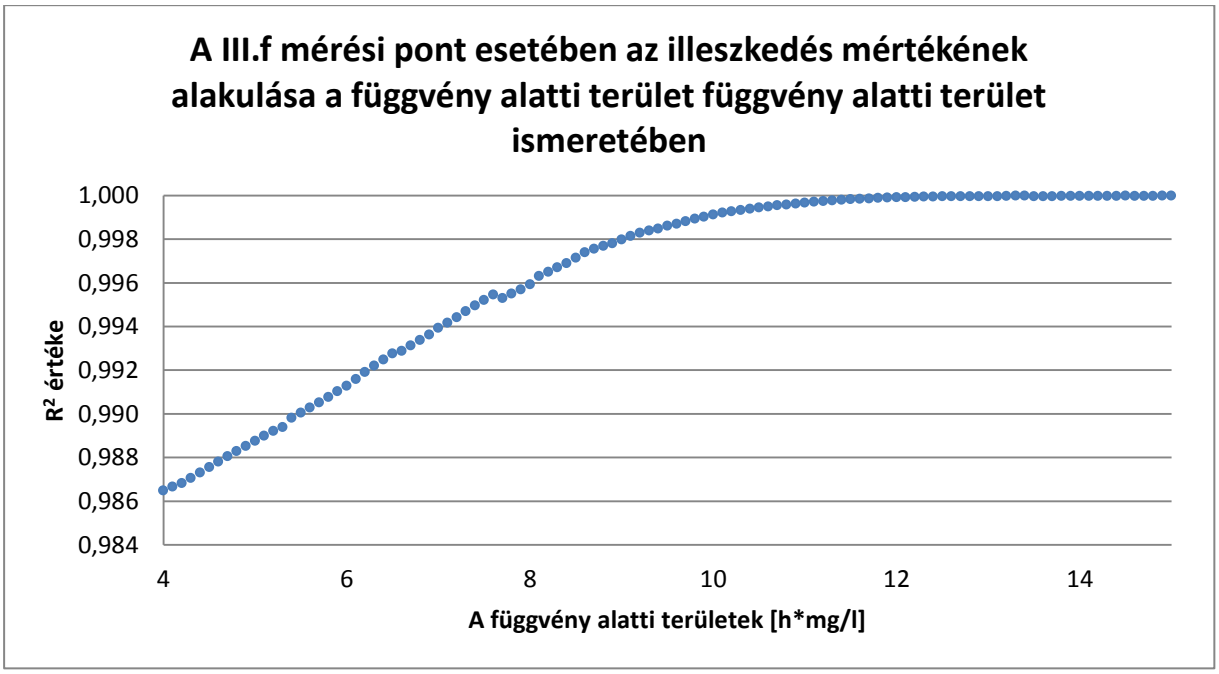
A **4.1. fejezetben** ismertettem azokat a problémákat, melyekkel az illesztés során találkoztam. A egyik probléma az volt, hogy a Maple környezetében elvégzett függvényvizsgálatok esetén kritérium volt, hogy a függvénynek egycsúcsúnak kell lennie, ez azonban nem minden mérési sorozat esetében teljesül. A másik ok, ami a nem megfelelő illeszkedésekért felelős, az a túl nagy, vagy túl kicsi függvény alatti terület. Ennek oka hogy a keresztmetszet mentén diverz áramlástani kép alakul ki, melyet az előző két alfejezetben több módon is igazoltam. Első lépésként a területek korrigálását tűztem ki célul, mivel ha az osztott konvektív-diszperzív modell bemeneti adataként nem a megfelelő függvény alatti területet adjuk meg, az illesztés nem várhatóan ad jó eredményt. Az eredményt a területi korrekcióval szükséges tehát javítani, majd elvégezni az osztott konvektív-diszperzív modell illesztését. A területi korrekció elvileg elvégezhető lenne az osztott modell segítségével is, azonban a numerikus optimalizációs idő itt jóval hosszabb, és sok esetben manuálisan kell elvégezni a tartományok, és a két görbe alatti terület arányának megadását. Az öt függvény illesztéséhez használt programban azonban ez a korrekció rövidebb idő alatt elvégezhető.

Mivel az egycsúcsú, főleg az első két mérési időpontból származó illesztések önmagukban is szép eredményeket adtak, elsősorban a kétcsúcsú függvényekre, és a függvény alatti területek vizsgálatánál a nagyobb eltéréseket adó illesztések eredményeire fókuszáltam. Ebből kifolyólag a területi korrekciót, és az osztott konvektív-diszperzív modell alkalmazását csak a 2008.02.08. időponthoz tartozó adatsorra végeztem el. Erre a szűkítésre a rendelkezésre álló idő miatt volt szükség. Természetesen további kutatásaim során a többi időpont vizsgálatára is sor fog kerülni. A nagy munkát igénylő 2008.02.08-i teljes mérési sorozat elemzése előtt az első mérési időpont első 3 mérési pontjára (1. keresztmetszet) kipróbáltam, hogy az általam kitalált terület korrekciós módszer megfelelően működik-e.

Először annak megállapítására törekedtem, hogy a függvény alatti területek optimalizálása célravezető lesz-e. Ehhez a legjobban illeszkedő Frechet eloszlás egyes mérési pontokra kapott eredményeit használtam, hiszen ez volt az a függvény, mely már önmagában is a legjobban közelítette az ábrázolt pontokat.

Elkezdtem tehát a függvény alatti terület tetszőleges megváltoztatásával pontosítani az illesztéseket az R^2 értékének figyelembe vételével. Az optimalizálást először az egyszerűség kedvéért az első időpont (2007.09.02.) első három pontjára (I.a, I.f, II.a, II.f, III.a, III.f) végeztem el. Itt azt tapasztaltam, hogy a terület növelésével az R^2 értékek folyamatosan nőnek. Amikor az eredeti terület kétszeresénél is nagyobb értékekre is egyre nőttek az R^2 értékek, szubjektív megítélési módszert alkalmaznom a függvényképek alapján. Az illesztési képek ugyanis a növekvő terület miatt eltorzultak, miközben a négyzetes eltérés hibájából adódóan számszerűleg egyre jobb eredményt kaptam. Ez mutatja az R^2-el való illeszkedés vizsgálat hátrányait is.

Annak érdekében, hogy kiderítsem, hogyan alakul az R^2 értéke a függvény alatti terület arányában, a III.f. mérési pont esetében vizsgáltam a függvény alatti területet 4-15-ig 0,1 pontossággal, majd az így kapott eredményeket diagramban ábrázoltam. Erre azért is volt szükség, mert a finomítás során 0,01 léptékben előrehaladva helyi ingadozásokat tapasztaltam az R^2 értékét illetően. Az eredményeket a következő diagram szemlélteti:



16. ábra A III.f mérési pont esetében az illeszkedés mértékének alakulása a függvény alatti terület függvény alatti terület ismeretében

Az eredmény meglepő: a görbe a 11 körüli függvény alatti terület értékétől kezdve szinte belesimult az $R^2=1$ vonalába. Ezek alapján, ha minél nagyobb értéket veszek fel, annál tökéletesebb illesztést kapok, azonban egy bizonyos érték felett már elhanyagolható az illeszkedés javulásának mértéke. A terület jóval nagyobb értékei esetében is csak lassú csökkenés tapasztalható. Ebben az esetben 25 h*mg/l érték körül a görbe kvázi

szimmetrikusan elkezd lefelé tendálni. Ezt a szakaszt azért nem ábrázoltam, mert jelentősen csökkentettem a vizsgálati léptéket. Ez jól mutatja a módszer kitalált vizsgálati módszer gyengeségét és pontatlanságát. A 1 körüli kvázi vízszintes függvényszakasz bármely területértéke lehet igaz az adott áramlástani helyzetre a kidolgozott módszer szerint, miközben a valós mérés egy adott helyzetet vizsgált az adott időpontban az adott helyen. Így csak a reális függvény alatti terület tartománya rögzíthető. Ezen a tartományon belül a valós terület érték meghatározása további kutatást igényel. Jelen munka során szubjektíve értékeltem a tartományon belül a függvényképeket.

A területi korrekciót követően a következő feltételezés szerint értékeltem a kapott eredményeket:

Az első mérési időpont esetén az eredeti függvény alatti terület 6,6694 volt, tehát a korrigált függvény alatti területek összege a **(31) képlet** alapján 6•6,6694=40,0164. Abban az esetben, ha a korrigált függvény alatti területek összege nem egyezik ezzel az eredménnyel, az eltérést a hat területre visszaosztva még mindig jó eredményt kaphatok. Az I.f, I.a és II.f pontokra a korrekcióval reális eredményeket kaptam: az I.f a 8,21-es értéknél illeszkedett legjobban, a I.a 8,52-nél, míg a II.f 6,03-nál. A II.a, III.f, és III.a pontokra azonban a várttól lényegesen eltérő területeknél adott a függvény jó illeszkedést. A legmagasabb R^2 értékeket a II.a pont 11,98, a III.f pont 13,4, míg a III.a a 14,0 értékek esetén kaptam. A kapott függvény alatti területek összege így 62,14, másfélszerese annak az eredménynek, amit vártam. Ez az eredmény azt jelenti, hogy az adott szelvényen a teljes térfogatáram 155%-a halad át. Ez úgy lehetséges, hogy már a két napos műtárgynál az első szelvényben is jelentős visszakeveredések vannak. Az eredmény helyességét alátámasztja a helytelenül kialakított osztódrén helyzete (lásd **6. ábra**), ami miatt valóban komoly visszakeveredéseket lehet becsülni.

Amennyiben mind erre a szelvényre, mind a többi mérési pontra az ilyen módon elvégzett illesztések eredményei is azt bizonyítják, hogy a valós térfogatáram lényegesen nagyobb, mint a bevezetett térfogatáram, ezzel bizonyítást nyer a visszakeveredések, a rendszerre jellemző áramlástani torzulások és keresztmetszeti diverzitások jelenléte, valamint az osztott konvektív-diszperzív modell létjogosultsága.

Emellett az eddigi eredmények jelentősége, hogy a terület optimalizálással kapott illesztési képek és R^2 értékek az eredeti Frechet illesztésnél lényegesen jobb eredményeket adtak. Az eredményeket a következő táblázat szemlélteti.

14. táblázat: A konstans és a korrigált függvény alatti területű Frechet eloszlás illeszkedésének összehasonlítása

Mérési pont	Eredeti függvény terület [h*mg/l]	Eredeti R^2 érték	Módosított függvény terület [h*mg/l]	Módosított R^2 érték
I.f	6,6694	0,99543	8,21	0,99995
I.a	6,6694	0,99890	8,52	0,99944
II.f	6,6694	0,99975	6,03	0,99988
II.a	6,6694	0,98179	11,98	0,98491

III.f	6,6694	0,99305	13,40	0,99999
III.a	6,6694	0,98836	14,00	0,99996

Az előzetes vizsgálatokat követően elvégeztem az optimalizálást a 2008.02.08-as időpont adatsoraira, mivel ezek esetében volt lényeges a függvény alatti terület korrigálása.

Az eredeti területhez képest a módosított területtel kapott illesztések eredményei átlagosan 4-7%-kal jobbak, ahogyan ezt a 6. sz. mellékletben szereplő adatok is tükrözik. A következő táblázat ezen adatok átlagát mutatja be.

15. táblázat Eredeti és módosított függvény alatti területek és az azokhoz tartozó R^2 értékek

Mérési pontok	**Eredeti függvény alatti terület [h*mg/l]**	**Eredeti R^2 érték**	**Módosított függvény alatti terület [h*mg/l]**	**Módosított R^2 érték**
alsó mérési pontok átlagai	11,582	0,85051	21,98056	0,933492
felső mérési pontok átlagai	11,582	0,900957	19,26967	0,93001
átlag	**11,582**	**0,875733**	**20,62511**	**0,931751**

A függvény alatti terület korrekciójával sikerült átlagosan 6,4%-kal javítanom a diszkrét pontokra való függvény illesztést, ami kimondottan jó eredmény. A terület értéke eközben 178%-ra nőtt. Ha az új műtárgyban 155%-os visszakeveredés tapasztalható, akkor az 5 hónapos medencében, direkt szennyvíz-rávezetést követően az ilyen mértékű keveredés reális értéknek mondható.

A kapott illesztési eredmények azonban egyik esetben sem elég pontosak, hiszen az átlag 0,95 alatt maradt. A mérési pontok felénél az optimalizálás előtt az R^2 értéke nem érte el ezt a szintet, ugyanez a korrekciót követően már csak 18-ból 6 pontra volt igaz. E függvények esetében is jelentős javulás volt tapasztalható, egyes esetekben akár 15-17%-kal magasabb R^2 értékeket kaptam.

Várakozásom szerint a 2007.09.02-i, 2007.10.07-i és 2008.05.29-i mérési pontok esetében, ahol az eredeti függvény alatti területtel is 98-99%-os illeszkedést kaptam, ott ez az érték kevesebb lesz, de önmagához viszonyítva jelentős javulást fog eredményezni, különösen az egycsúcsú függvények esetében. Ez azért is jelentős, mert a Frechet eloszlásfüggvény esetében az illesztések eredményei már önmagukban is szép illeszkedést adtak, ezzel a módszerrel azonban még közelebb kerültem a diszkrét pontok folytonos függvénnyel való helyettesítése révén a műtárgyban zajló transzport folyamatok megismeréséhez.

4.4. Az osztott konvektív-diszperzív transzport modell illesztési eredményei

Az osztott konvektív-diszperzív modell illesztéséhez a már optimalizált függvény alatti területtel rendelkező Frechet eloszlások területének és paramétereinek értékeit használtam fel, ez egy, a mérési adatsor pontjaihoz már megfelelően közelített függvény további finomítását

tette lehetővé. Elsődleges célom a kétcsúcsú függvények kezelhetővé tétele, azaz az ilyen típusú adatsorok függvénnyel való helyettesítése. Mindez egy olyan függvénnyel, melynek paramétereiből a továbbiakban konkrét áramlástani paraméterek számítása válik lehetővé. Az általam használt módszer lehetővé teszi, hogy a koncentráció idő szerinti alakulásából kifejezhető legyen a szivárgási sebesség , a diszperziós tényező, és a késleltetési tényező (lásd **2.3.2. fejezet**, **13., 14. és 15. egyenlet**). Ezek az eredmények a későbbiekben összehasonlíthatóak lesznek a jelenleg használt modellekkel által adott értékekkel, mely jelen kutatás folytatása lesz a későbbiekben.

Az osztott modellben történő függvényillesztések eredményeképpen általában jobb eredményeket kaptam, mint a függvény alatti terület módosítását követően. Azonban néhány esetben a függvények képei és a hozzájuk tartozó R^2 értékek nem hozták a várt javulást. Ennek oka az volt, hogy a Frechet optimalizálási bizonytalanságai miatt (lásd **4.3. fejezet, 16.ábra**) nem megfelelő területtel számoltam az osztott modellben. Ezért szükségessé vált a terület korrigálása ebben a modellben is. A Frechet-vel optimalizált, és a korrigált függvény alatti területekkel számolt R^2 értékeket a **7. sz. melléklet tartalmazza.**

A táblázat utolsó oszlopából jól látszik, hogy a korrekció során kivétel nélkül csökkenteni kellett a területet. Az optimalizálás során kapott területeket átlagolva azt az eredményt kaptam, hogy a teljes térfogatáram 178% helyett csupán 150%-a halad át, a Frechet-vel való területi korrekció tehát túlzó értékeket adott. Feltételezésem szerint az, hogy az első időpont esetén az első szelvényt vizsgálva ez az érték 155%-ra adódott, az is a két módszer eltéréseiből fakad.

Az egyes szelvényeken a teljes térfogatáram közel 150%-a halad át, jelentős eltérés a szelvények között nem tapasztalható. Ezt szemlélteti a következő táblázat:

16. táblázat A függvény alatti terület vizsgálata az egyes szelvények esetén

Vizsgált metszet	**Átlagos függvény alatti terület**	**A tényleges térfogatáram a belépő térfogatáramhoz viszonyítva**
Első metszet	17,830	154%
Második metszet	17,077	147%
Harmadik metszet	17,341	150%

Az alsó és felső mérési pontokat vizsgálva azonban szembetűnő, hogy az alsó pontok esetében a térfogatáram lényegesen nagyobb, ez alátámasztja az a tézist, mi szerint a műtárgyban vertikális rétegződés alakul ki(lásd **2.1.2.fejezet**). Ennek mértéke jelen műtárgy esetében a következőképpen alakul:

17. táblázat Az áramlás vertikális rétegződésének vizsgálata

	Első	Második metszet	Harmadik	Átlag	**Rétegződés**

	metszet		metszet		**mértéke**
Felső	48,743	39,443	43,735	43,974	**42%**
Alsó	58,237	63,021	60,312	60,523	**58%**
Összesen	106,980	102,464	104,047	104,497	**100%**

A következő táblázatban mutatom be az osztott konvektív-diszperzív modell illesztési eredményeinek átlagát alsó és felső pontokra vonatkozóan. Az utolsó oszlopban jól látható, hogy az optimalizált függvény alatti területtel kapott Frechet illeszkedésénél 5,71%-kal jobb eredményeket kaptam az osztott modell alkalmazásával.

28. táblázat Az egyes finomítási módszerekkel kapott eredmények, és a javulás mértéke

Mérési pont	**Frechet sűrűségfüggvény R^2 értéke a területi korrekciót követően**	**Az osztott modell R^2 értéke a Frechet-vel optimalizált területtel**	**Az osztott modell R^2 értéke korrigált függvény alatti területtel**	**Az osztott modellel elért javulás mértéke az optimalizált területű Frechet függvényhez képest**
felső mérési pontok átlaga	0,930010	0,967072	0,994635	6,46%
alsó mérési pontok átlaga	0,933492	0,955154	0,983127	4,96%
átlag	0,931751	0,961113	0,988881	5,71%

A **8. mellékletben** összesítettem a finomítások lépéseinek egyes eredményeit az eredeti Frechet sűrűségfüggvény illeszkedéseinek mértékétől az osztott konvektív-diszperzív transzport modellel elért eredményekig. E modellel sikerült minden mérési pont esetében 0,95 feletti R^2 értéket elérni, 3 pont kivételével mindegyik 98-99%-os egyezést mutat. A legkiemelkedőbb eredményt az alsó IV. pont esetében sikerült elérni, amikor a Frechet sűrűségfüggvény illesztésekor kapott R^2=0,5118-as értékéhez képest az osztott modell függvény alatti korrekciójánál 0,9659-at kaptam eredményül.

A pontosításokat minden pont esetében tovább lehet folytatni az osztott modellben az egyes paraméterek, a függvény alatti terület és a két Inverz Gauss függvény arányának manuális módosításával, azonban a kapott eredmények esetében ezt nem tartottam szükségesnek. A közelíthetőség mértékét jól mutatja a felső III. pont (R^2=0,999996), és az alsó III. pont (R^2=0,999993) eredménye.

Az osztott konvektív-diszperzív modellről tehát elmondható, hogy a kétcsúcsú függvények esetében is jó közelítést ad, ezáltal a várakozásnak megfelelően sikerült a diszkrét mérési pontokat folytonos függvénnyel helyettesíteni. Az osztott modellben történt függvény-illesztések képeit a **9. melléklet** tartalmazza. Mindegyik ábrán négy görbe található. Ezek közül kettő, a pontozott és szaggatott vonal a két Inverz Gauss görbe, a piros az e kettő eredőjeként kapott kétcsúcsú folytonos függvény, a zöld pedig a Frechet sűrűségfüggvény illeszkedési görbéje.

A két Inverz Gauss függvény területének arányából következtetni lehet a mellékáramok és a főáram arányára, valamint általuk a műtárgy belsejére vonatkozó áramlási jellemzőkre. Az S értékeket vizsgálva nagyon diverz képet kapunk. Az alsó és felső értékek átlaga közel megegyezik, a felső kicsivel nagyobb értéket ad. A kényszeráramlásoknál tehát kisebb a visszakeveredés mértéke. Szelvényenként vizsgálva az alsó és felső értékeket az tapasztalható, hogy mindkettő esetében az első szelvénynél lettek a legnagyobbak az átlagok, a középsőnél ez az érték jelentősen visszaesett, majd az utolsó, kifolyás előtti szelvénynél ismét felerősödött a visszakeveredések mértéke.

19. táblázat Az S értékek vizsgálata az egyes szelvények esetében alsó és felső pontokat külön elemezve

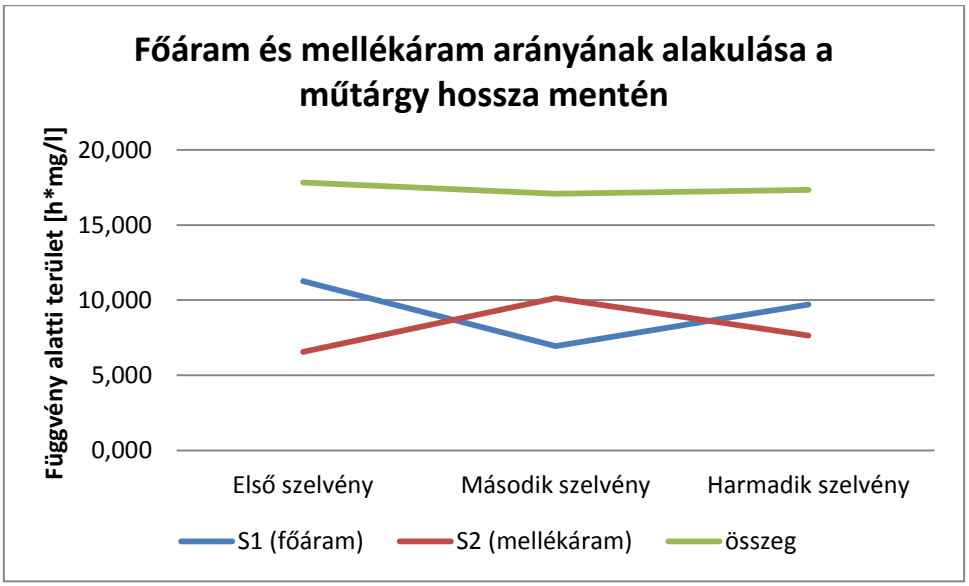
Vizsgált szelvény	Alsó pontok	Felső pontok
Első szelvény	1,86	2,03
Második szelvény	1,29	1,06
Harmadik szelvény	1,46	2,02

A főáramok és mellékáramok alakulását gyönyörűen mutatja a következő táblázat. A belépés után a főáramnak van jelentős szerepe, míg a mellékáramnak egyelőre kevésbé. A középső szelvénynél a mellékáramlások válnak meghatározóvá. A kivezetés előtt pedig a bevezetésnél tapasztaltakhoz hasonlóan ismét a főáram dominál, de a keveredések jelenléte itt jobban érzékelhető. Feltevésem szerint ha az osztódrén a megfelelő helyre került volna a kivitelezésnél (lásd **3.1. fejezet**), akkor az első és a harmadik szelvény értékei közel megegyeznének, mert a mérési pontokig nagyobb utat tenne meg a szennyvíz.

20. táblázat A főáram és a mellékáram aránya a teljes térfogatáramban a műtárgy hossza mentén

Vizsgált szelvény	S1 (főáram)	S2 (mellékáram)
Első szelvény	11,264	6,566
Második szelvény	6,950	10,128
Harmadik szelvény	9,707	7,634

Az eredményeket szemlélteti a következő grafikon is:



17. ábra A főáram és a mellékáram alakulása a műtárgy hossza mentén

Az előbbiekben felhasznált értékeket a **10. sz. melléklet** tartalmazza.

4.5. Összefoglalás

Kutatási munkám célja az volt, hogy a vízszintes átfolyású gyökérzónás műtárgyak transzport folyamatainak leírására konzervatív nyomjelző anyag vizsgálat segítségével bizonyítsam, hogy a jelenleg használt modellek valóban nem megfelelően írják le a műtárgyban zajló áramlási folyamatokat, valamint megvizsgáljam, hogy Dittrich Ernő témavezetőm és Klincsik Mihály konzulensem kutatásai módszerei **(Dittrich et al. 2014a, Dittrich et al. 2014b)** a belső pontokra is igazak-e. Munkám során felhasználtam az általuk Maple környezetben elkészített illesztési eljárásokat, valamint az előzetes szűrés után kapott sűrűségfüggvényeket. Az illesztések eredményei szükségessé tették a függvény alatti terület optimalizálását, ezért ezt a módszert kidolgozva folytattam a kutatást, vizsgálva, hogy a műtárgy belső pontjaira is igazak-e az új fejlesztési irány elfolyó szennyvízre vonatkozó eredményei.

A Maple környezetben egyedileg készített illesztési program segítségével megállapítottam, hogy az Inverz Gauss függvény a függvények illesztési sorrendjében minden esetben az 5. helyen állt, továbbá két esetben szükség volt a paraméterek manuális módosítására ahhoz, hogy a függvény illeszkedni tudjon a megadott pontokra. Ezek alapján bizonyítottam, hogy az Inverz Gauss eloszlás, és a C(x,t)-t síknegyeden Inverz Gauss eloszlást adó 1 dimenziós konvektív-diszperzív transzport modell nem alkalmas az áramlástani folyamatok megfelelő pontosságú leírására.

A függvények elővizsgálata során igazoltam a Gamma eloszlás kizárásával a sorba kapcsolt reaktor kaszkád modell nem megfelelő működését is.

Az új fajta eloszlás függvények vizsgálatával kimutattam, hogy az R^2 átlagok és a függvények illesztési képei azt mutatják, hogy a Frechet eloszlás rugalmasabban követi a mérési pontokat, mint a többi eloszlás, ezért megállapítható, hogy a konzervatív nyomjelző anyag transzport vizsgálatok mérési eredményei növényzettel ültetett vízszintes átfolyású kavicstöltetű műtárgyra vonatkozóan Frechet eloszlású sűrűség függvénnyel közelíthetők a legnagyobb pontossággal.

A illesztett Frechet eloszlású sűrűség függvények segítségével igazolást nyert, hogy a vizsgált hódmezővásárhelyi műtárgyban az illeszkedés mértéke nem is annyira a műtárgy alakjától, hanem a térfogatáram belső eloszlásától függ, melyet legfőképpen az eltömődési folyamatok és a gyökérzet eloszlása okozza.

Mivel ez az eloszlás típus sem ért el minden esetben $R^2>0,95$ eredményt, ezért további finomításokra volt szükség. A függvény alatti területtel való korrigálással az első mérési időpontban az első szelvényre vonatkozóan egy mérési pont kivételével minden pontra $R^2>0,999$ feletti értékeket kaptam. Ezek az adatok új műtárgyra vonatkoznak ezen belül is a bevezetés utáni első szelvényre. Az általam vizsgált egy későbbi mérési időpont esetén is pozitívabb eredményeket kaptam: sok esetben jelentős mértékű javulás volt megfigyelhető az egyes pontok esetében. A módszer kedvező működése ezáltal igazolást nyert, így egy átfogó képet kaptam a térfogatáram műtárgybeli eloszlásáról, ezáltal a főbb áramlási viszonyokról. Azonban a módszer maradék hátrányai is kimutatásra kerültek.

Az osztott konvektív-diszperzív transzport modell szükségességét a függvények képei, és a kétcsúcsú függvények esetében területi korrekciónál adódó problémák adták, így bizonyossá vált, hogy az egycsúcsú görbék illesztése nem jelent megoldást ezen pontok esetén. Az osztott modell segítségével azonban sikerült kiküszöbölni a hibát, és minden általam vizsgált mérési pont esetén 0,95 feletti R^2 értékeket kaptam. Az osztott modell ezáltal bizonyítottan alkalmas a diszkrét adatsorok folytonos függvénnyel való helyettesítésére, ezáltal a mérési pontok diszkrét helyzetéből eredő hibák kiküszöbölhetők.

A másik igen lényeges eredményt pedig az osztott modell azon tulajdonsága adta, hogy az alkalmazott Inverz Gauss függvénypárból számíthatóak konkrét, igen lényeges áramlástani paraméterek, mint a szivárgási sebesség, a diszperziós tényező, és a késleltetési tényező. Az ismert fizikai háttér nélküli függvények helyett tehát olyan függvény alkalmazására került sor, mely valódi, számszerűsíthető eredményekkel szolgálhat a jövőben úgy, hogy az eddigieknél pontosabban írja le a gyökérzónás műtárgyak bonyolult áramlástani folyamatait, nem elhanyagolva a sztochasztikus jellegű tényezők jelenlétét.

4.5. További kutatási irányok

A továbbiakban a kutatási célom elsőként a Frechet sűrűségfüggvénnyel való területi korrekció pontosításához egy olyan módszer keresése, mely kiküszöböli az R^2 hibájából adódó bizonytalanságokat. A továbbiakban a kutatás folytatásaként célom elsősorban a területi korrekció és az osztott konvektív-diszperzív modell segítségével elvégezni az illesztések finomítását másik három időpont adatsoraira vonatkozóan. Ezt követően a kapott eredményekből a valós áramlástani paraméterek kifejezésére kerül sor, melyek a jelenleg használt módszerekkel való összehasonlíthatóság még precízebb módját adják.

Irodalomjegyzék

Batchelor A. és Loots P. (1996): *Critical Evaluation of a Pilot Scale Subsurface Flow Wetland: 10 Years After Commissioning.* 5th International Conference on Wetland Systems for Pollution Control, Vienna.

Breen P. F., Chick A.J. (1995): *Rootzone Dynamics in Constructed Wetlands receiving Wastewater: a Comparison of Vertical and Horizontal Format Systems.* Water Science and Technology page 281-289, Vol. 32 No. 3**.**

Chen S., Wang G. T., Xue S. K. (1999): *Modelling BOD removal in constructed Wetlands with mixing cell method.* Journal of Environmental Eng. Jan. 1999. Vol. 125 No.1. pp. 64-71.

Crites R. W. (1994): *Design Criteria and Practice for Constucted Wetlands*. Water Sci. and Techn. 29(4): 1-6. 1994

Dittrich E. (2006a): *A gyökérzónás szennyvíztisztítás hazai tapasztalatai és elterjedésének lehetőségei*. Maszesz hírcsatorna 2006 Március-Április 10-20.o. www.maszesz.hu

Dittrich E. (2006b): A gyökérzónás szennyvíztisztítás és technológiai alternatívái. MHT XXIV. Országos vándorgyűlés Pécs, 2006. július 5-6. www.mht.hu

Dittrich E. (2006c): *Experiences on hydraulic performance of sub-surface flow constructed wetlands*. Pollack Periodica Vol. 1. No. 1. pp. 53-66. Akadémiai kiadó, Budapest, 2006. http://www.akademiai.com/content/r634420523j5n382/?p=192abbeede67440484876d0b9703a338&pi=2

Dittrich E. (2008a): *A tartózkodási idő eloszlás vizsgálata*. PTE-PMMK Környezetmérnöki Tanszék, oktatási segédlet.

Dittrich E. (2013): *Statisztikai módszerek fejlesztése a gyökérzónás szennyvíztisztítók méretezésére és modellezésének támogatására*. Doktori disszertáció (elbírálás alatt) BME – VKKT.

Dittrich E., Klincsik M. (2014a): *Analysis of conservative tracer measurement results using the Frechet distribution at planted horizontal subsurface flow constructed wetlands filled with coarse gravel and showing the effect of clogging processes.* Environmental Science and Pollution Research *(Elfogadás alatt)*

Dittrich E., Klincsik M. (2014b): *Application of divided convective-dispersive transport model to simulate conservative transport processes in planted horizontal sub-surface flow constructed wetlands.* Environmental Science and Pollution Research *(Elfogadás alatt)*

Govindaraju R.S., Das B.S. (2007): *Moment analysis for subsurface hydrologic applications*. Water Science Technology Library. Vol 61. Springer Netherland.

Horváth I. (1972): *Víz és szennyvíztisztító műtárgyak hidraulikai vizsgálata*. Vízügyi műszaki gazdasági tájékoztató 38.Vízdok Budapest 1972.

Jobbágy S.(1995): *Környezetkímélő és természet-közeli szennyvíztisztítási eljárások alkalmazásainak, elterjedésének lehetőségei Magyarországon*. Környezetfejlesztési és Területfejlesztési Minisztérium, Budapest, 1995.

Kadlec R.H. (1997): *Deterministic and stochastic aspects of constructed wetland performance and design.* Wat. Sci. Tech. Vol. 35. (5) pp. 149-156.

King A. C., Mitchell C.A., Howes T. (1997): *Hydraulic tracer studies in a pilot scale subsurface flow constructed wetland.* Water Science and Technology. page 189-196, Vol. 35, No. 05.

Kovács B., Filep Gy., Lakatos J., Madarász T., Szabó I. (2002): *Szennyezett területek kármentesítése.* (Szerk. Szabó Imre). Miskolci egyetem kiadó, Miskolc.

Kumar J. L. G., Zhao Y. Q. (2011): *A review on numerous modeling approaches for effective, economical and ecological treatment wetlands*. Journal of Environmental Management 92 (2011) 400-406.

Laber J., Winter K. J., Goetz D. (2003): *The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands.* Water Sci. and Techn. 48(05): 9-14, 2003.

Levenspiel O. (1972): *Chemical Reaction Engineering*. Second Edition. John Wiley and Sons Inc. New York, USA.

Martin A.D. (2000): *Interpretation of residence time distribution data*. Chem. Eng. Sci. 55 (2000) 5907-5917.

Netter R. (1994): *Flow Characteristics of Planted Soil Filter.* Wat. Sci. Tech. Vol.29.(4) pp 36-44.

Rash J. K., Liehr S. K. (1999): *Flow pattern analysis of constructed wetlands treating landfill leachate.* Water Science and Technology. page 309-315, Vol. 40, No. 3**.**

Reed S. C., Crites R.W., Middlebrooks E. J. (1995): *Natural Systems for waste management and treatment*. 2 nd Ed. McGraw-Hill. Inc., New York.

Tanner C. C., Sukias J. P. (1995): *Accumulation of organic solids in gravel-bed constructed wetlands.* In: Water Science and Technology page 229-239, Vol. 32, No.3.

U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), (1988): *Design manual: Constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment*. Rep. No. EPA 625/1-88/022. USEPA Office for Environmental Research Information, Cincinatti, Ohio.