

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar



***Mélységi finombuborékos levegőztetésű medencék áramlástanai viszonyai:
Kétdimenziós víz-levegő többfázisú áramlástanai modell kalibrációja és
verifikációja***

Tudományos Diákköri Dolgozat

Kecse Barbara

Konzulens: Dr. Patziger Miklós, egyetemi docens
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem VKKT

Madarász Emese, doktorandusz
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem VKKT

Budapest, 2016. november hó

Tartalom

1. Bevezetés, célkitűzés.....	3
2. A szennyvíztisztítás lépései.....	4
2.1. Mechanikai tisztítás.....	4
2.2. Biológiai tisztítás.....	5
3. Finombuborékos levegőztetés	7
3.1. Diffúzor típusok	7
4. A folyadék-levegő kétfázisú áramlás, pulzáció.....	9
5. A kutatási módszertan.....	10
5.1. A vizsgált medencék (Thiersch, 2001.)	10
5.1.1. Egyoldali elrendezés (Holzkirchen szennyvíztisztító telep, Németország).....	10
5.1.2. Miecbach(MB) szennyvíztisztító telep.....	11
5.1.3. Garching(GAR) szennyvíztisztító telepe.....	12
5.2. A modell felépítése.....	12
5.2.1. A modell matematikai háttere	13
5.2.2. Számítási rácsháló és időlépés	16
6. Eredmények.....	18
7. Összefoglalás	25
8. Táblázatjegyzék	26
9. Ábrajegyzék	27
10. Irodalomjegyzék	28

1. Bevezetés, célkitűzés

A nagyvárosi szennyvíztisztító telepek biológiai tisztítási fokozatának alapvető lépése a finombuborékos levegőztetés. A medence fenekén a membrándiffúzorokon keresztül bejuttatott finom (1- 6 mm átmérő) buborékokból a medence mélysége mentén oldódik be az oxigén a folyadéktérbe (eleveniszapos szennyvíz), ahol az aerob tisztítási folyamatok (szervesanyag lebontás és nitrifikáció) fenntartása érdekében 2 mg/l oldott oxigénkoncentráció fenntartása szükséges.

A finombuborékos levegőztetés energiaigénye a szennyvíztisztító telepi fogyasztók közül a legnagyobb, így a műtárgy jó működése alapfeltétele a jó tisztítási és energetikai hatékonyságnak.

Az áramlástanai folyamatok és peremfeltételek, mint a

- áramlási sebességek
- turbulenciaviszonyok
- buborékok bejuttatása és transzportja a medencében
- buborékok szétesése és összeállása (ezzel a fajlagos felületük változása)
- buborékok tartózkodási ideje a medencében és ezzel az oxigén beoldódási hatékonyság növekedése/csökkenése
- levegőztetőrendszer műszaki kialakítása (levegőztető elemek száma, elrendezése, és mérete)
- keverők elhelyezése a medencében
- medence geometriai kialakítása

nagyban meghatározzák a levegőztetés hatékonyságát, amely döntő hatással van a szennyvíztisztító telep technológiai és energetikai hatásfokára.

A Vízi Közmű és Környezetmérnöki Tanszék átfogó kutatásának kezdeti lépéseként, amely a fenti folyamatok átfogó vizsgálatát célozza meg ezen tudományos diákköri dolgozat célja a diszperz finombuborékos áramlás leképezése numerikus modellben, a modellkalibráció lehetőségei és határai finombuborékos (levegő-víz) kétfázisú térben nagyvárosi léptékű medencékben mért adatsorok alapján. A felépített modell felhasználási területe a mélyégi finombuborékos levegőztető medencék működésének és hatásfok-javítási lehetőségeiknek a vizsgálata.

2. A szennyvíztisztítás lépései

A szennyvíztisztítás során az a cél, hogy olyan mértékben tisztítsák meg a szennyvizet, hogy azt a befogadóba vezetve ne okozzon környezeti károkat. Ennek elérésére pontos határértékek állnak rendelkezésre, az egyes szennyezőanyagokra bontva.

Maga a szennyvíz olyan emberi használatból származó hulladékvíz, mely szennyező anyagokat tartalmaz. Szennyezőanyagoknak nevezzük azokat a komponenseket, melyek a befogadóba jutva az ott lejátszódó biológiai folyamatokat jelentős mértékben megváltoztatják, illetve a befogadó további emberi célú felhasználhatóságát csökkentik, vagy lehetetlenné teszik.

A szennyvízben előforduló szennyezőanyagok fajtái: ülepedő/ülepíthető anyagok, felúszó anyagok, lebegő anyagok, kolloidálisan oldott anyagok, oldott anyagok.

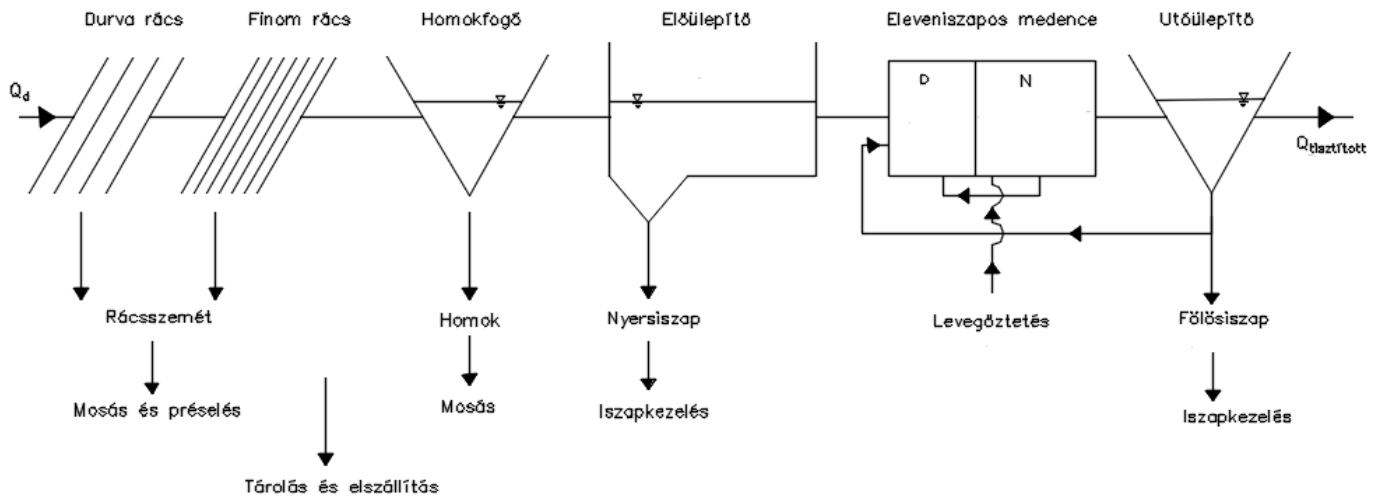
A szennyvízben található anyagokra előírt határértékek:

1. Táblázat: A nyersszennyvíz és tisztított szennyvízre érvényes határértékek

	Nyers szennyvíz (mg/l)	Tisztított szennyvíz (mg/l)
KOI	400-1000	70-150
NH4-N	40-70	5-10
TS	300-400	10-35
BOI	300-500	10-30
ön	60-90	10-30
öp	5-10	1-5

2.1. Mechanikai tisztítás

Ezekben a lépésekben a nagyobb méretű szennyező anyagokat távolítják el a szennyvízből. Részai a kőfogó, a rács, a homokfogó és az előülepítő medence. Ezeknek a műtárgyaknak a célja a hordalék, illetve a rácsszemét kiszűrése. A szennyvíztisztítás lépései az 1. ábrán láthatóak.



1. ábra: Szennyvíztisztítás folyamatábrája

2.2. Biológiai tisztítás

A biológiai tisztítás egy eleveniszapos rendszer részeként valósul meg. Itt történik meg a szervesanyagok eltávolítása, az ammónium-ion nitrogénjének oxidációja, az összes nitrogén és foszfor eltávolítása, illetve a lebegőanyag leválasztása.

Fontos része az üzemeltetésnek, hogy megfelelő életfeltételeket biztosítsanak a mikroorganizmusoknak, melyek a lebontást végzik. A biológiai tisztítás műtárgyai a levegőztető medence és az utóülepítő.

A levegőztető medencébe membrándiffúzorokon keresztül, sűrített levegőt vezetnek be. Ez a nitrifikáló baktériumok életkörülményeinek biztosításának a része. Azonban a levegő bevetésével áramlások jönnek létre. A levegő befúvás intenzitásának változtatásával, illetve a buborékátmérő változtatásával jelentős különbségek figyelhetők meg a kialakult áramképek között. A célunk a levegőztető medencéknél az oxigén beoldódás hatékonyságának a javítása részletes áramlási vizsgálatok alapján, a holtterek kialakulásának és az iszap lerakódásának megakadályozása. A 2. ábrán az Észak-pesti szennyvíztisztító műtárgyai láthatóak, kiemelve rajta az eleveniszapos medencéket és utóülepítőket.



2. ábra: Észak-pesti Szennyvíztisztító telep

3. Finombuborékos levegőztetés

Más levegőztető rendszerekkel összehasonlítva a finombuborékos diffúzorok a gazdaságossági előnyeik miatt terjedtek el. A beszerzési költsége alacsony és a karbantartási költségek sem túl magasak, mivel minden diffúzort egyedileg is lehet cserélni meghibásodás esetén.

A levegőztetés hatékonysága fontos szerepet játszik a szennyvíztisztító telep anyagi helyzetében, ugyanis nagyon költséges az eljárás. Minél kisebb buborékok bevezetése szükséges a megfelelően nagy gáz-folyadék felület létrehozásához és a technológia hatékonyságának maximalizálásához.

3.1. Diffúzor típusok



3. ábra: Membrán diffúzor (Grundfos)

A levegőztető rendszerek biztosítják a biokémiai folyamatokhoz szükséges oxigénmennyiség bejuttatását. Minden levegőztető rendszert az oxigénigény, a medence alakja és mérete figyelembevételével terveznek meg. A levegőztetőrendszerek tányér vagy cső típusú levegőztető elemekből és a hozzájuk kapcsolódó gépészetből állnak. A diffúzorok EPDM membránokkal vannak felszerelve, és egy integrált visszacsapó szelepet is tartalmaznak. A 3. ábrán és 4. ábrán diffúzorok láthatóak.

A levegőztető rendszerek apró, közepes vagy nagy buborékokat szolgáltatnak széles levegőmennyiség tartományban ott, ahol oxigénátadásra vagy légáramlásra van szükség. A rendszereket lefedik a medencefenék teljes felületét, levegőztető telepként vagy spirális konfiguráció formájában.

Egyedi megoldások állnak rendelkezésre helyhez kötött vagy visszahúzzható rendszerek formájában. A visszahúzzható rendszert az egyszerű a karbantartás miatt építenek ki, a helyhez kötött rendszer pedig nagy telepek esetében költséghatékony. (Grundfos Kft.)



4. ábra: Tárcsa- és csődiffúzor (BIBUS Kft.)

Két fajta levegőztető elem elterjedt a gyakorlatban, a tányér (tárcsa)- és a csődiffúzor. Mindkét fajta diffúzor telepítési költségei alacsonyak, a rendszer megbízhatósága magas és nagy teljesítményre képes, ezen felül a karbantartási költségek alacsonyak.

A tárcsás diffúzort 270 mm vagy 340 mm átmérőjű tárcsák alkotják, EPDM F14 (standard), EPDM F057 (kis lágyulású), szilikon membrán anyagokból állhat és 1,5-7 m³/ó vagy 2-10 m³/ó működési tartományban üzemeltethető.

A csődiffúzorok 500 mm, 750mm, 1000 mm hosszú modulok, EPDM 7311/003 (standard), EPDM 245 (kis lágyulású), WMQ6001 (szilikon) membrán anyagok alkotják és 1-6 m³/ó vagy 2-9 m³/ó vagy 3-12 m³/ó működési tartományban működőképes. (BIBUS Kft.)

4. A folyadék-levegő kétfázisú áramlás, pulzáció

A levegőztető medencékben víz és levegő kétfázisú áramlás alakul ki. A folyadék-levegő kétfázisú áramlás tipikusan olyan folyadék-gáz áramlás, amelyben a folyadékhányad (térfogatarány [%]) döntő mértékben felülmúlja a gázhányadot. Emiatt buborékos áramlás alakul ki. A finombuborékos levegőztetés esetén a levegőcsóva rengeteg kis átmérőjű folyadékbuborékból épül fel. A feltörekvő csóva medencetérbe belépve ellenáramlást generáló örvényeket kelt maga körül. Ezek a medence fenék felé visszakanyarodó örvények a buborékcsóvát oldalirányú mozgásra kényszerítik, amely hullámszerű periodicitást mutat. Ez egy folyamatos oldalirányú pulzációt gerjeszt. A levegőztetett medencékben ez a fajta kétfázisú áramlás közvetlenül a levegőztető mezők fölött jelenik meg. A levegőztető mezőktől távolodva a levegőcsóvák pulzációja a víztér turbulens struktúráit befolyásolja. Modellalkotásnál ezeket a jelenségeket kell különös tekintettel vizsgálni.

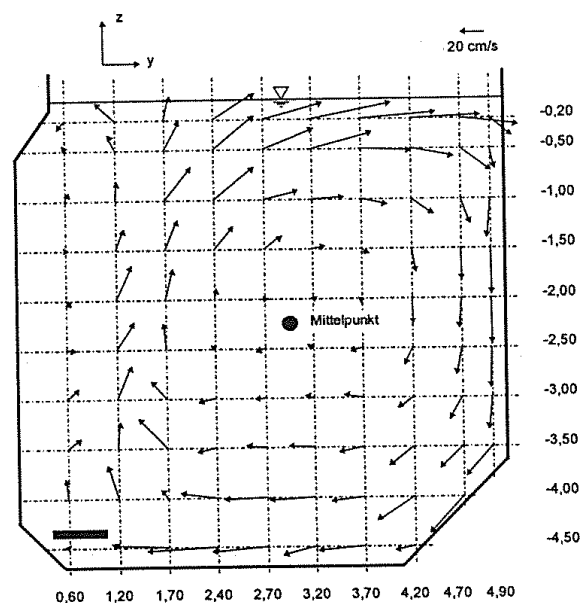
5. A kutatási módszertan

A kutatásunkban három lényegében eltérő mélyégi levegőztetésű medence példáján alkottam numerikus modellt és kalibráltam azt. A modell kalibrációhoz szükséges mérési adatokat Thiersch 2001. mérései szolgáltatták. A mérések akusztikus doppler elvű áramlásmérő szondával történtek. A mérési eredmények csupán a mérési pontokban mért fluktuáló sebességgörbék átlagértékeit tartalmazzák. A numerikus áramlástanai modell kalibrációja és verifikációja során a modelleredmények ezekkel való összevethetőségét vizsgáltam különös tekintettel. A három medencegeometria és a helyszínen mért sebességmezőt (Thiersch 2001) a következőkben mutatom be.

5.1. A vizsgált medencék (Thiersch, 2001.)

5.1.1. Egyoldali elrendezés (Holzkirchen szennyvíztisztító telep, Németország)

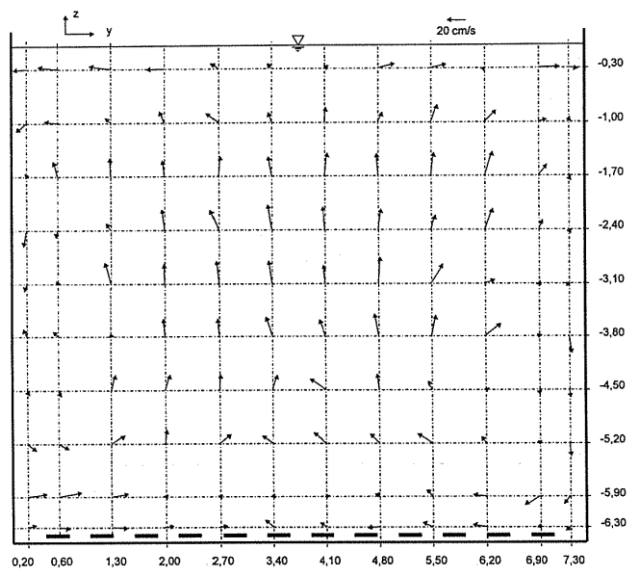
Holzkirchen szennyvíztisztító telepének levegőztetett medencéjében vonal menti egyoldali, aszimmetrikus levegőztetést alkalmaznak, amely jellemzően a levegőztetett homokfogók jellemző légbeviteli módja. Ez esetben a hosszirányú keresztmetszet került részletes vizsgálat alá. A levegőztető elemsort csődiffúzorok alkotják, amely darabonként hozzávetőlegesen 50 cm hosszúak. A medence egyaránt rendelkezik buborékfelhős kétfázisú térrel (bal oldalon a diffúzorok felett) ahol erős fluktuációk jönnek létre, illetve tisztán egyfázisú víz áramlással, ahol a fluktuációk az áramlási tér turbulens struktúráiban éreztetik a hatásukat.



5. ábra: Kialakult sebességek ábrázolása vektorokkal (1. geometria)

5.1.2. Miecbach(MB) szennyvíztisztító telep

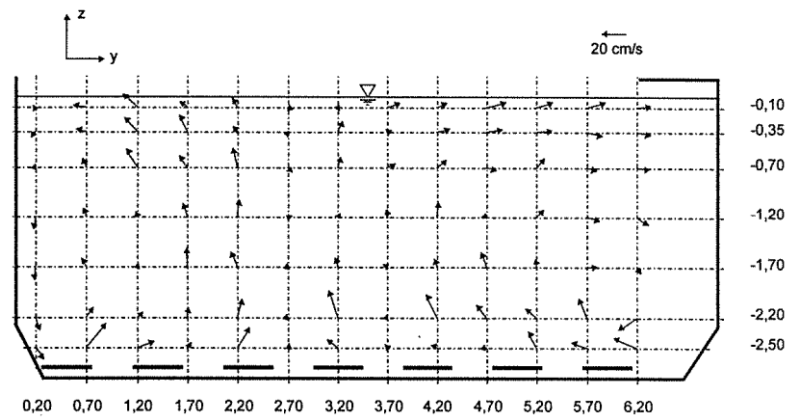
A telep felújítása során a biológiai tisztítási fok egy kaszkád rendszerrel lett kiegészítve, mely elválasztja egymástól a nitrifikáló és a denitrifikáló zónákat. A medence alján tányér diffúzorokat helyeztek el a nitrifikáló zónában, melyek átlagosan 4,85 m³/h levegő bevitelére képesek. A nitrifikációs zóna négy részre osztható, melyek különböző levegőztetési intenzitással üzemelnek, tehát lehetséges az egyes zónákban különböző levegő térfogatot bevinni. A medencében az egész keresztmetszet mentén tisztán kétfázisú víz-buborék áramlás található, mivel a medence teljes terjedelmében el van látva levegőztető elemekkel.



6. ábra: Kialakult sebességek ábrázolása vektorokkal (2. geometria)

5.1.3. Garching(GAR) szennyvíztisztító telepe

Garching telepének medencéjében a levegőztető elemek szabályos raszterben kiosztva a medence fenekén helyezkednek el. A mérés alatt a teljes beinjektált levegő mennyisége megközelítőleg $1270 \text{ Nm}^3/\text{h}$, ami megfelel a $14,8 \text{ Nm}^3/\text{h}$ levegőbevitellel elemenként. A rendszer üzemeltetéséhez szükséges energia $31,5 \text{ W/m}^3$. A kialakítás miatt a medence egyik szélénél nagy távolság maradt a fal és a diffúzorok között.



7. ábra: Kialakult sebességek ábrázolása vektorokkal (3. geometria)

5.2. A modell felépítése

Ezen feladat során egy kétfázisú (víz-levegő) közeget vizsgáltam. A szennyvíztisztítás során a levegőztető medencében valójában egy háromfázisú rendszer alakul ki. Gáz, folyadék és szilárd halmazállapotú anyagok keverednek egymással. A medencékben az iszapkoncentráció 3 és 5 kg/m^3 között alakul. Ez a mennyiség a közeg sűrűségét nem változtatja észlelhető mértékben, az áramlásra nincs hatással. Az iszapfázis ezért a levegőztetés vizsgálatakor elhanyagolható.

A modellben a folyadék és a buborékok interakcióját írjuk le a két fázis elkeveredett állapotában. Ezek alapján használhatóak az egy fázisú rendszerekre érvényes egyenletek, a Navier-Stokes egyenletek. A modellben a két fázisra írjuk fel a Navier-Stokes egyenleteket, majd ezeket erőtanilag úgynevezett fáziscsatoló tagokkal kapcsoljuk egymáshoz. A fáziscsatoló tagok elméleti leírása a buborék és a víz erőtanilag egyensúlyából indul ki.

5.2.1. A modell matematikai háttere

A modell matematikai felépítését az ANSYS FLUENT kezelési útmutatója alapján a következőkben ismertetem (Fluent Users Guide, 2014.).

A térfogatarány reprezentálja azt a teret, amit az egyes frakciók térfogati elfoglalnak, és a tömegmegmaradás valamint az energiaegyenletek alapján ezek aránya külön-külön meghatározható. Az arányszám jelölése: α_q . Az egyenlet megoldható adott időpillanatban az adott helyre vonatkozó egyensúly felírásával az egyes fázisalkotókra.

5.2.1.1. Térfogati hányad

Ha az adott fázis térfogata q , V_q , akkor az egyenlet:

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad 1.)$$

ahol:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad 2.)$$

Többfázisú áramlásban különbséget teszünk az anyag fizikai sűrűsége ρ_q és effektív sűrűsége $\hat{\rho}_q$ között, így az anyag effektív sűrűségét a következőképp adhatjuk meg:

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q \quad 3.)$$

5.2.1.2. Folytonossági egyenlet

A folytonossági egyenlet q fázisra:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) + S_q \quad 4.)$$

ahol:

\vec{v}_q = q fázis sebessége,

\dot{m}_{pq} = tömegátadás p fázisból q fázisnak ,

\dot{m}_{qp} = tömegátadás q fázisból p fázisnak,

S_q = forrástag.

A forrástag lehet nulla, de egy hozzárendelt nullától eltérő értéket is megadhatunk. A számítás során az egyenlet egy fázist referáló sűrűséggel (phase reference density) $-\rho_{rq}$ vagyis átlagsűrűséggel egészül ki:

$$\frac{1}{\rho_{rq}} \left(\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \right) \quad 5.)$$

5.2.1.3. Impulzusmegmaradás egyenlete

A q fázisra az impulzusegyensúly egyenlete, mely tartalmazza a fáziscsatoló tagokat is:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q \vec{v}_q) = & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \bar{\tau}_q + \alpha_q \rho_q \bar{g} \\ & + \sum_{p=1}^n (\vec{R}_{pq} + \dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp}) \\ & + (\vec{F}_q + \vec{F}_{lift,q} + \vec{F}_{wl,q} + \vec{F}_{vm,q} + \vec{F}_{td,q}) \end{aligned} \quad 6.)$$

$\bar{\tau}_q$ q fázis csúsztatófeszültség tenzora és a következőképp határozható meg:

$$\bar{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \bar{I} \quad 7.)$$

ahol:

μ_q = q fázis dinamikai viszkozitása (cP) (shear viscosity),

λ_q = q fázis másodlagos viszkozitása (bulk viscosity),

\bar{g} = gravitáció okozta gyorsulás

\vec{F}_q = tömegerő,

$\vec{F}_{lift,q}$ = felhajtóerő,

$\vec{F}_{wl,q}$ = nedvesítés,

$\vec{F}_{vm,q}$ = virtual mass force, virtuális tömegerő, mely többfázisú áramlásokban egy hozzáadott tömegerő, mely segíti, gyorsítja a folytonos fázisban a buborékokat,

$\vec{F}_{td,q}$ = turbulens diszperziós tényező,

\vec{R}_{pq} = két fázis közötti interakciós erő,

p = nyomás mindkét fázisban,

\vec{v}_{pq} = „interphase velocity”, fázishatár sebessége.

A \vec{v}_{pq} fázishatár sebesség a következőképpen definiálható: ha $m_{pq} > 0$, azaz p fázis q fázisban transzferálódik, akkor $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p$, ha $m_{pq} < 0$, akkor $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_q$. Egyébként, ha $m_{qp} > 0$, akkor $\vec{v}_{qp} = \vec{v}_q$, és ha $m_{qp} < 0$, akkor $\vec{v}_{qp} = \vec{v}_p$.

\vec{R}_{pq} interakciós erőt befolyásoló tényezők a súrlódás, nyomás, kohézió és más egyéb hatások, valamint a következő feltételektől függ: $\vec{R}_{pq} = -\vec{R}_{qp}$ és $\vec{R}_{qq} = 0$, és az alábbi egyenlet szerint határozható meg:

$$\sum_{p=1}^n \vec{R}_{pq} = \sum_{p=1}^n K_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) \quad 8.)$$

ahol:

K_{pq} = folyadék- gáz, buborékos áramlásban kölcsönhatás együttható

\vec{v}_p, \vec{v}_q = fázisok sebességei.

5.2.1.4. Turbulencia

Az elmúlt években a technika fejlődésének köszönhetően az áramlás számítása, numerikus szimulációja (CFD, Computational Fluid Dynamics) gyors fejlődésen esett át. Ezzel lehetővé vált az áramlástan alapegyenleteinek, kontinuitás (tömegmegmaradás), a mozgásegyenletek (impulzus megmaradás), vagy az energiaegyenlet numerikus megoldására épülő szoftverek használata.

Az eljárás alapja az, hogy a vizsgált teret felosztjuk cellákra, ezek lesznek a számítás alapegységei, amikre deriváltakat számolunk. A számítás során véges térfogatok elvét használja a program. Ebből

következik, hogy minden szomszédos cella falán ugyanakkora tömeg-, illetve impulzus áram lép ki és lép be.

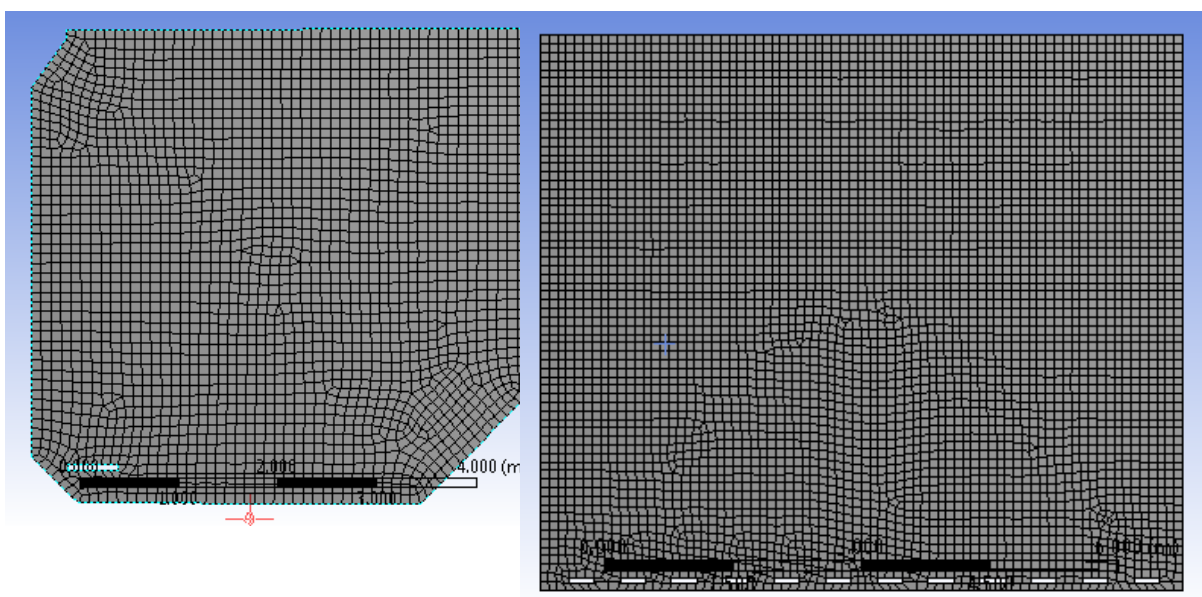
Nehézséget jelent azonban a turbulencia figyelembe vétele. A turbulens sebesség-ingadozások frekvenciája széles skálán mozog, vagyis a turbulens áramkép és az örvények mérete nagyon változó lehet. Ez azt jelenti, hogy nagyon finom felosztású rácshálóra kellene megoldani ezeket a bonyolult differenciálegyenleteket, ami jelentősen növeli a számítási időt és nagyobb kapacitású számítógépet igényel, nem lenne gazdaságos. Ennek elkerülésére a turbulenciát modellezni kell. (Lajos, 2008.)

A modellben $k-\varepsilon$ turbulenciamodelt használtam, azon belül is RNG $k-\varepsilon$ altípust. Ez a standard modellhez $k-\varepsilon$ elvében hasonló, de további finomításokat tartalmaz. Az RNG $k-\varepsilon$ modell a szennyvíztisztító telepi medencék adottságai miatt megbízhatóbb eredményt ad, mint a standard $k-\varepsilon$ modell. (Madarász, 2015.)

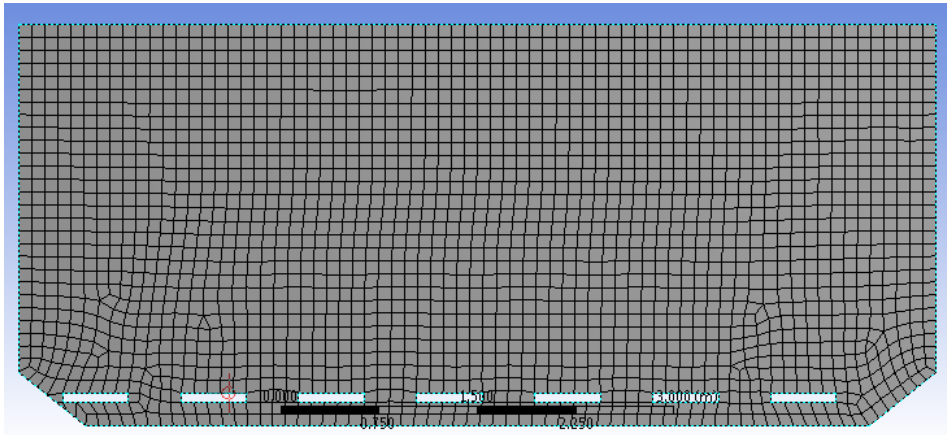
5.2.2. Számítási rácsháló és időlépés

A modell felépítésénél fontos a rácsháló cellaméretének megválasztása és az ahhoz alkalmas időlépés beállítása is. Ez azért fontos, hogy az áramlási folyamatok minél pontosabban leírhatóak legyenek, vagyis a számítási maradéktagokból keletkező numerikus diffúziót lecsökkentsük, amennyire lehet.

A modellt négyzethalós kiosztással építettem fel. A hálóban torzulások keletkeznek, azokon a helyeken, ahol a program nem képes négyzetes kiosztásra, mint a levegőztető elem széleinél. A cellák élhossza 10 cm. Ennél a cellaméretnél a sebességek jól modellezhetők, illetve a turbulens kinetikai energia is jól közelíthető.



8. ábra: Rácsháló az első (bal) és második geometriára (jobb)



9. ábra: Rácsháló a harmadik geometriára

2. Táblázat: Geometriai peremfeltételek

Geometriai elem	Peremfeltétel
Határoló falak	Wall, ami a folyadékteret határolja, sebessége 0 m/s, érdessége 0,0008 m
Vízfelszín	Szimmetriasík gáztalanítás (degassing) funkcióval
Diffúzorok	Levegőbevitel konstans kg/s diffúzióban

Az időlépés megválasztása a cellamérettől függ. Az időlépést a Courant-Friedrichs-Levy (CFL) stabilitási feltétel figyelembe vételével határoztam meg. Ennek ajánlott értéke 1.

A rácsháló nem teljesen homogén, de az átlagos élhosszúság 10 cm amivel számolhatunk, mint Δx érték. Az átlagos áramlási sebesség 20 cm/s, vagyis 0,2 m/s, ami U értéke. Ezek alapján a Δt időlépés:

$$CFL = \frac{U \Delta t}{\Delta x} < 1$$

Így a választott időlépés 0,5 s.

A számítás nulladik időpillanatától levegőbetáplálás történik a medencébe. A szimuláció időtartama 10 perc, vagyis 1200 időlépés. Ezalatt az időtartam alatt a kialakuló áramlás egy kvázi egyensúlyi állapotot vesz fel, vagyis már nem változik nagymértékben.

6. Eredmények

A teljes szimulált időtartam 600 másodperc volt. Ezen időtartam végére egy stabil áramlási képet kaptunk, így elég a szimulált idő végén vizsgálni a kialakult áramlási képeket, amik már közelítenek a végleges eredményekhez (egyensúlyi állapothoz).

Az első geometria esetén egyoldali levegőztetés történt. Ekkor csak egy levegő csóva kelti az áramlást, vagyis egyszerűbben modellezhető, mint a másik két eset, ahol több diffúzorból egyszerre történik a levegőztetés és figyelembe kell venni a levegőcsóvák egymásra hatását is. Már a 400. másodpercre stabil áramlási képet kapunk, ami nem változik mértékadóan a 600. másodpercre sem.

A második geometria esetén, mivel 2D-ben vizsgáltam a medencéket, 12 diffúzorból történik a levegőztetés. A medence 6,5 m mély, a levegőcsóvák erősen befolyásolják egymást és a kialakult áramképet is.

A harmadik geometria esetén 7 levegőztető elemből történik a levegőztetés. Mivel a medence 3,05 m mély, körülbelül fele annyi, mint az előző geometriáé, a csóvák egymásra hatása kevésbé erős, mint a második geometria esetében.

Az áramlási képeken látható, hogy a levegőcsóvák mellett a medencefenék felé mutató örvények a levegőcsóvák szélességét a bevezetés után lecsökkentik. Ez a jellemző buborékméret növekedéséhez vezet a membránok által gerjesztett mikrobuborékok összetételével és összeépülésével.

A 400 – 600 s időlépésig jól láthatóak a levegőcsóvákban megjelenő fluktuációk.

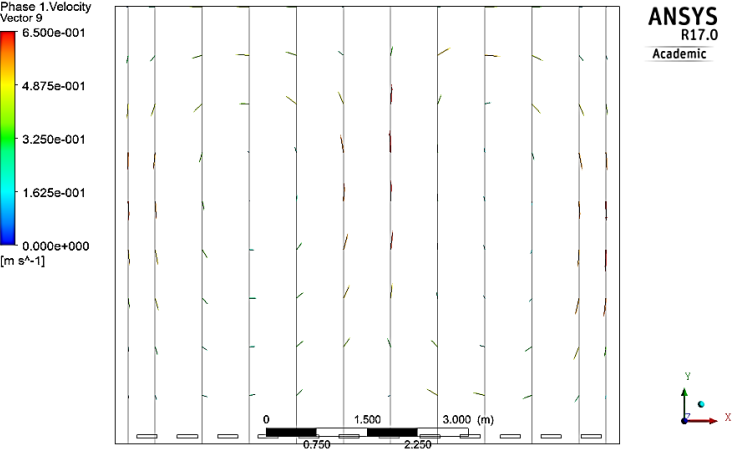
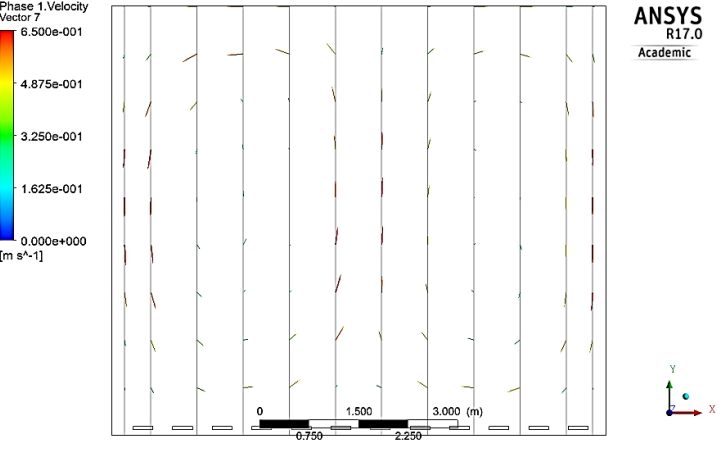
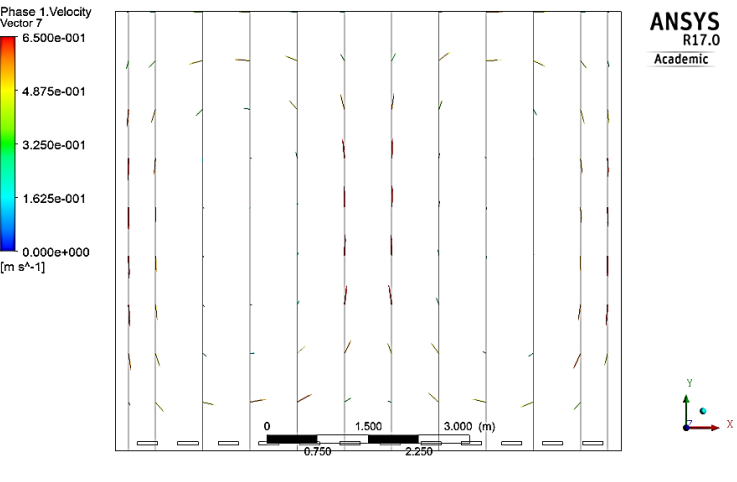
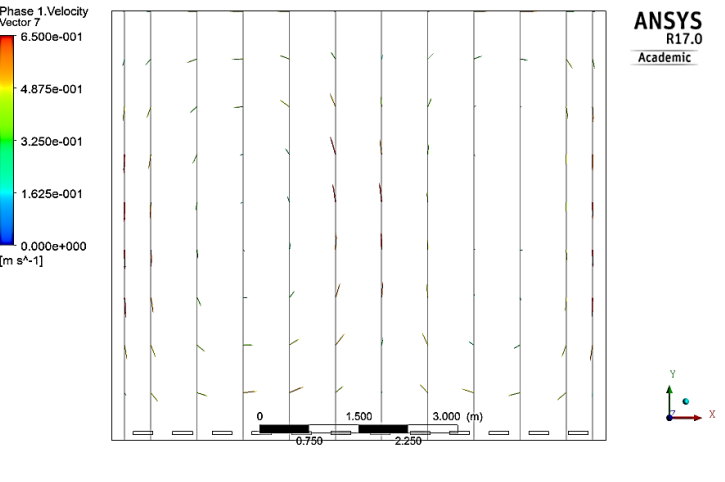
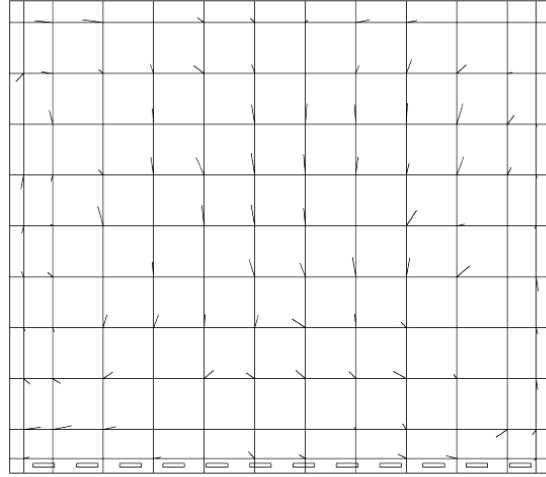
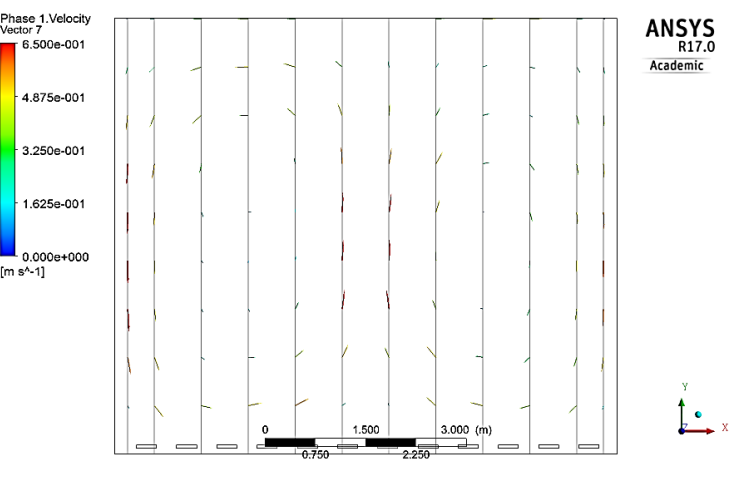
3. táblázatA vizsgált levegőttestesű medencékben a levegő térfogati aránya a szimulált időtartam végén

1. Geometria	2. Geometria	3. Geometria	Időlépés(s)
			400
			450
			500
			550
			600

4. Táblázat: Első geometria mért és számított sebességek összehasonlítása vektoros ábrákon

Időlépés (s)	Számított értékek az első geometriára	Időlépés (s)	Számított értékek az első geometriára	Mért adatok ábrázolása
400		550		
450		600		
500				

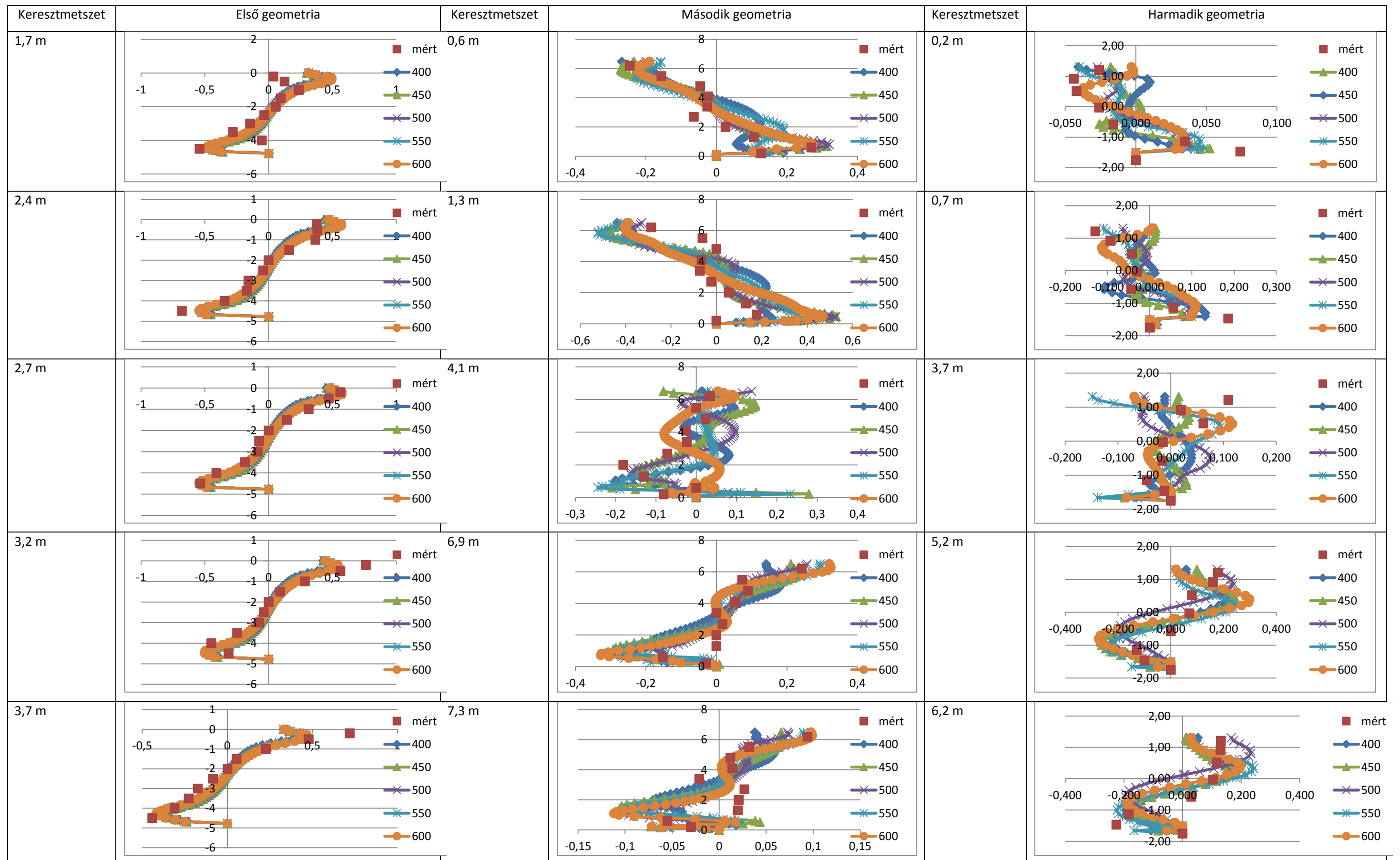
5. Táblázat: Második geometria mért és számított sebességek összehasonlítása vektoros ábrákon

Időlépés (s)	Számított értékek a második geometriára	Időlépés (s)	Számított értékek a második geometriára	Mért adatok ábrázolása
400		550		
450		600		
500				

6. Táblázat: Harmadik geometria mért és számított sebességek összehasonlítása vektoros ábrákon

Időlépés (s)	Számított értékek a harmadik geometriára	Időlépés (s)	Számított értékek a harmadik geometriára	Mért adatok ábrázolása
400		550		
450		600		
500				

7. Táblázat: Összehasonlító diagram az x irányú sebességek változásáról a medence hossza mentén, mind három geometriára 400-600 időpillanatokban



Az áramlási képeken látható, hogy a számított sebességvektorok a mért sebességvektor-mezőt igen jól és pontosan közelítik, a modell az áramlási kép tekintetében jó eredményeket szolgáltat mindhárom vizsgált medence esetén. Az áramlási képeken jól láthatóak a kialakuló hengeráramlások, amelyek a levegőcsóvák terjedési útvonalát és fluktuációját befolyásolják. Ezeknek a struktúráknak a javításával (pl. levegőztető elemek elhelyezése, terelőfalak beépítése, medencegeometria megfelelő változtatása) optimalizálható a rendszer.

A kalibráció és a verifikáció nehézsége a számítási és a mérési eredmények pontosabb összehasonlítását lehetővé tevő szabatos összehasonlításon látszik a mérési profilokban. Alapvetően a számítási eredmények jól leképezik a mért átlagsebességek nagyságrendjét. A buborékkal nem befolyásolt területeken a fluktuáció hatása a számítási eredményeket nem befolyásolja számottevően, a számítási eredmények a különböző időlépésekben is szorosan egymást fedve futnak és igen jól közelítik a mért eredmények lefutását (első geometria 2,7, 3,2 és 3,7 m-nél lévő mérési profil).

A buborékfelhőben lévő mérési profilokban (a második és harmadik geometria) a számított eredmények nagyságrendileg jól közelítik ugyan a mért eredményeket, de látszik a vehemens pulzációjuk a mért adatsorok körül. A buborékfelhőkben tehát az alkalmazott egy adott időpontbeli állapotot vagy mért görbék számtani közepét rögzítő mérések a kétfázisú EULER – EULER modell kalibrációjára és verifikációjára csak nagyságrendi szempontból pontosak. Pontos kvantitatív kalibrációt és verifikációt a pulzációk kimérésével lehet elvégezni. Ez megfelelő időtartamú pontbeli mérésekkel és a turbulens sebességgörbék pontos statisztikai kiértékelésével, valamint megfelelő időléptékű mozgóátlagokat is figyelembe vételével lehetséges.

7. Összefoglalás

Tanulmányomban Magyarországon úttörő és hiánypótló jelleggel vizsgáltam a nagyvárosi szennyvíztisztító telepek levegőztető medencéiben végbemenő áramlási folyamatokat.

Folyadék-levegő kétfázisú EULER-EULER kétfázisú (víz-levegő) modellt hoztam létre.

A modell kalibrációját és verifikációját már meglévő nagyvárosi szennyvíztisztító telepeken végzett helyszíni mérések alapján kalibráltam és verifikáltam.

A modellel számított eredmények a mért eredményekkel alapvetően jó egyezést mutattak.

A levegőztetett térben a légbefúvó elemek közvetlen környezetében a számított áramlási kép nagyon jól közelíti a levegőcsóvák oldalirányú pulzáló áramlását. A számított eredmények nagyságrendileg ugyan jól eltalálja a mért eredményeket ugyanakkor az egy állapotot rögzítő sebességadatokat a dinamikus modell pontos kalibrálására nem alkalmasak. A víz – levegő kétfázisú áramlást leképező modellt a mért turbulens sebességgörbék oly módú statisztikai értékelésével lehet kalibrálni, ahol a pulzációkat és azok dinamikáját a mérések során részletesen értékeljük.

Jövőbeli kutatási célkitűzésem önálló mérési kampányok elvégzése hazai levegőztető medencéken és a modell ezekkel történő kalibrációja és verifikációja.

A modell jól alkalmazható levegőztető medencék tervezésében, optimalizációjában és üzemeltetési stratégiáinak kidolgozásánál.

8. Táblázatjegyzék

1. Táblázat: A nyersszennyvíz és tisztított szennyvízre érvényes határértékek.....	4
2. Táblázat: Geometriai peremfeltételek	17
3. táblázat A vizsgált levegőztető medencékben a levegő térfogati aránya a szimulált időtartam végén	19
4. Táblázat: Első geometria mért és számított sebességek összehasonlítása vektoros ábrákon	20
5. Táblázat: Második geometria mért és számított sebességek összehasonlítása vektoros ábrákon ..	21
6. Táblázat: Harmadik geometria mért és számított sebességek összehasonlítása vektoros ábrákon	22
7. Táblázat: Összehasonlító diagram az x irányú sebességek változásáról a medence hossza mentén, mind három geometriára 400-600 időpillanatokban.....	23

9. Ábrajegyzék

1. ábra: Szennyvíztisztítás folyamatábrája	5
2. ábra: Észak-pesti Szennyvíztisztító telep.....	6
3. ábra: Membrán diffúzor (Grundfos).....	7
4. ábra: Tárcsa- és csődiffúzor (BIBUS Kft.)	8
5. ábra: Kialakult sebességek ábrázolása vektorokkal (1. geometria).....	10
6. ábra: Kialakult sebességek ábrázolása vektorokkal (2. geometria).....	11
7. ábra: Kialakult sebességek ábrázolása vektorokkal (3. geometria).....	12
8. ábra: Rácsháló az első (bal) és második geometriára (jobb)	16
9. ábra: Rácsháló a harmadik geometriára	17

10. Irodalomjegyzék

Lajos Tamás (2008.), *Az áramlástan alapjai*

Bernhard Thiersch (2001.), *Der Zusammenhang von Strömungsstrukturen und Sauerstoffeintrag bei druckbelüfteten Belebungsbecken*

Madarász Emese (2015.), *Levegőztetett homokfogók keresztmetszeti vizsgálata numerikus áramlástanai szimulációval*

Fluent (2014.), User's Guide 14.5

Sotiris P. Evgenidis, Thodoris D. Karapantsios (2014.), *Effect of bubble size on void fraction fluctuations in dispersed bubble flows*

<http://www.bibus.hu/termekek/szivattyutechnika-es-levegoszteto-komponensek/levegoszteto-elemek/> (2016.)

<http://hu.grundfos.com/products/find-product/diffuser.html#brochures> (2016.)