

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

*Épület körül kialakuló áramlás
megjelenítése óriás
szappanbuborékokkal*

TDK dolgozat

Keszte István, Kovács Boldizsár, Vincze Mihály

Konzulens: Dr. Kristóf Gergely, Áramlástan Tanszék

Budapest, 2013. október 30.

1 Tartalomjegyzék

2	Absztrakt.....	4
3	Irodalmi áttekintés.....	5
3.1	Épületek körüli áramlás modellezése	5
3.1.1	Épületek egyszerűsített modelljei	5
3.1.2	Az 1:1-es modellkísérlet létjogosultsága	8
3.2	Áramlások megjelenítésének módszerei	10
3.3	Képfeldolgozás.....	12
3.3.1	Lencsetorzítás	12
3.3.2	Háttér eltávolítás (background subtraction)	13
3.3.3	Objektumkövetés (object tracking).....	14
3.4	Szappanbuborékok előállítása.....	15
3.4.1	Buborékok fizikai jellemzői.....	15
3.4.2	Buborékanyag kémiai összetétele	17
3.5	Buborékgép	18
3.5.1	Kézi buborékfújók, pálcák	18
3.5.2	Gépesített módszerek	19
4	Módszer leírása	20
4.1	A mérés főbb eszközei.....	22
4.1.1	Buborékanyag és előállítása	22
4.2	A kísérleti buborékgép felépítése és működése	23
4.2.1	Digitális kamerák.....	25
4.2.2	Szélesség mérő	25
4.3	A mérés folyamata	26
4.3.1	Megfontolások a mérés időpontja és helyszíne szempontjából.....	26
4.3.2	Mérési eszközök elhelyezése a helyszínen	27
4.4	A mérések folyamata.....	29

4.5	Képfeldolgozás.....	30
4.5.1	Lencsetorzítás	30
4.5.2	Háttér eltávolítás.....	31
4.5.3	Objektumkövetés	31
5	Eredmények	32
5.1	Felvételek közben mért szélességek.....	32
5.2	Megfigyelt áramlási képek, I. mérés	34
5.3	Megfigyelt áramlási képek, II. mérés	38
5.4	Egyéb tapasztalatok.....	42
5.5	Mérés közben felmerülő problémák.....	43
5.5.1	A videók feldolgozásának problémái	43
6	Süllyedési sebesség mérés	44
6.1	Mérés leírása	44
6.2	Eredmények	45
7	Konklúzió és továbblépési lehetőségek.....	46
8	Köszönetnyilvánítás	47
9	Irodalomjegyzék.....	48
10	Ábrajegyzék	50

2 Absztrakt

Ezen TDK dolgozat során a kitűzött feladat az épületek körüli áramlás megjelenítése, amit óriás (15-20 cm átmérőjű) szappanbuborékokkal valósítunk meg. A megjelenített áramlás nagy felbontású digitális fényképezőgépekkel illetve kamerákkal kerül megörökítésre, amelyek felvételeit számítógépen feldolgozzuk, az áramlás képét kirajzoljuk.

Célunk, hogy feltérképezzük az óriásbuborékos megjelenítési mód alkalmazhatóságát, előnyeit és korlátait mérés technikai szempontokból. A szélcsatornás kisminta kísérleteknél a Reynolds-szám állandósága nem biztosítható, így az 1:1 arányú mérés a numerikus szimulációk validálására is alkalmasabb.

Kiválasztottuk az alkalmas folyadékot, majd a buborékképzési folyamatot részlegesen automatizáltuk, ami könnyebb és reprodukálhatóbb méréseket eredményezett. Ezt követően a dolgozatban bemutatjuk a buborékok süllyedési sebességének meghatározására irányuló előkészítő kísérleteket, a helyszíni kísérletet, a mérés folyamatát, a kísérleti berendezést, továbbá az eredményeit tartalmazó képanyagot. Tárgyaljuk a kísérleti módszer érzékenységét a környezeti változókra: szélesebb és változékonyság, a hőmérséklet és a páratartalom, fényviszonyok.

A kutatás része ezen felül a grafikus információ elemzése, az erre használható képfeldolgozó módszerek áttekintése, valamint hogy ezek mennyire használhatóak a buborékpályák rekonstruálására. Célunk ezzel a buborékok felvételen történő észlelhetőbb megjelenítése majd követése, és a pályák alakjának lehető legpontosabb meghatározása. A felvételek elemzése során a pályák 2D-s rekonstrukciója megvalósult, alapját képezve a jövőbeni 1:1 méretarányú szimulációs modellekkel való közvetlen összehasonlításnak.

A feladat gerince az áramlás valós léptékű megjelenítése, melyre tudomásunk szerint még nem volt példa Magyarországon.

3 Irodalmi áttekintés

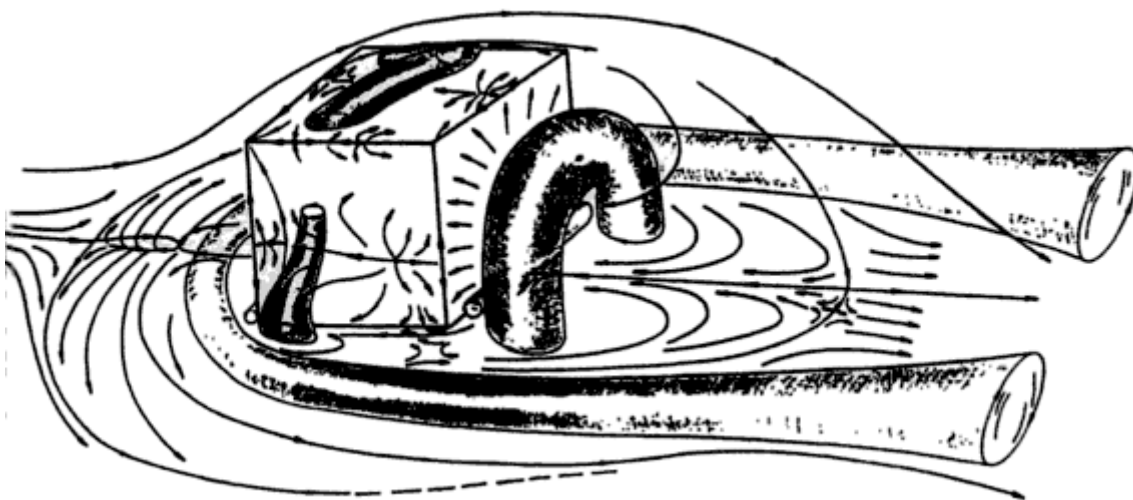
Ebben a fejezetben az épületek körüli áramlások modellezésének, vizualizációs módszereinek irodalmát tekintjük át, valamint a képfeldolgozási eljárásokat. Végül a szappanbuborékok fizikai és kémiai tulajdonságait részletezzük.

3.1 Épületek körüli áramlás modellezése

Az épületek körüli áramlások vizsgálata (Lajos, 2004) fontos a nagy épületekre – például sportcsarnokokra - ható erők megismeréséhez, valamint a városi szennyeződés terjedés és városklíma kutatások szempontjából.

3.1.1 Épületek egyszerűsített modelljei

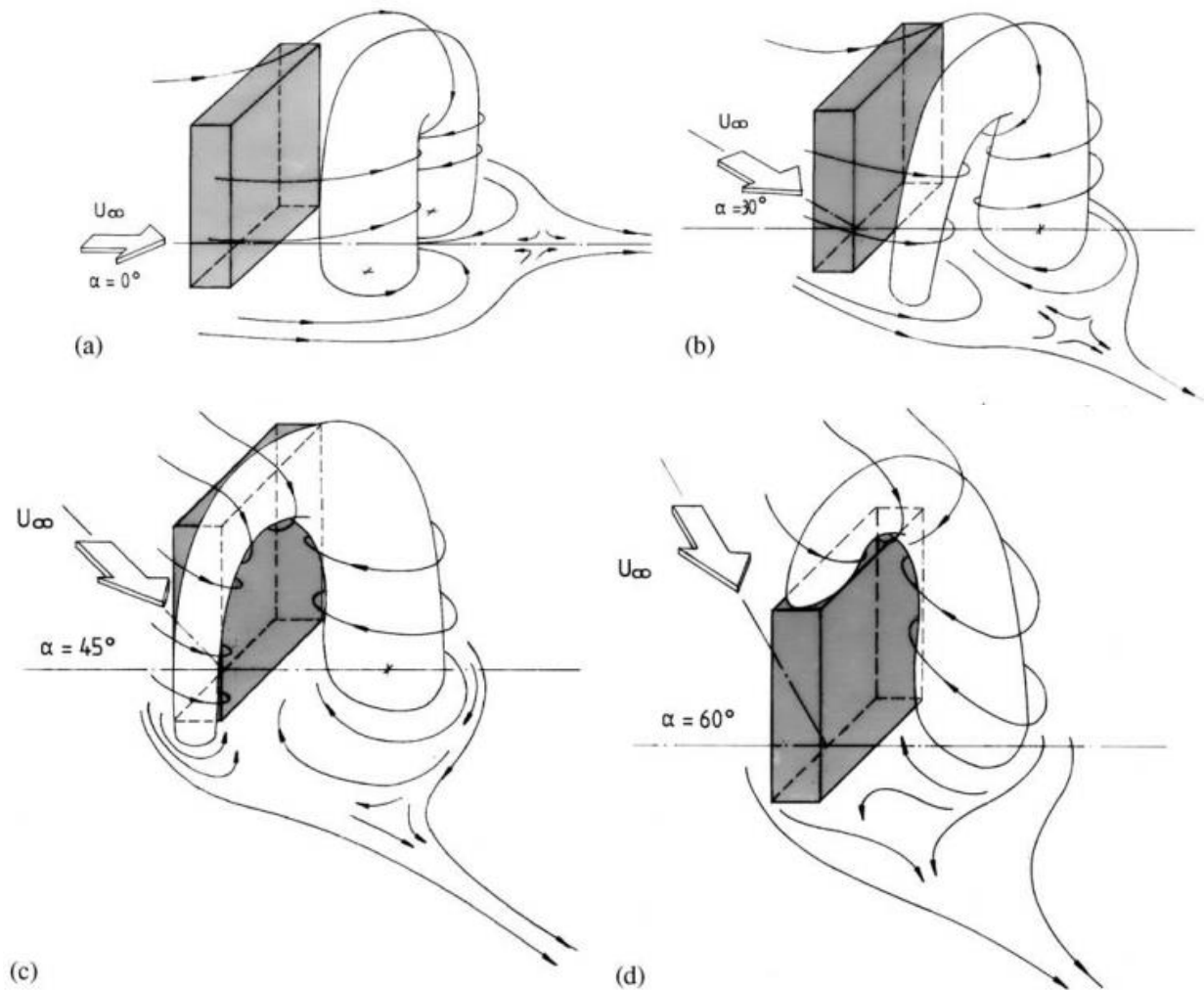
Cermak (1993) városklíma kutatása során az épületek körüli áramlásokat téglatest körüli áramlásokkal közelítette. Az 1. ábrán megfigyelhető két, a jelen dolgozat szempontjából is fontos struktúra, a téglatest után található leválási buborékban félköríves örvénylés (ún. portal vortex), valamint a téglatestet megkerülő patkóörvény.



1. ábra: Kocka körül kialakuló áramlási képek (Cermak, 1993)

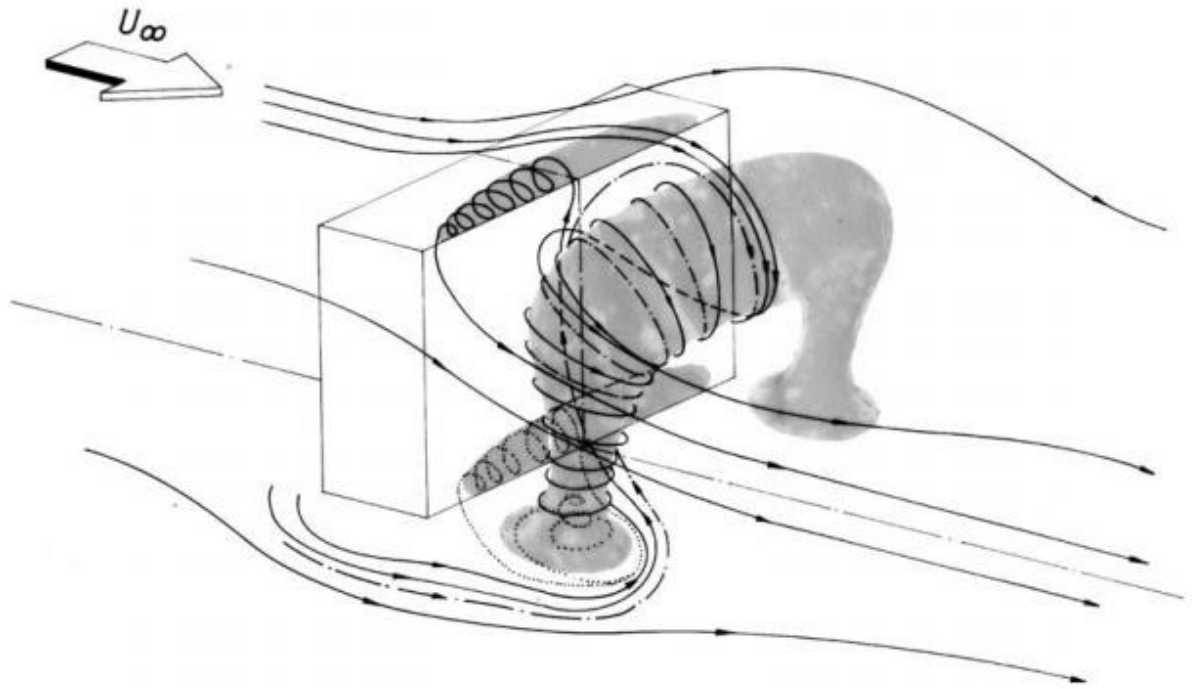
Becker (2002) szerint szintén egy széllel megfűjt épület közelíthető egyszerű testekkel, például hasábokkal, hogy a mögöttük kialakuló jellemző áramképeket tanulmányozhassuk. Tanulmányában megállapítja, hogy különböző szögállásból egyenletesen megfűjt hasáb mögött különböző alakú, a portal vortexhez hasonló félköríves örvények találhatóak. Ezek a 2. és 3. ábrán is láthatóak a körülöttük kialakuló áramvonalakkal együtt. Az áramlás

irányához képest négy különböző szögállásban tartva a hasábot, különböző áramképek láthatóak mögötte.



2. ábra: Hasáb körül kialakuló struktúrák, a megfújás iránya szerint (Becker, 2002)

A mi esetünk Becker (2002) kísérletének (b)-(c)-(d) esetéhez hasonlatos a szögállás szempontjából. Pontosan beazonosítani az eseteket nem tudjuk, hiszen a geometria valódi épületeknél sokkal összetettebb, és az uralkodó távolféri sebesség irányát nem mértük, csak becsültük. Az általunk használt buborékos módszer egyelőre csak az áramkép egy kisebb térbeli szeletét tudja vizualizálni, vagyis a teljes struktúrának egy részét ismerjük meg az épületnél, amelyből a többi részére nem tudunk biztosan következtetni. A pontosabb szélirány pedig a mérésünk alapján készülő CFD modell egyik ismeretlene, amelyet illeszteni kell majd.



3. ábra: Épület mögött kialakuló örvények

Kanda (2006) egy városi környezetet modellezett a COSMO (Comprehensive Outdoor Scale Model Experiment for Urban Climate) elnevezésű kísérletben több, egymás mellé helyezett, fűtött, 1,5 m méretű kockával. Ezen mérés során egy tömötten épített lakónegyed hőmegtartását vizsgálták a szélesebb és szélirány függvényében. A jelen dolgozat fő mérései során az épületek hőkibocsátását elhanyagoltuk, de amennyiben folytatjuk a kutatást ezen a területen, ezt a paramétert is figyelembe kell venni.

3.1.2 Az 1:1-es modellkísérlet létjogosultsága

Első közelítésben állandó viszkozitású és sűrűségű közegként értelmezhetjük az épület körüli levegőt, amelyet a Navier-Stokes egyenlet ír le (Lajos, 2004).

$$\frac{\partial \underline{v}}{\partial t} + \underline{v} \cdot \nabla \underline{v} = \frac{1}{\rho} (-\nabla p + \mu \Delta \underline{v}) + \underline{g} \quad (1)$$

Ahol

- $\underline{v}$ - közeg áramlási sebesség vektora
- t - idő
- ρ - közeg sűrűsége
- p - közeg nyomása
- μ - közeg dinamikai viszkozitása
- ∇ - nabla operátor
- Δ - Laplace operátor
- $\underline{g}$ - nehézségi gyorsulás vektor

Lajos (2004) könyvében kifejti, hogy kicsinyített modelleken végzett kísérletek során nehéz, vagy lehetetlen a valóságos méretű és a kicsinyített modell teljes hasonlóságát biztosítani. A hasonlósági feltétel a Navier-Stokes egyenlet dimenziótlanításából következik. Példaként az x irányú komponensegyenlet alakja:

$$\frac{\partial \left(\frac{v_x}{v_0} \right)}{\partial \left(\frac{t}{l_0 / v_0} \right)} + \frac{v_x}{v_0} \frac{\partial \left(\frac{v_x}{v_0} \right)}{\partial \left(\frac{x}{l_0} \right)} + \dots = \frac{g_x l_0}{v_0^2} - \frac{\partial \left(\frac{p - p_0}{\rho v_0} \right)}{\partial \left(\frac{x}{l_0} \right)} + \frac{\nu}{v_0 l_0} \left(\frac{\partial^2 \left(\frac{v_x}{v_0} \right)}{\partial \left(\frac{x}{l_0} \right)^2} + \dots \right) \quad (2)$$

Az egyenletben két dimenziótlan csoport, a Reynolds-szám és Froude-szám jelenik meg. Ezek tartalmazzák a jellemző méretet, jellemző sebességet, a közeg viszkozitását és a gravitációs gyorsulást.

A Reynolds-szám:

$$Re = \frac{v_0 l_0}{\nu} \quad (3)$$

Ahol

- v_0 – jellemző áramlási sebesség
- l_0 - jellemző hossz méret
- ν - közeg kinematikai viszkozitása

A Froude-szám:

$$Fr = \frac{v_0}{\sqrt{gl_0}} \quad (4)$$

Ahol v_0 – jellemző áramlási sebesség
 l_0 – jellemző hossz méret
 g – nehézségi gyorsulás

Légáramlási eset kicsinyített modellje esetén gyakorlati megvalósítási problémák miatt a gravitációs gyorsulást és a viszkozitást állandónak kell tekinteni. Ekkor azonban csak a jellemző sebességet és a jellemző méretet tudjuk módosítani. Ha tehát célul a két dimenziótlan mennyiség azonosságát tűzzük ki a modell és valós esetről, akkor ellentmondásba ütközünk:

$$Re_m = Re \Rightarrow \frac{v_{0m}}{v_0} = \frac{l_0}{l_{0m}} \quad (5)$$

$$Fr_m = Fr \Rightarrow \frac{v_{0m}}{v_0} = \sqrt{\frac{l_{0m}}{l_0}} \quad (6)$$

Látható, hogy ha a jellemző sebességet a modellben például kétszeresére növelnénk, a Reynolds-szám azonosságához feleakkora méretre, a Froude-szám azonosságához négyszer akkora lenne szükség. A kettőt tehát egyszerre biztosítani lehetetlen.

Lajos (2004) szintén említi, hogy ha a Reynolds-szám értéke nagy, akkor az áramlások önhasonlóvá válnak, azaz ha a modell Reynolds-száma lényegesen kisebb, akkor sem okoz nagy különbséget az eredmény szempontjából, mindkét áramlás turbulens marad. Ezt kihasználva, amikor a modell kicsinyítésének mértéke nagy, és emiatt hatalmas sebességet kellene egy szélcsatorna kísérletben létrehozni, nem tartják be a Reynolds kritériumot. Ez jellemzően gyors járműveknél és nagyon nagy épületeknél fordul elő. Ez viszont azzal járhat, hogy bizonyos áramlási struktúrák módosulnak, a miniatűr modellek nem adják helyesen vissza a valódi méretű épület körüli áramlás alakját.

3.2 Áramlások megjelenítésének módszerei

Merzkirch (1987) által leírt módszereket három fő csoportra oszthatjuk:

1. Felületi áramlási sémák

Egy áramló közeg felületre kifejtett hatásának vizsgálata. Általában a felületet egy olyan réteggel vonják be, amely változást mutat az áramlás valamelyik tulajdonságától függően. (olajfilmmel fedett felszín, felületből kiálló bojtok)

2. Részecske követő módszerek

Az áramló közegbe valamilyen, azzal hasonló sűrűségű részecskéket juttatva, majd helyzetüket képen vagy képsorok rögzítve nyomvonalak és pályák rajzolhatók ki. (direkt injektációs módszerek, fénysík módszerek)

3. Optikai módszerek

Eltérő törésmutató mérésen alapuló módszerek. A törésmutató függ a sűrűségtől és anyagminőségtől. Ezen változásokat képesek a módszerek kimutatni. (schlieren módszerek, shadowgraph)

A buborék módszer egy direkt injektációs módszernek tekinthető. Ezek közös jellemzője, hogy az áramló fluidumba valamilyen tőle különböző tulajdonságú anyagot juttatunk, így annak mozgását vizsgálva, következtethetünk az áramlási sémákra. Általában folyadékba valamilyen színezéket, gázba füstöt juttatva, nyomvonalak vagy pályák rajzolódnak ki, amelyekből az áramlási térre következtetni lehet.

Lajos (2004) is felsorol számos áramlás megjelenítésére szolgáló módszert, amelyek közül több is használható nagy méretű épületek körüli mérésekhez.

Egyik módszer a pontbeli sebesség irányát vizualizáló kis zászlócskák, szalagok. Ezt a módszert alkalmazta, mikor épület körüli áramlás méretazonos vizsgálatát végezte Wagaman (2002). A kísérletben a leválási buborék méreteit és abban kialakuló áramlásokat tanulmányozott. Ehhez több rögzített anemométert és vizualizáció céljából acélkeretre erősített műanyag szalagokat használt. A szalagok mozgását kamera rögzítette. Az épület szélirányhoz képesti két különböző állását vizsgálta meg. A leválási buborékok belsejében kialakuló áramlási struktúrák hasonlóságát állapította meg.

Gyakran használt módszer az olajköd és füstfáklya (Lajos, 2004). Az köd forralt és széndioxiddal lehűtött olaj fehér „füstje”, míg a füstfáklya valódi égés koromtartalmát használja fel. Ezek a módszerek nyomvonalat mutatnak meg, amely stacioner áramlás esetén az áramvonalakkal is megegyezik. Alkalmasak egyrészt kis sebességeknél káros anyag terjedésének modellezésére, nagyobb sebességeknél a sebességtér vektorainak, turbulencia

fokának szemléltetésére. Előnyös tulajdonságuk, hogy a megjelenítő részecskék süllyedése és tehetetlensége kicsi. Nem használhatóak jól azonban instacioner áramlásoknál, mert ilyenkor nem mutatják meg az áramvonalakat, a turbulens áramlásban pedig összekeverednek. Továbbá a megjelenített áramvonalak sebességeinek nagyságáról sem adnak információt.

Másik módszer a fényszóró részecskék áramoltatása. A fényszóró részecske sokféle lehet, ide tartoznak a szappanbuborékok is. Ezek a módszerek pályákat mutatnak, amelyek a részecskék tehetetlensége és süllyedési sebessége miatt nem egyeznek meg az áramvonalakkal, viszont előbbiek ismeretében az áramvonalak rekonstruálhatóak. További előnye a módszernek, hogy instacioner esetben is információt tud adni az áramlási térről. Példaként a St. Anthony Falls Laboratory (Weblap 4) munkatársai szélkerekek mögötti örvényleválásokat jelenítettek meg téli hófúvásban, a hópelyhek éjszaka speciális reflektorral való megvilágításával.

Két korszerű módszer, a lézer Doppler anemometria (LDA) és az áramlás szemléltetésén alapuló sebességmérés (Particle Image Velocimetry, PIV) nemcsak kvalitatív, hanem számszerű információt is ad az áramlás sebességteréről. A mi törekvésünk is egy hasonló, kvantitatív információt is szolgáltató mérési módszer fejlesztése.

Az LDA lényege (Durst, 1981), hogy az áramlásba helyezett fényvisszaverő testeket meghatározott hullámhosszú fénnel világítjuk meg, és a visszavert fényt érzékelőkkel felfogjuk. A detektor és a részecske relatív sebessége miatt a fény Doppler-eltolódást szenved, és ennek mértékéből ez a relatív sebesség meghatározható.

A PIV lényege, hogy az átlátszatlan részecskék digitális kamerával vannak felvéve, és a két képkocka közt megtett út alapján becsülhető a pillanatnyi sebességük. Gyakori a lézersíkkal való megvilágítás, de lehet reflektorral is (Weblap 4). Amennyiben a részecskék száma olyan kevés, hogy egyenként követhetővé válnak, már PTV-ről (Particle Tracking Velocimetry) beszélhetünk. Jelen kutatásban is alkalmazzuk ezt a módszert, itt a természetes fényt használjuk fel, és perspektivikus vetületi sebességet tudunk kimutatni.

Cheng (2006, 2003) folyadékban kialakuló buborékok követését tanulmányozta képsorozatokon. Kézi, majd automata template alapú módszert fejlesztett ki hőátadási jelenségek vizsgálatára. A template a kép egy apró része, amely minden képkockán felfedezhető. Kézi módszer esetén a template-et a felhasználó jelöli ki, Cheng (2003) módszerében ez egy kör alakú képdarab. Ennek a továbbfejlesztett változatában (Cheng, 2006) a buborékkövetést automata módon az algoritmus végzi el, az előzetesen kijelölt template-ek felismerésével és követésével.

Folyadékban kialakuló levegőbuborékok pályájának 3D rekonstrukcióját valósította meg Xue (2012). A pályák, avagy trajektóriák előállításához egy virtuális sztereó képet használtak. A buborékok képét, egy tükörrendszerrel képezték le a kamera érzékelőjére, így egy kamera képén a vizsgált tér két különböző nézete volt látható egyszerre. Ezzel az elrendezéssel pontos 3D pályarekonstrukciót értek el. A módszer a jelenleg tárgyalt 1:1 méretarányúnál kontrolláltabb körülmények között, egy a rögzített kamerához képest szintén rögzített tartályban kialakuló buborékok vizsgálatára alkalmas.

3.3 Képfeldolgozás

A következőkben a videók elemzését megkönnyítő módszerek ismertetése következik, különös tekintettel az ebben az esetben felhasználható, felhasználni érdemes módszerekre.

3.3.1 Lencsetorzítás

A valóság torzításmentes leképzése elengedhetetlen a pontos, videó felvételen alapuló helymeghatározáshoz. Az általunk használt, olcsó, kisméretű, széles tartományban állítható fókusz távolságú kézi kamerák azonban, különösen a skála alacsony tartományában (nagy látószög), erősen torz képet rögzítenek. Ezért a kamerák kalibrálása, és a torzítás lehetőség szerinti csökkentése fontos feladat, különösen a tervezett térbeli rekonstrukció esetében.

A kamera lencsék torzításának első modelljét Conrady (1919) alkotta meg decentrálo torzításra (decentering distortion). A modellt Brown (1966) továbbfejlesztette, a lencsék torzítását leíró modellt radiális és decentrálo tagokra osztotta, megalkotta a Brown-Conrady modellt, amit azóta széles körben használnak. Az évek során matematikailag továbbfejlesztették.

A lencsék torzítása Beauchemin (1999) szerint radiális, decentrálo és vékony prizma (thin prism distortion) tagokból áll. A decentrálo torzítást a lencsék optikai középpontjának nem tökéletes illeszkedése okozza. Ilyen hibát az összeszereléskor, gyártás során elkövetett pontatlanságok okoznak. Radiális és tangenciális elemekből tevődik össze. A vékony prizma torzítás abból adódhat, hogy a szenzor a leképező lencserendszer optikai tengelyére nem tökéletesen merőleges. A radiális torzítás a leképezés velejárója, az optikai középpontra szimmetrikus befelé vagy kifelé eső eltolódást okoz a kép pontjain.

J. Mallon (2004) szerint, ideális esetben egy térbeli pont egy torzításmentes leképezés esetén egy síklapon: $p_u = (x_u, y_u)^T$. Az ehhez tartozó torzított képpont: $p_d = (x_d, y_d)^T$. Az optikai tengelytől mért sugárirányú távolságok: $r_u = \sqrt{x_u^2 + y_u^2}$ és $r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$. A torzítást kifejező többváltozós egyenletek: $f_u = (f_x(x_u, y_u), f_y(x_u, y_u))^T$ alakban írhatóak fel. Ilyen esetben a torzított képpontok a torzítatlanokhoz képest:

$$p_d = p_u + k_1 r_u^3 + k_2 r_u^5 + k_3 r_u^7 + \dots, \quad (6)$$

ahol: k_n - méretező tényezők

p_d - a torzított pont

p_u - a torzítatlan pont

r_u - a torzítatlan pont optikai tengelytől mért távolsága

3.3.2 Háttér eltávolítás (background subtraction)

Egy rögzített kamerával készült videó felvételen mozgó objektum észlelésének egyik széles körben használt módja a háttér eltávolítás. Ennek módszere egy a helyszínt jól reprezentáló referencia kép generálása (a háttér), majd a videó képkockáinak ettől a modelltől való eltéréseinek vizsgálata. A háttér általában a mozgó objektumoktól mentes helyszín, amelyet változó fényviszonyok vagy más változások miatt célszerű meghatározott időközönként frissíteni. Az eltérések jelentik a mozgó objektumokat, az előteret.

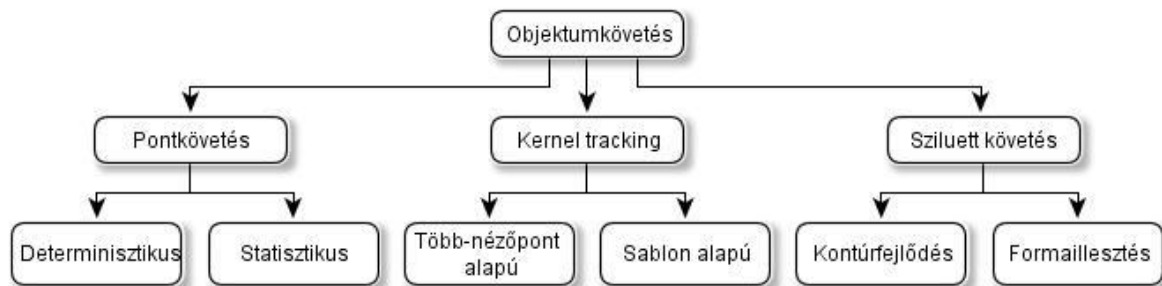
A legegyszerűbb módszer az egymást követő képkockák különbségeinek vizsgálata (frame differencing). Itt a háttér a vizsgált képkockát megelőző képkocka. Ha vizsgált képkocka adott pixelének eltérése az előző képkockától egy előre meghatározott küszöbnél nagyobb, a pixel az előtérhez tartozik.

Az ennél bonyolultabb modellek általában a háttér egy képkockaként folyamatosan frissülő értékkel, vagy eloszlással jellemzik (running Gaussian average, temporal median filter).

Wren (1997) módszere (running Gaussian average) a háttér minden egyes pontjához egy rá jellemző normál eloszlást rendel, amelyet mindig az utolsó n képkocka figyelembevételével frissít. A futó átlag a Gauss eloszlás legmagasabb valószínűséghez tartozó pontjához az átlag szín tartozik. A vizsgált ponthoz a vizsgált időintervallumon előforduló színeket így egy normáloszlással jellemzik. A különbségképzés folyamán azt vizsgálják, hogy mekkora valószínűséggel keletkezett a pont színe az eloszlásból. Az ettől jelentősen eltérő pontok az előtér pontjai.

3.3.3 Objektumkövetés (object tracking)

Yilmaz (2006) szerint az objektumkövetés lényege a mozgó objektumok pályagörbéjének előállítása. A pályagörbe az objektum egymást követő képkockákon elfoglalt helyzetéből adódik. Az ehhez szükséges két feladat, azaz az objektum minden képkockán való megkeresése és a megjelölt pontok közötti összefüggés keresése együtt, vagy külön-külön végezhető el. A második esetben a lehetséges objektum pontok egy algoritmusból adódnak, majd egy másik algoritmus a megjelölt pontokra képkockák közötti összefüggést keres. Az első esetben az algoritmus az egy pont helyzetére és küllemére vonatkozó információt folyamatosan frissítve keresi. A második esetben az új képkockákon a helyzetre és identitásra (azaz, hogy melyik pont melyik) vonatkozó információt együtt keresi. A módszerek felosztása Yilmaz et al. (2006) szerint:



4. ábra: Objektumkövetési módszerek (Yilmaz, 2006)

Pontkövetés (point tracking): az észlelt objektumok pontszerűek és a kapcsolatot a képkockák között az egymás utáni állapotok határozzák meg. Az észlelet pontok mozgása szerint az identitás összefüggésének keresése alapulhat statisztikus vagy determinisztikus módszereken. A determinisztikus módszerek minden ponthoz a képkockán egy előző képkocka pontját rendelik, majd egy teljes kockára vonatkozó értéket, ami az összefüggés jószágát jellemzi. Ez az érték alapulhat pl. távolságon (lassan mozgó pontok esetén) vagy állandó sebességvektortól való eltérése (egyenletesen, egyenes vonalon mozgó pontok esetén), közös elmozdulás vektoron (együtt mozgó pontok esetén), pontok közötti távolságon (merev test pontjai esetén) stb.. A statisztikus módszerek az észlelés hibáit és a véletlenszerű objektummozgást is figyelembe veszik.

Kernel követés (kernel tracking): egy meghatározott alakú és mintázatú képdarab követése. Az alakzat lehet téglalap, ellipszis vagy más egyszerű forma. A minta mozgása a képkockákon keresztül rögzítésre kerül. A minták rögzítésének módszere lehet template vagy több nézőpont. A template modellek viszonylag egyszerűek, attól függően, hogy egyszerre

egy vagy több objektumot képesek követni, egyedüli vagy többes objektumkövetésről beszélhetünk. A template objektumkövetés esetén az algoritmus a képkocka egy részletét (template) próbálja azonosítani a követő képkockákon. Több nézőpont modellek esetén az objektumra jellemző template nem egy meghatározott, esetleg képkockaként frissülő képdarab, hanem több különböző nézőpontból rögzített kép. Az objektum nézetei a követés előtt készülnek el. Ezzel a módszerrel bonyolultabb alakzatok követése is lehetséges, az objektumhoz viszonyított nézőpontváltozás esetén is.

Sziluet követés: (silhouette tracking): a bonyolultabb, egyszerű geometriai alakzatokkal nem leírható objektumok (pl. emberek) követésére alkalmas. Az objektum követése az általa elfoglalt terület képkockánkénti felismerésével történik.

3.4 Szappanbuborékok előállítása

3.4.1 Buborékok fizikai jellemzői

A levegő és a buborékanyag közti felületi feszültség (Robinson, 2001; Lajos, 2004; Dewar, 1919) okozza egy buborékfújó keretében a szappanhártya egyenes felületét, ugyanis a buborékanyag megpróbál minél kisebb felületen érintkezni a levegővel. Szabadon szálló szappanbuboréknál pedig a gömbalak jellemző. Ilyenkor valamilyen külső hatás eredményeképpen, például levegő fújása miatt a kezdetben egyenes film önmagába záródik, és próbál minimális felületű lenni, azaz egyetlen cseppé összehúzódni. A benne foglalt levegő azonban a térfogatcsökkenésre nyomásnövekedéssel reagál, és így a belső túlnyomás és a felületi feszültség összehúzó hatása egyensúlyba kerül. Fontos tény, hogy a nagyobb buborékokban kisebb túlnyomás uralkodik, mint a kisebbekben, valamint az is, hogy a kisebb felületi feszültség szintén kisebb nyomásnövekedést okoz.

A felületi feszültség mérésének egyik egyszerű módszere, ha síklapra helyezett buborék geometriai jellemzőit vizsgáljuk (Fortes, 2001). Ennek lényege, hogy három anyag találkozásakor, az egymással szembeni felületi feszültségek (a felületi feszültség anyagpárra értelmezendő) erőegyensúlyt alakítanak ki a találkozás pontjában. A síklap és folyadék között valójában adhézió alakul ki, de az a felületi feszültséggel azonos jellegű hatás, ezért együtt kezelhetőek. Az erőegyensúly miatt a buborékfilm a felülethez képest egy megadott szögben fog állni, és amennyiben ismert a levegő és síklap közötti felületi feszültségi tényező, a másik kettő számolható a szögállást felhasználva.

A víz felületi feszültsége viszonylag nagy, ezért csak igen kicsiny buborékokat lehet vele létrehozni. A felületi feszültség csökkentés ezért fontos óriás buborékok készítésénél.

A szabadon szálló buborék alakját érdemes minden esetben gömbnek tekinteni. Kang (2008) szerint, ha egy buborék nem érintkezik más felülettel, – tehát szabad állapotában van, – gömb alakban stabilan megmarad. Továbbá állítja, hogy számos más alakzataból is idővel gömb alakba rendeződik, még akkor is, ha több buborékból áll össze, és az összeolvadást feltételezzük.

A buborékfilm hosszútávon nem stabil, a buboréknak adott élettartama van, ami a mérés szempontjából nagyon fontos, mert hosszú pályákat szeretnénk lekövetni. A film egyrészt párolog, tehát fokozatosan vékonyodik. Másrészt a buborékfilm vastagsága nem állandó (Dewar, 1919), az idő előrehaladtával a film anyaga folyamatosan rendeződik át a felső részekből az alsóba. A felső rész így fokozatosan vékonyodik, az alsó rész vastagodik. E jelenséget, amely az 5. ábrán is látható, kísérleteink során megfigyeltük. Ez elsősorban a nagy (kb. 1 m átmérőjű) buborékoknál válik jelentőssé. Ekkor már a hatás annyira erős, hogy néhány másodpercig marad csak meg a buborék, így ekkora méretűek már nem alkalmazhatóak a kísérletben. További probléma, hogy ekkora méretben már nem maradnak meg gömb alakban, felületük hullámoz, szélben forogni kezdenek és szétszakadhatnak.



5. ábra: A nagyméretű szappanbuborék alján hamar „összegyűlik” a folyadékfilm anyaga

A vékonyodásnak tulajdonítható a buborék elpusztulása, ugyanis a túl vékony hártya már nem lesz képes megtartani a buborék belsejében uralkodó túlnyomást, és az így felszakad, a buborék leépül.

A buborék áramlástanilag szemcseként értelmezhető. A szemcse áramlásba helyezve saját tehetetlenséggel és süllyedési sebességgel rendelkezik (Lajos, 2004). A süllyedési sebesség képlete

$$w_s = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho_f) g}{18\mu} \quad (7)$$

ahol d_p - a szemcse átmérője

ρ_p - a szemcse sűrűsége

ρ_f - a közeg sűrűsége

g - a gravitációs gyorsulás

μ - a közeg dinamikai viszkozitása

A későbbi numerikus szimulációk számára ezek fontos bemeneti adatok. A süllyedési sebesség képlete tartalmazza a szemcse sűrűségét, amelyet egy szappanbuborék esetén csak az átmérő, és az anyag utólagos tömegmérésével lehetséges meghatározni (Dewar, 1919). Emiatt a mérésünkben a süllyedési sebességet nem a képlet alapján számítjuk, hanem közvetlenül mérjük ki egy különálló kísérlet keretében.

3.4.2 Buborékanyag kémiai összetétele

Az előző fejezetből kiderült, hogy a buborékot a felületi feszültsége tartja egyben. Minél kisebb a levegő és a buborékanyag közti felületi feszültségi tényező, annál könnyebb nagy buborékot létrehozni (Lajos, 2004; Dewar, 1919), ezért azt csökkentő adalékanyagokat kell a vízben oldani, hogy jó buborékanyagot kapjunk.

3.4.2.1 Mosogatószer és glicerín használata

Minden, általunk használt forrás glicerín és szappan együttesét javasolja vízben oldva alapként, így tesz Dewar (1919) is, és a szappanbuborékok készítésével foglalkozó honlapok is (Weblap 2; Weblap 3). A ma kereskedelmi forgalomban kapható mosogatószerek szappanoknak tekinthetők. A szappanok ún. tenzidek, melyeknek alaptulajdonsága, hogy vízben oldva kisebb felületi feszültséggel rendelkeznek, mint a tiszta víz (Bakó, 2011). Sűrűségük az vizes oldatban nem állandó, nagyobb koncentrációban vannak jelen a felületen, mint az oldat belsejében.

A tenzidek molekuláris szerkezete aszimmetrikus; általában hosszú apoláris, hidrofób részből és poláris, hidrofil részből állnak. A glicerín hidrofób anyag, ezért a vizet taszítja, azonban a szappan hidrofób feléhez csatlakozni tud. A szappan hidrofil vége pedig a vízmolekulákhoz csatlakozik, azaz a glicerint a vízben emulgeálja. Egy glicerincsepp körül micellákhoz hasonló szerkezetekbe rendeződik a szappan, ez a fajta szerkezetbe rendeződés is hozzájárul a szappanbuborék oldat kis felületi feszültségéhez, és szívósságához.

Dewar (1919) szerint a levegőben található mikroszkopikus szennyeződések rontják a buborékanyag minőségét és élettartamát, ezért kísérleteit tisztított levegőjű laboratóriumban végezte. Szabad térben ilyen tisztításra nincs lehetőség. Hasonlóan a szennyeződésekhez, a levegő páratartalma is befolyásolja az élettartamot, szárazabb levegőben a buborék intenzívebben párolog. Erősen nedves levegőben pedig akár arra is képes, hogy vizet vegyen fel.

3.4.2.2 Síkositó használata

Az internetes források számos alkalommal javasolják receptjeikben síkositók használatát a szappanbuborék oldatban (Weblap 2). Mi állatorvosi síkositót használunk, ezek általában kálium karboximetil-cellulózt tartalmaznak (Weblap 1).

A karboximetil-cellulóz (Baker, 1982) egy felületaktív anyag, kis koncentráción is nagy viszkozitást mutat, és habosító hatású. Ezek a tulajdonságok előnyösek egy szappanbuborék anyagában (Weblap 2). Tapasztaltuk, hogy az általunk használt síkositóval jobb buborékokat tudtunk készíteni, nőtt az élettartam, az ellenálló képesség a környezettel szemben – nagy sebességű szél szétszakító hatása, ütközés fallal – és a „megszületések” száma is, azaz hogy a gép hálójából nagyjából hány buborék jön ki egy teljes fordulat alatt.

3.5 Buborékgép

3.5.1 Kézi buborékfújók, pálcák

A kereteket, amelyeken egy folyadékhártya feszül és buborékok kifújására használják, köznyelvben pálcáknak nevezik (Weblap 2; Weblap 3). Egy buborék képezésére megfelelő pálcának néhány fontos tulajdonsága van. A felületnek nedvesedőnek kell lennie (Dewar, 1919), mert a száraz illetve hidrofób felületen a film nem marad meg. Műanyagok és természetes polimerek (kenderspárga, pamut) megfelel a célnak. Vastag, nedvszívó anyag a leghatékonyabb, mert a folyadék tárolására is képes. A folyadékba merítés után sokkal hosszabb ideig képes a hártyát fenntartani, és a lefújt buborékfilmet is pótolja, ezért egyetlen

merítésből több buborék állítható elő. Dewar (1919) ezt a pótlást a buborékfújó kapillárisba való csepegtetéssel oldotta meg.

Problémát jelent a buborékok kifújásánál a leszakadás pillanata, amelynek mechanizmusát Robinson (2002) vizsgálta. Kísérletében hengerpalást alakú filmet hozott létre két kör alakú keret segítségével, és széthúzásuk után hártya szétszakadását, és újrendeződésének dinamikáját szimulálta és mérte. Amikor a film a ráfújó levegő miatt már nem tud a kerethez csatlakozni, hasonló mechanizmus megy végbe: A film a kifújástól felületét megnöveli, elvékonyodik. Ekkor képtelen ellentartani a ráfújó levegő által okozott túlnyomásnak és a keretről leszakad. A kereten a hártya visszarendeződik a keret síkjába. A leszakadt hártya jó esetben ilyenkor a gömb alakba rendeződik, és buborékká válik, de gyakran előfordul, hogy nem képes erre, és egyetlen cseppé épül le. Tapasztalatunk szerint korábban említett síkosító hozzáadásával a leszakadáskor sokkal több buborék marad meg a keret elhagyásakor.

3.5.2 Gépesített módszerek

Az automata buborékgép ötletét más, jelenleg is kereskedelmi forgalomban levő buborékgépek adták (Videó 1, Videó 2). Ezen gépezetek lényege ugyanaz: egy forgó, középpontosan szimmetrikus keretet egy szappanbuborék alapanyaggal töltött edénybe félig belemártanak, az edény felett pedig ventilátorral levegőt fújnak. A kerékkel ekkor egy fél fordulatot megtéve a folyadékanyagba mártott, szappanhártyás fele bekerül a ventilátor áramlásába, és így a buborékok kifújódnak. A kerék másik fele pedig belemerül a folyadékba. A gépezet tehát revolverszerűen, folyamatosan gyártja a buborékokat.

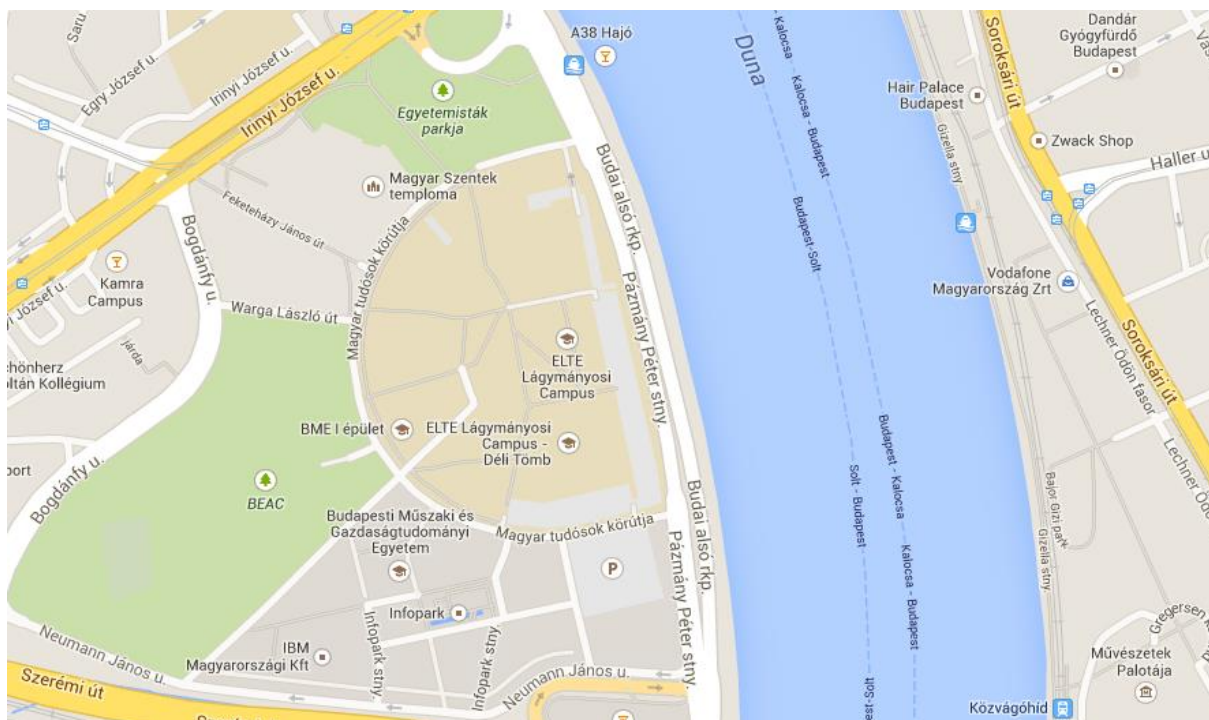
4 Módszer leírása

A módszer leírása tartalmazza két fő helyszíni mérés eszközeit, a mérések leírását és a választott képfeldolgozási módszert. A két mérést hasonlóságaik miatt közös fejezetben taglaljuk, ahol a két mérés közötti különbségekre mindig kitérünk.

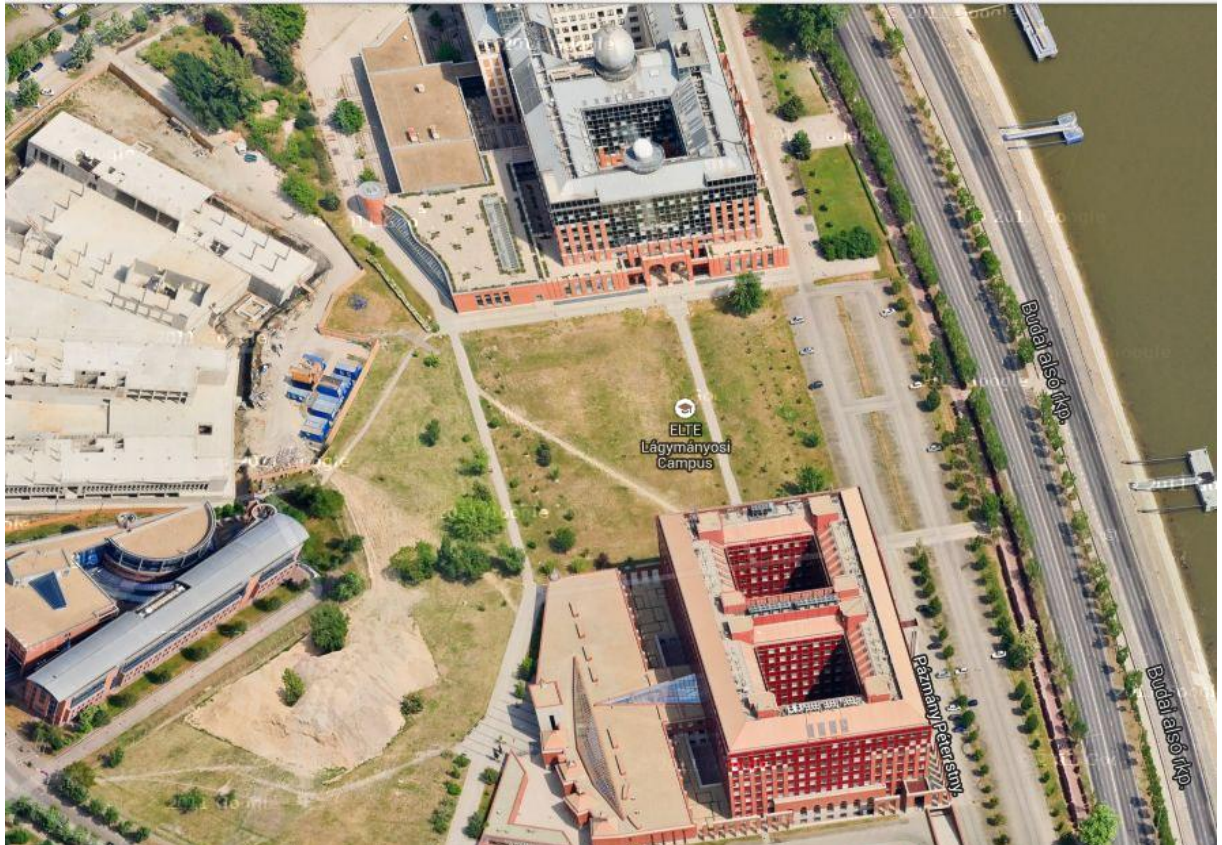
Egy épület közelében buborékokat juttattunk a levegőbe és két kamerával rögzítettük azok útját. A dolgozat során két mérést dolgozunk fel, ezeket római számmal jelöljük a továbbiakban.

A mérések helyszíne a 6.-9. ábrán látható.

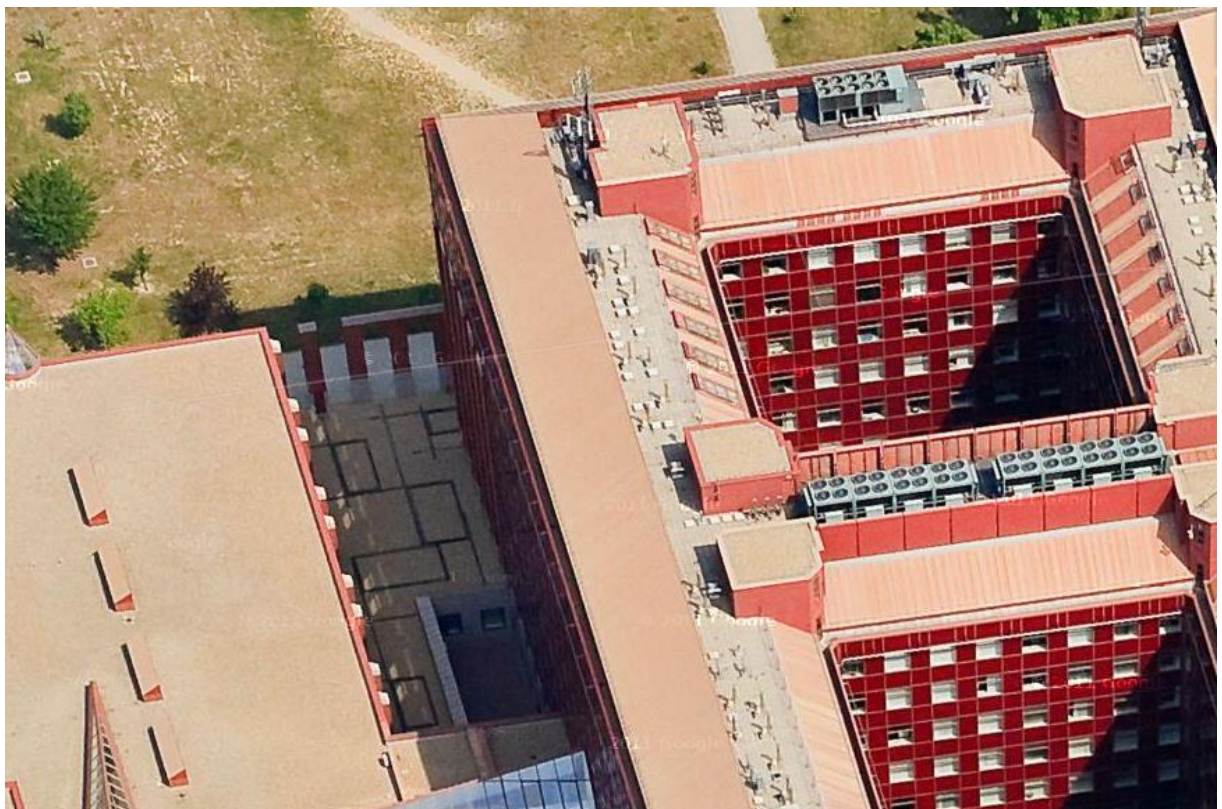
Mérések helyszíne:	ELTE Lágymányosi Campus
	1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1.
I. mérés	helye: ELTE L.C. Déli tömbjének északnyugati sarka
	időpontja: 2013.09.28
II. mérés	helye: ELTE L.C. Északi tömbjének délkeleti sarka
	időpontja: 2013.10.03



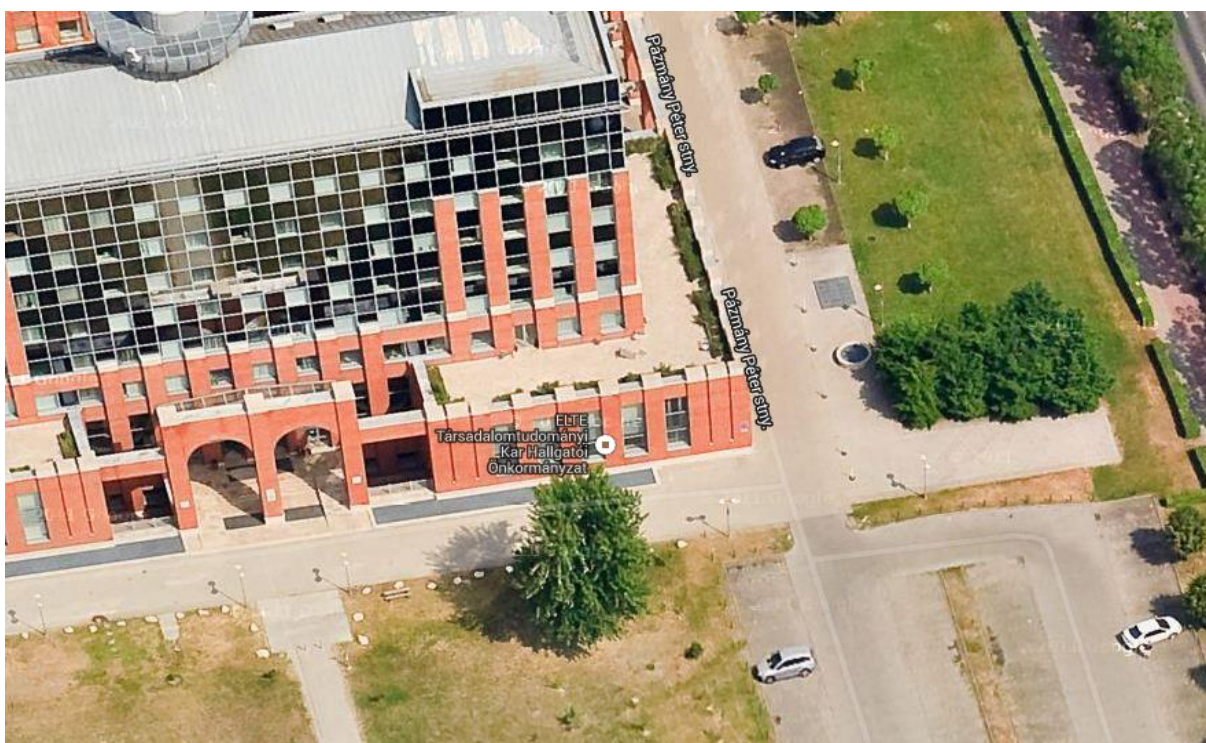
6. ábra: Az ELTE Lágymányosi Campus Budapesten (Google Maps)



7. ábra: Az ELTE Lágymányosi Campus felülnézeti képe (Google Earth)



8. ábra: Az I. mérés helyszíne a kép bal felső részén látható sarok, és az onnan kiinduló árnyékos beszögellés. (Google Earth)



9. ábra: A II. mérés helyszíne a kép közepén látható épület sarka, a teraszon. (Google Earth)

4.1 A mérés főbb eszközei

4.1.1 Buborékanyag és előállítása

A buborékanyag receptje, térfogategységekben (liter) és térfogatszázalékban (liter/liter):

Csapvíz	1 liter	86,2 %
Mosogatószer (Jar Lemon)	0,1 liter	8,62 %
Síkosító (Kerbl VetGel)	0,04 liter	4,64 %
Glicerín	0,001 liter	0,862 %
<u>Polipropilén-glikol</u>	<u>0,001 liter</u>	<u>0,862 %</u>
Összesen	1,16 liter	100 %

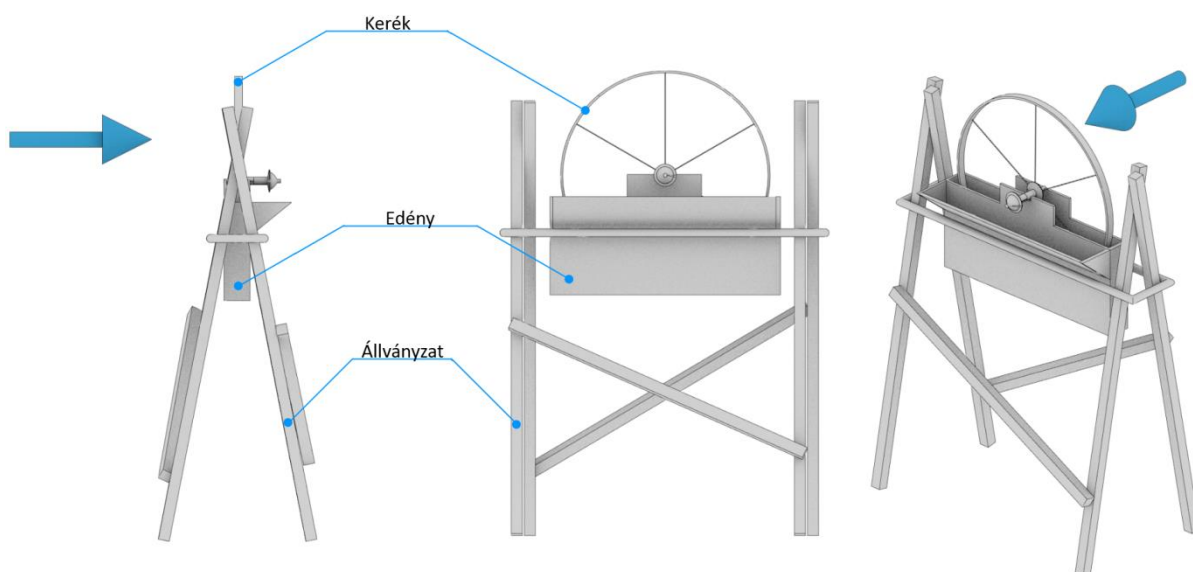
Az összetevőket egy edénybe öntve elkeverjük fakanállal, szobahőmérsékleten. Amikor már nem látszik fázishatár az oldatban, a folyadékot állni hagyjuk. Nem tapasztaltunk szoros összefüggést az anyag pihentetésének ideje és a buborékok tulajdonságai között, bár ezt a

szappanbuborékokkal foglalkozó honlapok ajánlják (Weblap 2, Weblap 3). Az általunk vizsgált oldatok pihentetési ideje 0-4 nap volt.

A buborék, ahogy az korábban elhangzott, kisebb felületi feszültségű anyag, mint a víz. A kísérlethez használt keverékek felületi feszültségét nem mértük, mert azok élettartama elégséges volt. Ha a jövőbeli kutatásnál a buborékanyag fejlesztése fontossá válik, érdemes a felületi feszültséget is vizsgálni, mivel kapcsolatban lehet a buborék minőségével, élettartamával.

A folyadékban figyelembe kell venni az egyes összetevők környezetterhelő, esetlegesen élőlényekre mérgező hatását. Egy kísérlet során nagyjából 5x1,16 liter folyadékot terítünk szét a környezetünkön. Ennek tartalma 0,5 liter mosogatószer, 0,2 liter síkosító, 0,005 liter glicerin és 0,005 liter polipropilén-glikol. Ezeknek egyike sem súlyosan mérgező, vagy környezetterhelő, de a módszer továbbfejlesztése és esetlegesen nagy számú alkalmazása esetén ez a tényező is fontossá válhat.

4.2 A kísérleti buborékgép felépítése és működése



10. ábra: A buborékgép felépítése

A 10. ábrán látható gépezet alkatrészei:

- **Kerék:** Egy 30 cm sugarú, városi biciklikerekből lett átalakítva. A felni 3 cm széles. A biciklikerek 6 küllője a kerék saját tengelyének egyik oldalára van rögzítve, így a kerék által elfoglalt térfogat minimális. A küllők közé kötve jó nedvszívó képességű, vastag pamutfonál van, szabályos mintában.
- **Edény:** A kerék méretéhez szabott, 10 mm vastag műanyaglapokból összeragasztott víztároló edény. Belső űrtartalma 50x600x300mm. Mérések során nagyjából 6 liter folyadékot tart meg egyszerre. Két magasztás található rajta, vágattal. Ezek szolgálnak a kerék tengelyének megtámasztására. Csapágyazás a kis igénybevételre való tekintettel nincs. A ráhelyezett kerék majdnem félig elmerül benne. Egyik oldalára habgyűjtő van ragasztva, így csökkentve a gépezet környezetterhelését.
- **Állványzat:** Egy összecusukható fa bakból, és egy fa keretből áll. A kerethez kötött tartómadzagokba kell az edényt helyezni. A keretet a sátorszerűen széthajtott bakra helyezve a buborékokat nagyjából 1,5 m magasságból tudjuk kiereszteni.



11. ábra: A buborékgép működés közben

Ahogy a 11. ábrán látható, a kézzel hajtott kerék egyik fele a folyadékba merül, a másik felén hártya feszül, amelyet a természetes szél fúj ki buborékokká. Az edény elejére habtartó rész van erősítve, mert működés közben a folyadék felhabosodik. Amennyiben a szélerősség túl kicsi (kisebb, mint kb. 1 m/s), egy különálló processzorhűtő ventilátorral segítjük a folyamatot.

4.2.1 Digitális kamerák

2 db nagyfelbontású digitális kamerát használtunk a mérés során.

1. Kamera adatai

Típus:	Samsung HMX-H200
Lencse:	Schneider Kreuznach Varioplan HD Lens
F érték	1.8
Fókusz távolság	F= 3.2mm - 64mm
Szenzor:	BSI CMOS
Szenzor méret:	1/4.9"

2. Kamera adatai

Típus:	Nikon D3100
Objektív:	AF-S DX Zoom-Nikkor 18-55mm f/3.5-5.6G ED II
Szenzor:	CMOS
Szenzor méret:	23.1 x 15.4 mm

4.2.2 Szélsebesség mérő

A mérés során szélsebesség méréshez szárnykerekű anemométert használtunk, amelyet egy digitális multiméterhez csatlakoztattunk.

Szárnykerekű anemométer

Termék neve	DOTSMANN Precision sensorprobe
Gyári száma	52AC 0000 v 071117

Digitális multiméter

Termék neve	DOTSMANN Precision Measuring instrument
Típusa	P600
Gyári száma	67007110690 v3.10

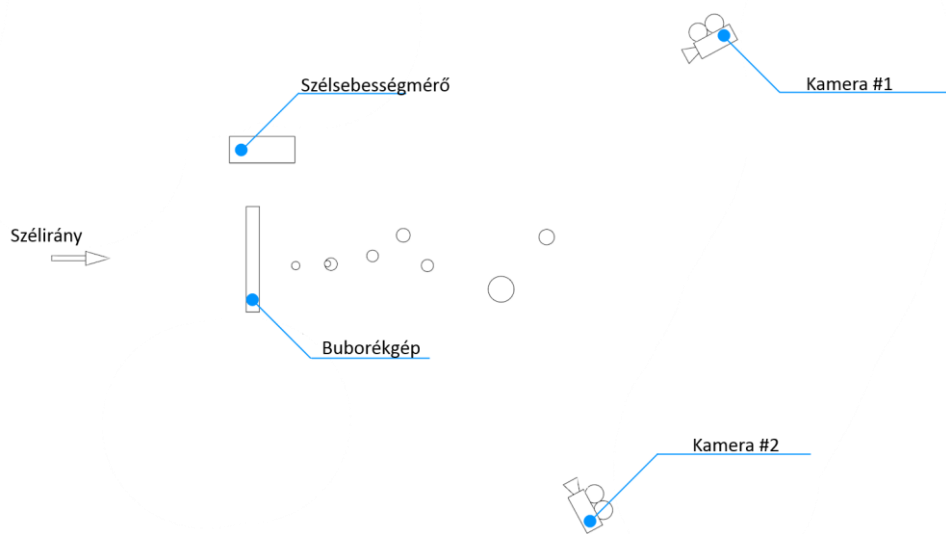
4.3 A mérés folyamata

4.3.1 Megfontolások a mérés időpontja és helyszíne szempontjából

A megfelelő helyszín és időpont keresése az egyes mérésekhez a következő megfontolások mentén történt:

- A vizsgált épület geometriája minél egyszerűbb legyen, hogy könnyű legyen megbecsülni a várhatóan kialakuló turbulencia helyét, alakját.
- A mért épület előtt és után minél több szabad tér legyen, hogy a távotér áramlása zavartalanul érhesse az épületet. Budapesten a Duna parti épületek felelnek meg leginkább ennek a kritériumnak.
- A buborékokat lehetőleg egy határréteg leválás előtt, annak közelében tudjuk kiereszteni. Praktikusan ez a mért épület sarka, ami után közvetlenül egy leválási zóna kialakul.
- Az ég derült, napsütéses legyen. Ilyenkor a buborékok felülete csillogó, erősebben elüt a háttértől, mint felhős időben.
- A megfelelő szélsébség körülbelül 1-4 m/s. Túl nagy szelek nem biztos, hogy a buborékgép működése szempontjából problémát okoznak, azonban ilyen nagy szél már borult idővel jár. A szélsébség növekedésével a buborékméret csökken, ebből a szempontból a kisebb szélsébség előnyösebb.
- A levegő páratartalma a buborékok élettartama szempontjából lehet fontos, mivel a párolgás szárazabb levegőben nagyobb. Ennek mérése azonban nem feltétlen szükséges, mert a szokványos környezeti páratartalmak az esetek nagy részében több mint 1 perc élettartamot biztosítanak a buborékoknak, ami teljesen megfelelő a számunkra.
- A levegő mikrorészecskékkel való szennyezettsége kicsi legyen. Ezt nem tudtuk mérni és biztosítani, így nem vettük figyelembe.

4.3.2 Mérési eszközök elhelyezése a helyszínen



12. ábra: Általános mérés elrendezés

Ahogy az a 12. ábrán látható, mindkét mérés során a buborékgépet, a szélsebesség mérőt és két kamerát helyeztünk el.

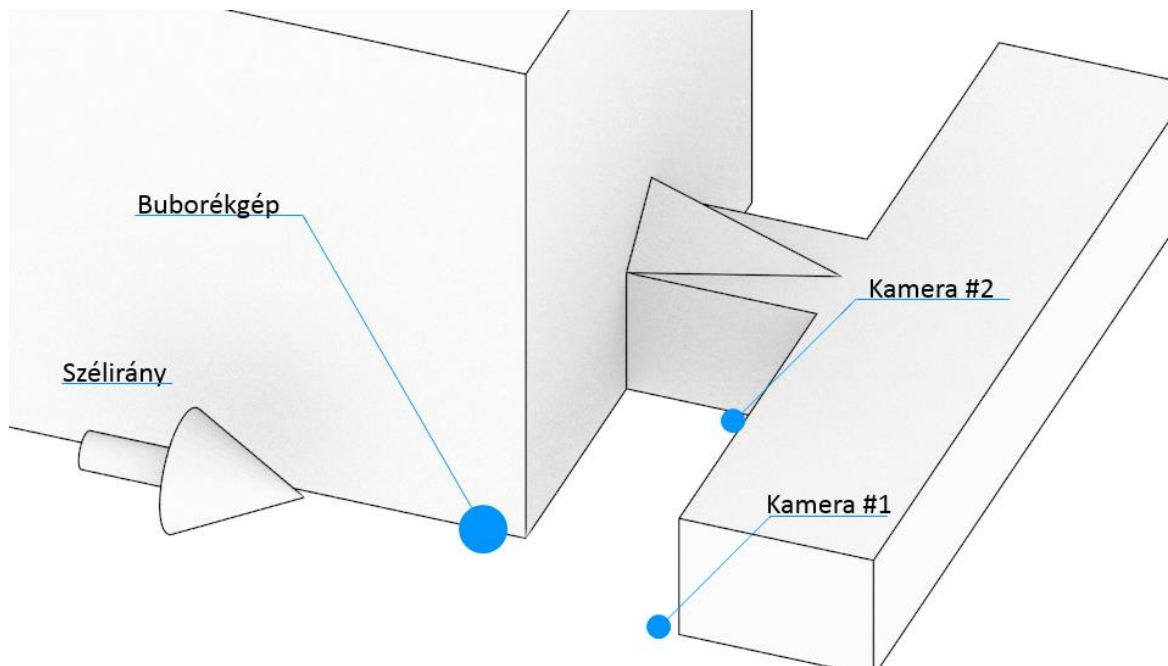
A gépet szélirány szerint a felvenni kívánt áramlás előtt helyeztük el, az épületek sarka közelében, közvetlenül egy leválási zóna előtt, hogy minél több buborék kerülhessen bele. A szélirány mindkét esetben a Duna felől, nagyjából északkeleti irányból érkezett. A szélsebesség iránya és nagysága is ingadozó, viszont az épület széliránnyal szemben álló homlokzata előtt a szélirány egy irányba kényszerül. Ezért is volt praktikus ide helyezni a gépet, mivel azt felállítás után nehéz forgatni, és fontos, hogy a kerék tengelye szélirányba álljon, hogy a buborékok jó irányba fújódjanak ki.

A szélsebesség mérőt mindig fixen a buborékgép tengelyének irányában, vízszintesen tartottuk, a buborékgép közvetlen közelében, ugyanis ezen pontbeli sebesség biztosan szerepet játszik a buborékok pályájának kialakulásában. A mért értékek tehát a szélsebességnek mindig csak a buborékgép tengelyére vett párhuzamos komponensét adják, és mindig csak egyetlen térbeli pontban. Ez tájékoztatást ad az időjárás viszonyairól, és alkalmas lehet a távoltéri sebesség illesztésére egy jövőbeli numerikus szimulációnál.

A két kamerát mindig úgy helyeztük el, hogy azok teljesen kitávoított állapotban a számunkra érdekes áramlási teret mutassák. További megfontolás volt, hogy a kamerák egy viszonylag nagy közös térrészt vegyenek fel, így háromdimenziósan is rekonstruálható egy

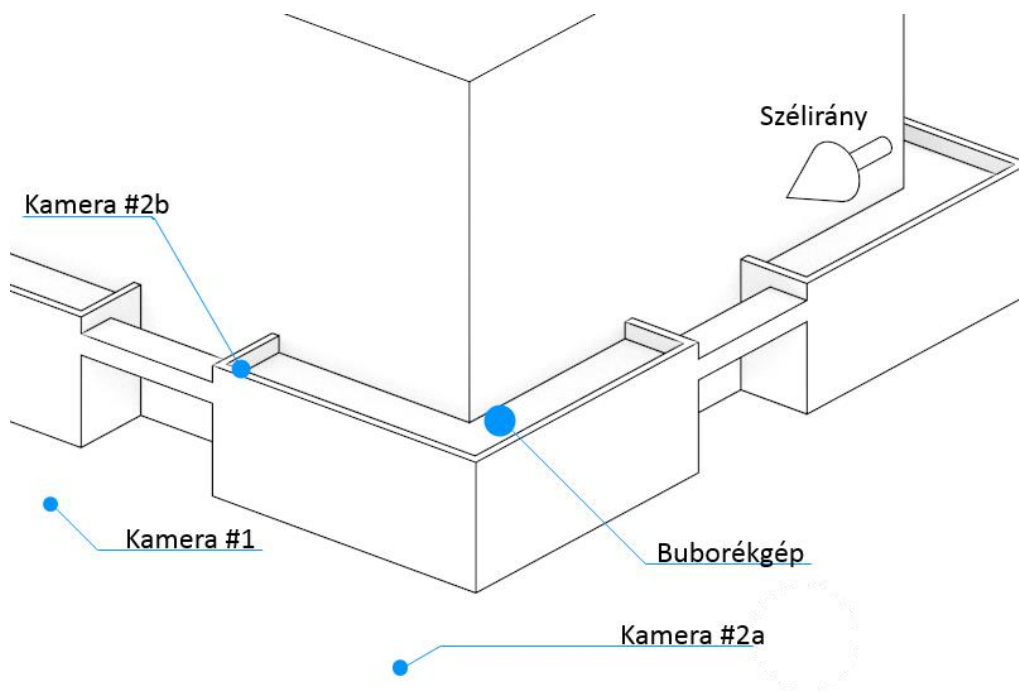
adott buborék pályája. A kamerák a Napba nem néztek. Derült vagy borús eget és csillogó felületet nem jó választani háttérnek, mert azok előtt a buborékok kontúrja és csillogása sokkal kevésbé látható, mint sötét, matt felületek előtt. A kamerákat tehát minél többet lássanak az épület homlokzatából, vagy magasból vegyenek fel, ahol a háttér a talaj lesz.

Ezen megfontolások alapján a két mérés konfigurációja a következőképpen alakult:



13. ábra: Az I. mérés elrendezése

Az I. mérés esetén (13. ábra) az épület élénél elhelyezett buborékgép és szélsébség mérő párhuzamos az épülettel, azaz keleti szélirányt mér. A távolféri szélirány nagyjából északkeleti.



14. ábra: A II. mérés elrendezése

A II. mérés esetén (14. ábra) az épület élénél elhelyezett buborékgép és szélesebesség mérő párhuzamos az épülettel, azaz északi szélirányt mér. A távoldéri szél nagyjából északkeleti.

4.4 A mérések folyamata

Megkezdttük a buborékok előállítását, majd elindítottuk a kamerákat. Mindkét mérés során a két kamera indítása után a közös látóterükben egy offset jelet adtunk le (karlendítés), pontosan egy stopperóra indításakor. A stopperóra futása során adott időpontokban jegyeztük le a szélesebességeket, így a képanyaghoz szinkronizálva születtett egy adattáblázat a buborékgép helyén uralkodó sebességviszonyokról.

A kamerák nagyjából 4-6 percig közösen forogtak. Ilyen közös felvételtől mindkét alkalommal csináltunk hármat. Ezeket a születtett képanyagokat dolgoztuk fel.

4.5 Képfeldolgozás

Itt soroljuk fel a képfeldolgozás során felhasznált módszereket, amelyek a képhibák kiküszöbölésére és az objektumok követésére szolgáltak.

4.5.1 Lencsetorzítás

A jelen kísérletben a lencsék torzításánál a decentrálo és vékony prizma torzítását nem vettük figyelembe. A radiális torzítás modelljét pedig a következő alakban alkalmaztuk:

$$\begin{aligned}x_u &= x(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6) \\ y_u &= y(1 + k_1r^2 + k_2r^4 + k_3r^6)\end{aligned}\tag{8}$$

ahol: x_u - a pont torzításmentes x koordinátája

y_u - a pont torzításmentes y koordinátája

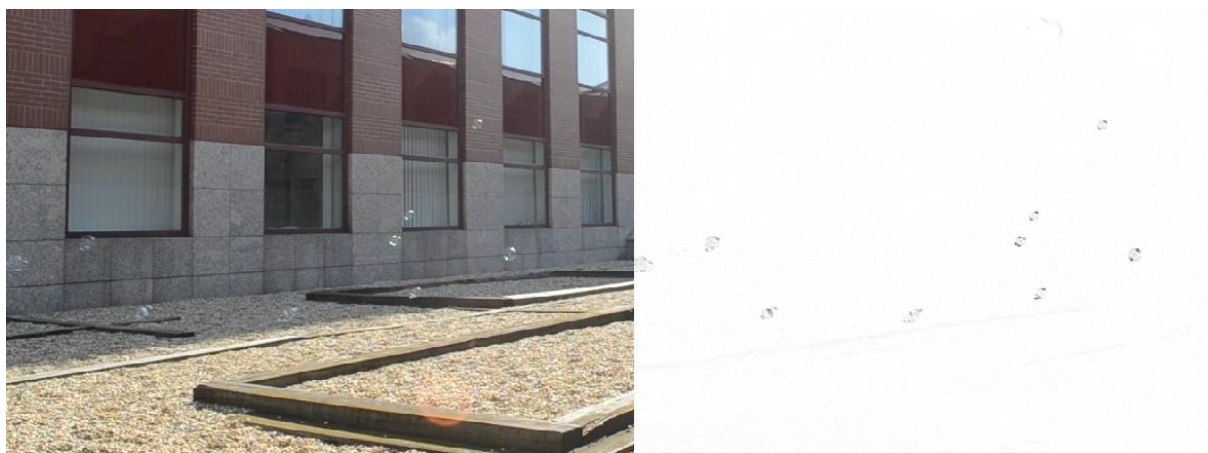
k_n - meghatározandó együtthatók

r – a kép középpontjától mért távolság

A kalibrációhoz a Blender 3D nyílt forráskódú programot használtuk. A programmal az egyenlet első három tagjának k_n tényezőit határoztuk inverz torzítás korrekcióval. Ezzel korrigálva a videó felvételt javulást értünk el. Az eljárás lényege, hogy egy torzítatlan négyzetrácsot úgy torzítunk, hogy a kamera torzításával egyezzen meg, a modellt aztán a videófelvételre inverz alakban (együtthatók ellentettje) alkalmaztuk, így egy torzítatlanabb képet kaptunk.

4.5.2 Háttér eltávolítás

Az általunk alkalmazott módszer egy igen egyszerű háttér eltávolításnak tekinthető. Ennél összetettebb módszer alkalmazására az igen rövid felvételek miatt nem volt szükség. A videó felvételekből bizonyos időközönként egy előtéri objektumot nem tartalmazó képet vontunk ki, a Tracker program segítségével. Ezzel a buborékok élettartam idejére viszonylag jó eredményt kaptunk. A 15. ábrán egy ilyen háttér eltávolításra látható példa.



15. ábra: A használt háttér eltávolítási módszer alkalmazása a videófájl egy képkockáján

4.5.3 Objektumkövetés

A buborékok képkockánkénti pozíciójának kinyerésére egy egyszerű sablon alapú követési eljárást alkalmaztunk (Tracker szoftver). A módszer egy felhasználó által kijelölt elliptikus képdarabot, mint sablont (template) keres a következő képeken. A hasonlóságot egy értékkel jellemzi, majd, ha az érték a felhasználó által megadott értéknél magasabb, a találatot egyezőnek tekinti. Lehetőség van a keresett sablon képkockánként történő frissítésére, a felhasználó által beállított mértékben. Az eljárás előnye, hogy nagyfokú felhasználói kontrollt biztosít, így hamis észlelések, buborék identitáscserék lehető legkevesebbszer fordultak elő. A módszer legnagyobb hátránya az időigénye. Az irodalmi áttekintésben megemlített módszerek használata esetén ez az időigény drasztikusan csökkenthető lenne.

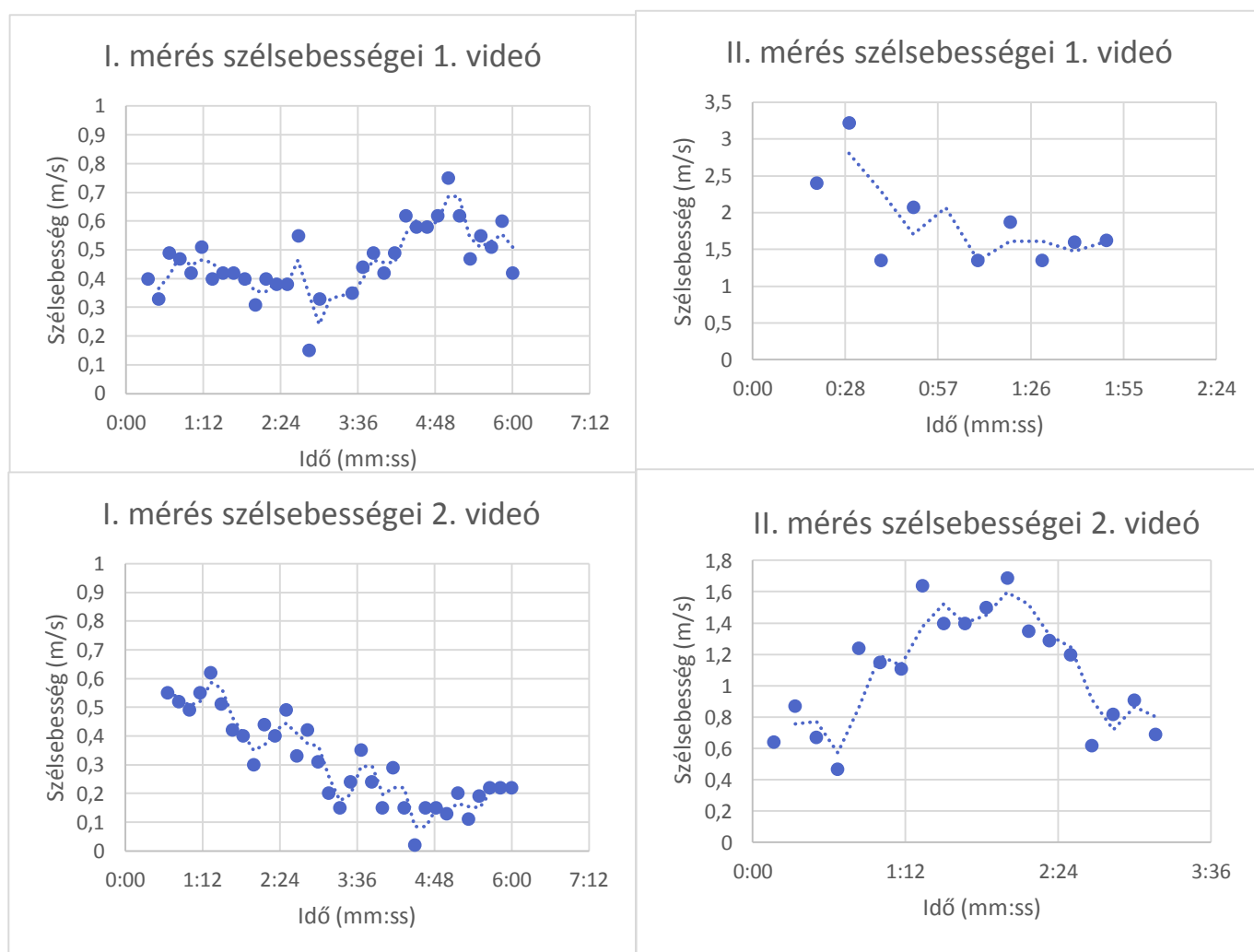
5 Eredmények

A következőkben a helyszíni kísérletek során mért adatok, tapasztalatok, a videófelvevételek elemzése közben megfigyelt áramlási képek és a kirajzolt pályák bemutatása következik.

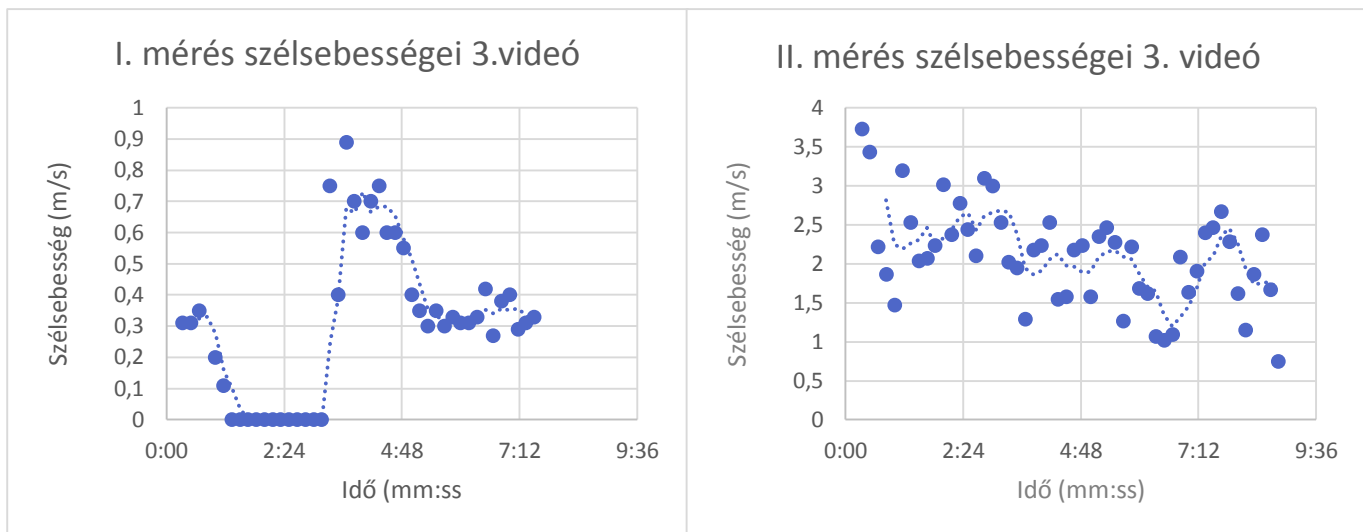
5.1 Felvételek közben mért szélességek

A mérés felvétele során 10 másodpercenként mértük a buborékgép mellett a szél sebességét, majd a kapott adatokat táblázatosan rögzítettük. Két mérés közben készült három-három felvétel során készült adatsorból készült grafikonon lejjebb látható, a 16. és 17. ábrán. A mért pontok közé kétperiódusú mozgó átlag van húzva.

Mint látható, a sebesség nagymértékben, és gyorsan ingadozik.



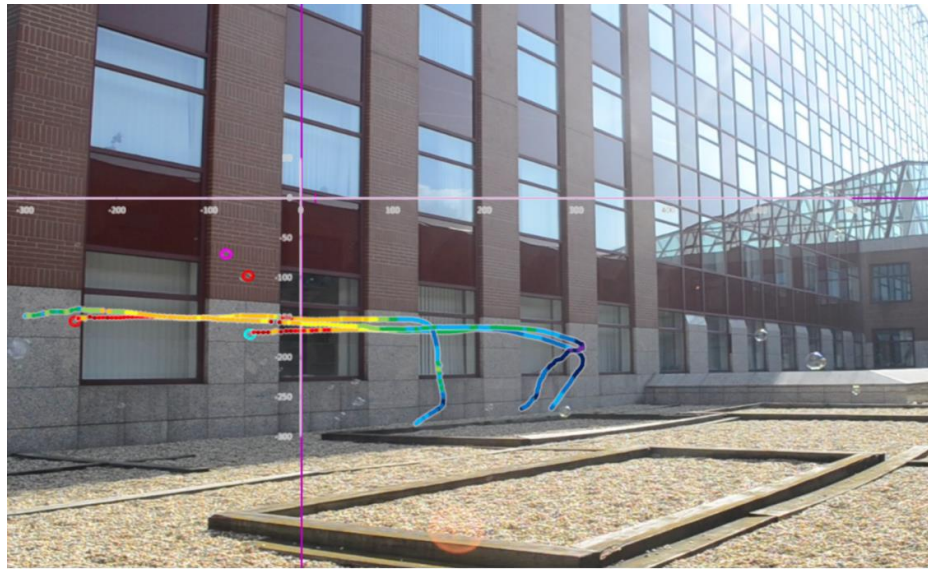
16. ábra: A mért szélességek (első rész)



17. ábra: A mért szélességek (16. ábra folytatása)

Tapasztaltuk, hogy a szél iránya is kissé változott, de a szélességet egy adott irányban mértük, azaz a szélmérő irányával párhuzamos komponens értéke látható itt. Ez az iránybeli ingadozás nem volt jelentős a sebességingadozás mértékéhez képest. Fontos, hogy ez az épületek fala mellett közvetlenül volt mérve, azaz az épület visszahatása itt már számottevő. A távolféri sebességről pontos adat a mérés során nem született, ezt egy későbbi numerikus szimulációnál az itt mért sebességhez illeszteni kell majd.

5.2 Megfigyelt áramlási képek, I. mérés



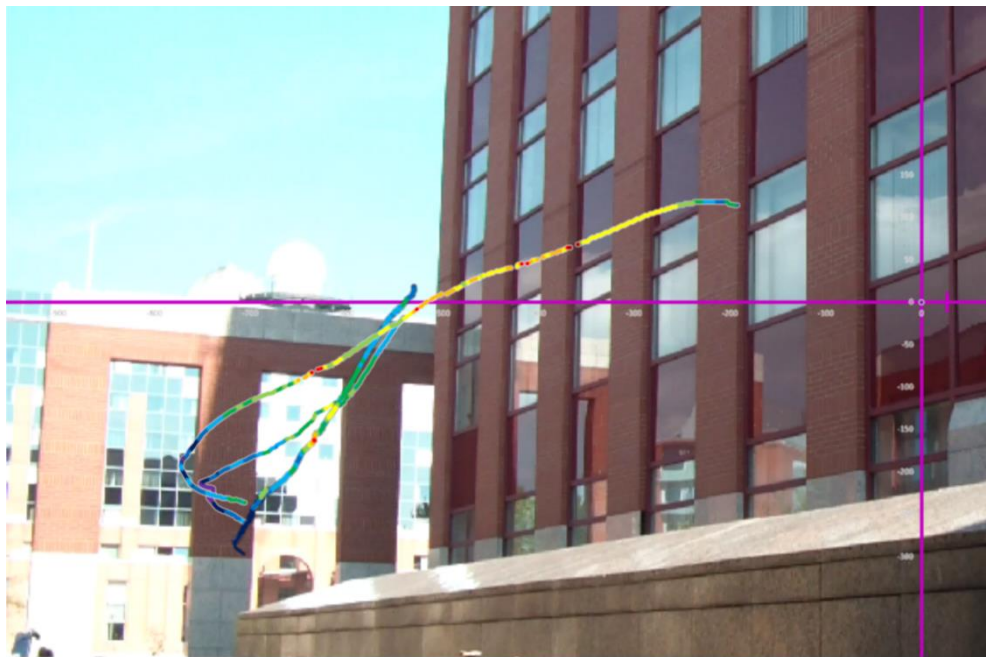
Sebesség (pixel/másodperc):



18. ábra: az I. mérés néhány pályája

A feldolgozott felvételeken kirajzolt pályák láthatók. A buborékot felbukkanásának pillanatában követni kezdtük, és eltűnéséig követtük. A buborékok elfoglalt helyét a felvétel minden képkockáján egy pont, pillanatnyi sebességét pedig a pont színe jelöli. Sebesség alatt itt a kamera képsíkjára perspektivikusan vetített pálya sebességét kell érteni, azaz a képen másodpercenként megtett pixelek mennyiségét.

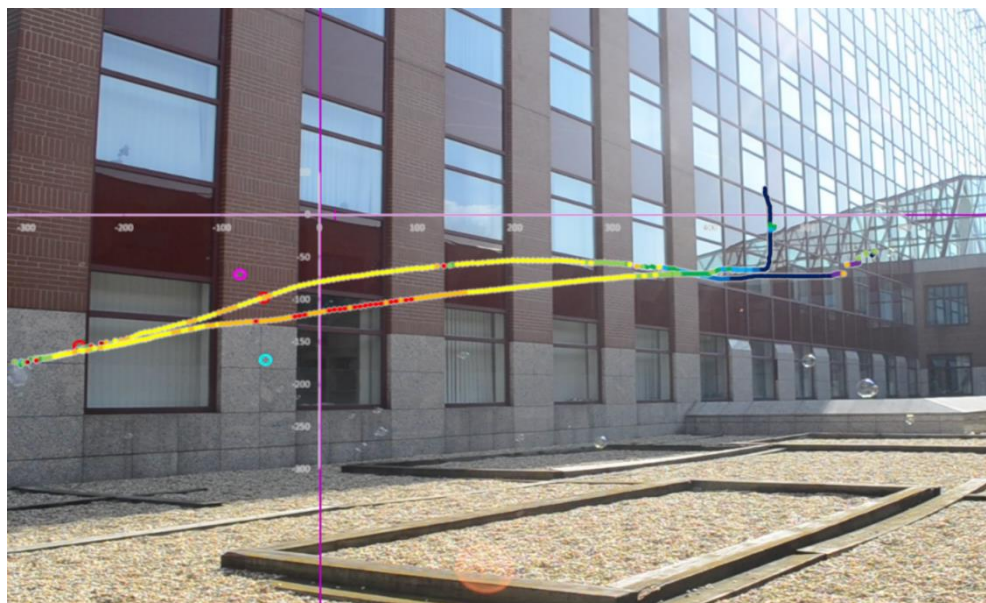
A 18 ábrán látható, ahogy néhány buborék, a kamera látóterébe kerülve az épület sarkát elhagyva, a mögé bekanyarodik, majd az épület sarka mögött kialakuló pangó zónába kerülve a földre hullik.



Sebesség (pixel/másodperc):



19. ábra: az I. mérés néhány jellemző pályája



Sebesség (pixel/másodperc):



20. ábra: az I. mérés néhány pályája

A 19. és 20. ábrán a pangó zónát elkerülő, majd az épület homlokzata előtt egyenesen elhaladó buborékok pályája figyelhető meg.



Sebesség (pixel/másodperc):



21. ábra: az I. mérés néhány pályája



Sebesség (pixel/másodperc):



22. ábra: az I. mérés néhány pályája

A fenti ábrákon három az épület sarka melletti örvényes áramlásba kerülő buborék pályája látható. A buborékok vízszintes síkban, elliptikus pályán mozognak, mérettől függően kissé felfelé, vagy lefelé.



Sebesség (pixel/másodperc):



23. ábra: az I. mérés pályái

A 23. ábrán három felfelé emelkedő buborékpálya látható.

A videó felvételek tanulmányozása alapján a következő jellemző pályákat, pályacsoportokat figyeltük meg az áramlási térben és ezekből különböző struktúrákra következtettünk:

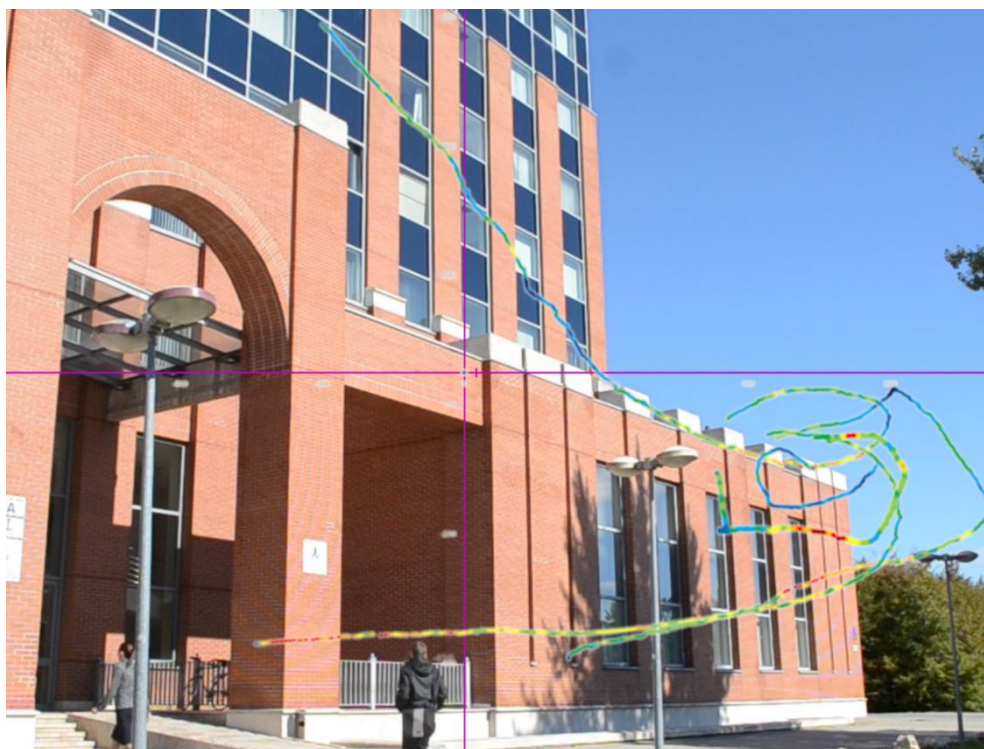
- Az épület sarkánál, a nagy homlokzat tövében közvetlenül egy leválási zóna található, amelynek a földdel párhuzamos metszete a földközelsben néhány méter átmérőjű, és ellipszishez hasonló alakú. Ezt a buborékok mindegyike megkerülte, és utána a pályájuk a legtöbb esetben visszahúzódott a homlokzathoz. Ez a pangó zóna könnyen lehet, hogy egy homlokzat mögötti boltíves portal vortex egyik lába (Cermak, 1993; Becker, 2002).
- A beszögellésben található nagy homlokzati résznek nagyjából közepénél a buborékok feláramlanak, majd néhány méterrel az épület teteje előtt

visszahúzódnak az épület sarkához, és ott gyorsan leáramlanak a föld közelébe. Ezek a nagy hurkot leíró pályák hasonlítanak Becker (2002) cikkében bemutatott, félköríves portal vortexekre felcsavarodó áramvonalak alakjához.

- A kis, szemközti homlokzat az áramlást feltorlasztja, az ide jutó buborékok pályája némileg örvényes.
- Az átjáró, amelyen a háromszögletű geometriájú rész található, az áramlást szintén feltorlasztja. Az erre haladó buborékok nagyrészt a torlaszon nem jutnak át, ott egy pangó zónában körbejárnak.

5.3 Megfigyelt áramlási képek, II. mérés

A feldolgozott felvételeken kirajzolt pályák láthatók.

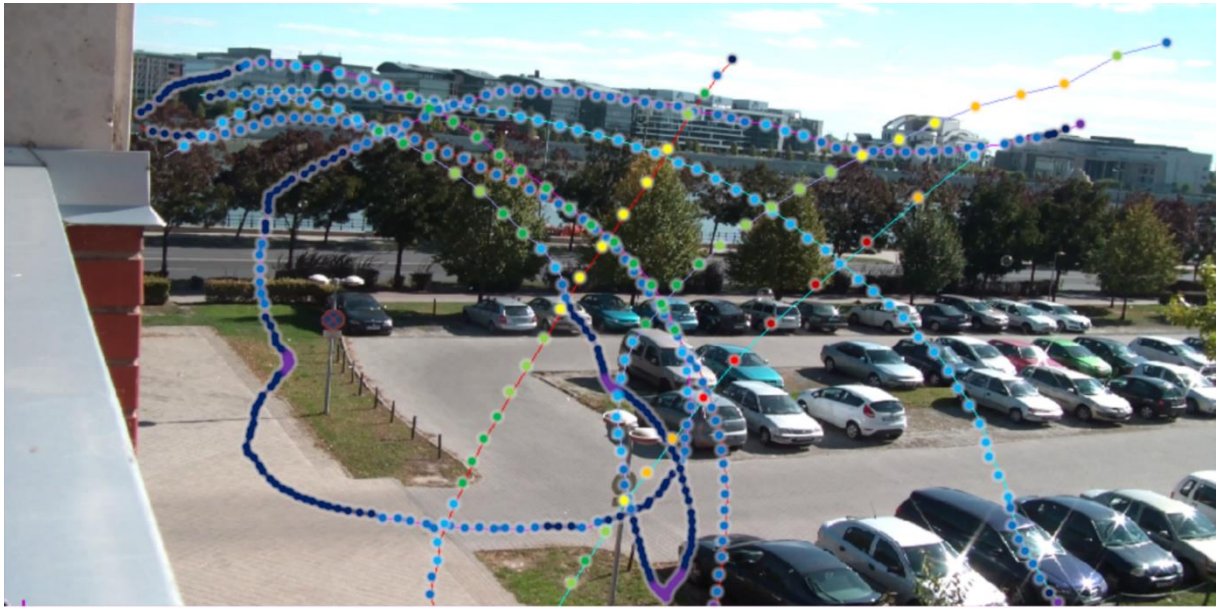


Sebesség (pixel/másodperc):



24. ábra: a II. mérés néhány pályája

A fenti képen jól láthatóak az erkélyről lebukó, örvényes áramlásba kerülő buborékok pályái. A buborékok egy része a bejárat elé jut, majd itt lelassul. A buborékok másik része az örvényből kijutva felfelé mozog a homlokzat mentén.



Sebesség (pixel/másodperc):

0

1250

2500

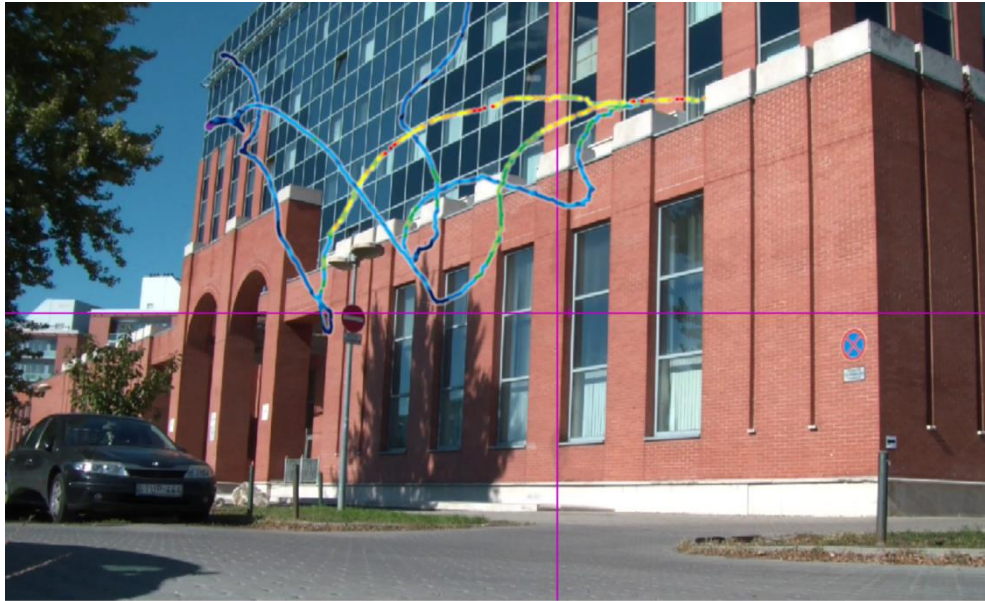


26. ábra: a II. mérés pályái



25. ábra: a II. mérés egy sebességvektoros ábrázolása

Az előző képeken az erkély előtt kialakuló spirális áramlás közeli képe látható kétféle ábrázolással. A felső képen néhány buborék pályája látható, az alsó képen egy pillanatban a buborékok sebességvektorai.

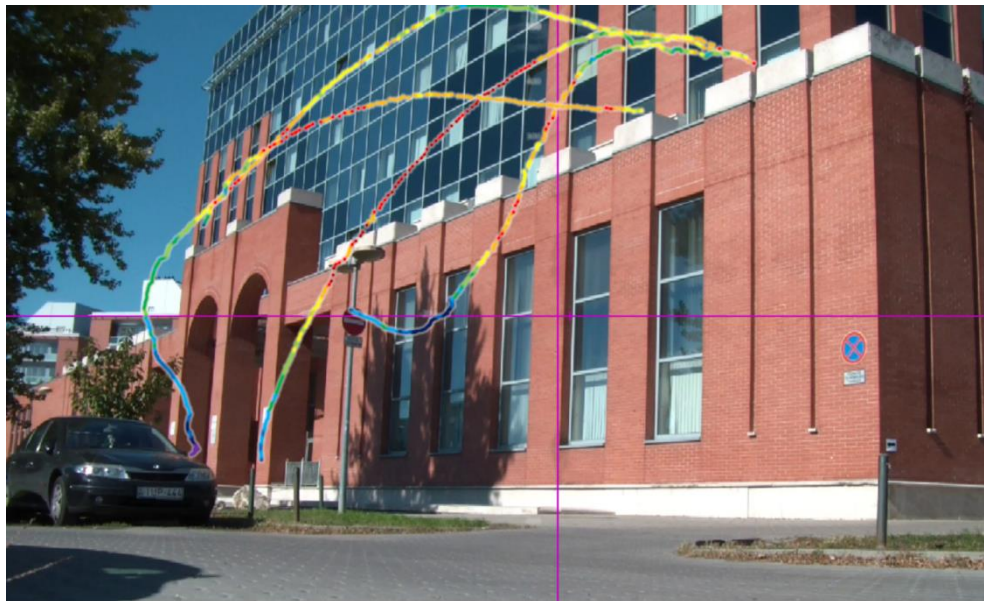


Sebesség (pixel/másodperc):



27. ábra: a II. kísérlet néhány pályája

A 27. ábrán az örvényes áramlás belsejébe kerülő, majd onnan az épület déli homlokzata előtt lassan felfelé szálló buborékok pályái láthatóak.



Sebesség (pixel/másodperc):



28. ábra: a II. kísérlet néhány pályája

A fenti képen az örvénybe kerülő, majd annak külső részén haladó és a földre eső buborékok pályája látható.

A videó felvételek tanulmányozása alapján a következő jellemző pályákat, pályacsoportokat figyeltük meg az áramlási térben és ezekből különböző struktúrákra következtettünk:

- A buborékok az erkélyt elhagyva egy gyorsan örvénylő áramlásba kerülnek, a déli kapu felé spirálisan haladva lassulnak. Ezek a pályák hasonlítanak Becker (2002) által bemutatott félköríves leválási zónára rácsavarodó áramvonalakra.
- A buborékok egy része itt lendületét elvesztve ereszkedni kezd, majd a földre hullik.
- A másik részük a homlokzathoz áramlik, és lassan felfelé kezd mozogni.
- Feltehetőleg az erkély és az épület fő tömbje mögött is kialakul a Becker (2002) által kimutatott félköríves leválási zóna, amelyek egész biztosan valamilyen módon egymással kölcsönhatásban vannak.

5.4 Egyéb tapasztalatok

A mérések célja elsősorban az áramlási struktúrák felfedezése volt a buborékpályák segítségével. Azonban leszűrhetőek tapasztalatok a mérés technológiájával, a mérőeszközök működésével és a környezet mérésre vonatkozó hatásaival kapcsolatban is.

- A buborékok láthatósága megfelelő. Egy kamera képén számos buborékpálya vehető ki, amelyek elégségesek a jellemző áramkép meghatározásához. Borult időben ez a láthatóság jelentősen romlik, mert a buborékok nem csillognak, erre a tényezőre a mérés igen érzékeny.
- A szél ingadozása a helyszínen jelentős, akár a 100%-ot is elérheti egy percen belül. Ez független a szélesebségtől, 0-4 m/s szélesebségi tartományban mindenhol előfordul. Ezt a tulajdonságot nehéz kiküszöbölni, mert a méréstől független tényező, ezért a mérésbe és a későbbi CFD szimulációba bele kell kalkulálni.
- A szélesebség mérése egy ponton ad némi tájékoztatást a távoltéri sebességről, de kvantitatív eredményt nem, azt illeszteni kell majd.
- A buborékok mérete erősen függ a szélesebségtől. Nagyobb szélesebség mellett kisebb buborékok jönnek létre. A buborékok így 30 és 5 cm átmérő között változhatnak. Később látható, hogy a mérettől nehezen kimutathatóan függ a süllyedési sebesség, ezért ez a nagy szórás inkább a láthatóság szempontjából okozhat problémát.
- Égbolt, vagy erősen fényvisszaverő felület előtt a buborékok nehezen, vagy egyáltalán nem vehetők ki a felvételen, ezt mindenképpen kerülni kell. Sötét, matt háttér megfelelőbb.
- Erős (2-3 m/s) természetes szél esetén már nincs szükség a ventilátorra, mivel a buborékokat a természetes áramlás is kifújja, és olyan sebességre gyorsítja, hogy azok nem süllyednek le, mielőtt kellően messze jutnának.

5.5 Mérés közben felmerülő problémák

5.5.1 A videók feldolgozásának problémái

A videófeldolgozás problémái: a buborékok átlátszósága és egymástól való megkülönböztethetlensége.

Az átlátszóság oka a buborékok igen vékony fala. A buborékkészítéshez használt folyadék színe élénksárga, azonban a vékony buborékfalban szinte teljesen átlátszó. Ez az objektumkövetésnél jelent problémát, az objektum ugyanis így a háttér függvényében változik. Ez az érzékelést, különösen világos háttér előtt nagyban megnehezíti, vagy lehetetlenné teszi. A jelenleg vizsgált épületek nem világos színűek, ilyen esetben a buborékanyaghoz valamilyen színezék hozzáadására lenne szükség. Erre példát mutat Helmenstine fenolftalein pH indikátor segítségével (Weblap 5).

A nagyobb probléma a buborékok egymástól való megkülönböztetése, valamint egy adott buborék beazonosítása mindkét kamera képen egyszerre. Erre az esetleges későbbi 3D pályarekonstrukció miatt lenne szükség. Mivel azonban a buborékok nagyon hasonló méretűek, alakúak és helyzetűek, és ráadásul nagy számban is bocsátottuk ki őket, nem sikerült megoldani ezt a fajta képfeldolgozást. További probléma ilyenkor, hogy egy adott buborék nagyon más láthatósággal rendelkezhet a két képen. Ennek egyik oka, hogy más távolságban van a kettőtől, másik, hogy a háttér, ami előtt mozog, jelentősen különbözhet a kamerák képein.

6 Süllyedési sebesség mérés

Ha a szappanbuborékos mérések eredményeit össze akarjuk vetni egy CFD szimuláció eredményeivel, elengedhetetlen a buborékok süllyedési sebességének ismerete. Ezen jellemzőt buborékgép nem tudja reprodukálni, a süllyedési sebességek véletlenszerűek.

6.1 Mérés leírása

A buborékokat adott magasságból, egy berovátkolt méterrúd előtt folyamatosan bocsátottuk ki, ahogy az a 29. ábrán látható, vízszintes irányból megfújva. A buborékgépezet véletlenszerűen, különböző méretű buborékokat állít elő. A folyamatot kamerával vesszük, amelyet 1,5 méter magasra helyezünk, és vízszintes irányba állítunk. A kamera felvételén a méterrúd segítségével megállapítjuk egyes buborékok méretét. A vizsgált buborékokat figyeljük és megvárjuk, míg egyenletes sebességgel látszanak süllyedni. Ekkor a felvételen megnézzük az egyenletes süllyedés kezdeti és végső időpontját, valamint a méterrúd segítségével megnézzük a süllyedés teljes függőleges hosszát. Ezekből átlagos süllyedési sebességet számítunk.

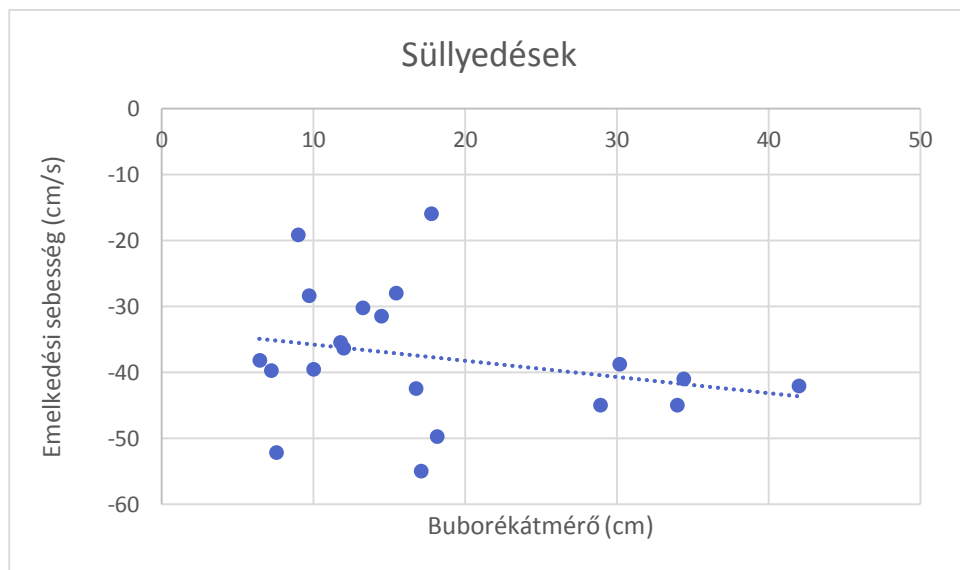


29. ábra: A süllyedési sebesség mérés

Ismert hiba, hogy a buborékok nem közvetlenül a méterrúd előtt találhatók, ezért a kamera számára kissé nagyobbak mutatkozik az átmérőjük, mint a valóságos. A kamera fix pozíciója miatt a buborékok leolvasott magassága szöghibával terhelt.

6.2 Eredmények

A kapott ponthalmazra lineáris trendvonalat állítottunk. Ami látható, hogy a méret növekedésével a süllyedési sebesség nem nő jelentősen. A sebesség szórása viszont viszonylag nagy, bármilyen mérettartományban. Ezt az eredményt felhasználhatja a numerikus szimuláció készítője: a mérés eredményéhez hasonló szórási paraméterekkel, véletlenszerűen generált süllyedési sebességű szemcsékkel hasonló áramképeket kaphat, mint fő mérés eredményei.



30. ábra: A buborékok süllyedési sebessége átmérőjük függvényében

7 Konklúzió és továbblépési lehetőségek

Vizsgáltuk az épületek körüli áramlásokat vizualizáló módszereket, és kifejlesztettünk egy óriás szappanbuborékokat használó eljárást, amelyet 1:1-es helyszíni kísérletekhez lehet használni.

A szappanbuborékos módszerrel sikerült kimutatni buborékpályák kétdimenziós vetületét és annak fontos fizikai jellemzőit (irány és sebesség), amelyek egy épület mögött alakultak ki. A felvételek egy CFD szimuláció eredményeivel összevethetőek, amennyiben a buborékok süllyedési sebességét ismerjük. Mivel ilyen mérést is készítettünk, ennek eredményei segítségével a CFD szimuláció értékelhetővé válik, és a mérés során bizonytalan paraméterek is illeszthetővé válnak. Ez alatt értendő a megfelelő peremfeltételek, geometriai egyszerűsítések, turbulencia modell választása. Az óriás szappanbuborékos módszer tehát a jövőben az épületek körüli CFD szimulációk fejlesztésére alkalmas lehet.

A módszerünkben az áramlásba helyezett buborékok a méréshez kellően jó minőséggel és hosszú élettartammal rendelkeznek ahhoz, hogy hosszabb, bonyolultabb pályák is láthatóvá váljanak, amelyek akár több elkülöníthető struktúrán is áthaladnak. Amennyiben a jövőben a buborékanyag fejlesztése fontossá válik, érdemes lehet az anyag felületi feszültségének mérése és színes buborékanyag készítése.

A mérés során nem vettük figyelembe a környezet és az épületek hőmérsékletét és elsősorban ezek különbségét. Ez bizonyos évszakokban komoly elhanyagolásnak számít, ezért felszíni és környezeti hőmérsékleteket is lehetne mérni egy jövőbeni kísérlet során.

A gép alak, méret és hordozhatóság szempontjából elfogadható volt, de érdemes lenne elkészíteni a kompaktabb, könnyebb, és egyszerűbben kezelhető változatát. Fejlődést jelentene a gép teljesen automatikus, motorizált, esetleg vezérelhető változata, ahol a kieresztett buborékok mennyisége legalább annyira kontrollálható, mint a jelenlegi, kézzel hajtott állapotában. Még komolyabb előrelépést jelentene egy újragondolt konstrukció, ami képes pontosabban reprodukálni a kieresztett buborékok süllyedési sebességét.

A videófelvevételek feldolgozásában jelenleg a legegyszerűbb, legkevésbé erőforrás igényes és ingyenesen elérhető módszereket választottuk. Ezekkel a kétdimenziós vetületek feldolgozása volt elérhető. Pontosabb és gyorsabb feldolgozást lehetne elérni saját számítógépes program fejlesztésével, amely a kifinomultabb és bonyolultabb algoritmusokat alkalmazza.

A helyszínen uralkodó fényviszonyok sok láthatósági problémát okoznak, elsősorban a háttér és a buborék színének hasonlósága. Ennek kiküszöbölésére esetleg éjszaka, a

buborékokat reflektorral megvilágítva elérhető, hogy a csillogó buborékok erősen elűssenek a sötét háttértől, és így könnyen követhetővé váljanak.

Háromdimenziós felvételek készíthetők lennének kevesebb és jobban megkülönböztethető buborékok esetén, ez a jelenlegi technológiákkal nem volt elérhető.

A mérés során rögzített adatokból egy esetleges CFD szimuláció peremfeltételei illeszthetők, ám lényegesen több pontban és pontosabban mért szélességekkel a szélirányokat is figyelembe véve ez a folyamat gyorsabbá válhat.

Összefoglalva elmondható, hogy a módszer épületek körüli áramlásokról kvantitatív információt ad, bizonyos feltételekkel. Az egyik, hogy minden buborékpályához az adott buborék süllyedési sebességét egyedileg illeszteni kell, mert az a mérés során nem volt biztosítva. A másik, hogy a peremfeltételeket is illeszteni kell az egy pontban mért szélesség alapján. Ezen illesztésekre megfelelő módszer található, amely egy jövőbeni kutatás témája lehet.

Egyik fejlődési terület tehát magának a mérésnek a nagyobb és pontosabb kivitele, több mért adattal. Másik terület a mérés technikájának fejlesztése, mesterséges fény használata, új képfeldolgozási módszerek bevezetése, újfajta buborékgép alkalmazása. Harmadik, és legfontosabb terület pedig egy CFD szimuláció készítése és összevetése a kísérlettel, amely összevetés módszerét még ki kell fejleszteni.

8 Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnénk köszönetet mondani Dr. Kristóf Gergelynek a dolgozat elkészítésében nyújtott segítségért, valamint a BME Áramlástan Tanszékének a laboratóriuma és mérőeszközeinek rendelkezésünkre bocsátásáért. Köszönet Balázs Annának, Csikós Áronnak, Kovács Bettinának, Kovács Domonkosnak, Kovács Sebestyénnek és Sykora Henriknek a helyszíni méréseinken, valamint Gulyás Andrásnak és Jezsó Istvánnak a laboratóriumi munkákban való közreműködésükért. Külön köszönet Légrády Dávidnak a buborékkészítéssel kapcsolatos tanácsaiért.

Budapest, 2013. október 30.

9 Irodalomjegyzék

- Bakó P.**, Fogarassy E., Keglevich Gy. (2011). *Szerves vegyipari technológiák*. Budapest: Typotex Kiadó.
- Baker, C.** (1982). Methylcellulose & Sodium Carboxymethylcellulose: Uses in Paper Conservation. *The Book and Paper Group annual*, 1
- Becker, S.**, Lienhart, H., Durst, F. (2002) Flowaround three-dimensional obstacles in boundary layers. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, 265–279.
- Beauchemin, S.S.**, Bajcsy, R. (2001) Modelling and removing radial and tangential distortions in spherical lenses, Multi-Image Analysis. *Lecture Notes in Computer Science*, 2032, 1-21.
- Brown, D.**, (1966). Decentering distortion of lenses. *Photogrammetric Engineering* 7, 444–462.
- Cermak, E.J.** (1993). *Wind Climate in Cities*. Waldbronn: Kluwer Academic Publishers.
- Cheng, D.-C.**, Burkhardt, H. (2003). Bubble tracking in image sequences. *International Journal of Thermal Sciences*, 42, 647–655.
- Cheng, D.**, H. Burkhardt (2006). Template-based bubble identification and tracking in image sequences. *International Journal of Thermal Sciences*, 45, 321–330.
- Conrady, A.** (1919). Decentered lens systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 79, 384–390.
- Dewar, J.** (1919). Soap bubbles of long duration. *Journal of the Franklin institute*, 188, 713–748.
- Durst, F.**, Melling, A., Whitelaw, J. (1981). *Principles and Practices of Laser-Doppler Anemometry*. Academic Press.
- Fortes, M. A.**, Saramago, B., Rodrigues, J. F. (2001). Apparent Contact Angle and Triple-Line Tension of a Soap Bubble on a Substrate. *Journal of Colloid and Interface Science*, 239, 577–580.
- Kang, M.**, Merriman, B., Osher, S. (2008). Numerical simulations for the motion of soap bubbles using level set methods. *Computers & Fluids*, 37 (2008), 524–535.
- Lajos T.** (2004). *Az áramlástan alapjai*. Budapest: Műegyetemi Kiadó.
- Mallon, J.**, Whelan, P.F. (2004). Precise radial un-distortion of images. *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition (ICPR' 2004)*.
- Merzkirch, W.** (1987). *Flow visualization*. New York: Academic Press

- Piccardi, M.** (2004). Background subtraction techniques: a review. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* 4, 3099–3104.
- Robinson, N. D., Steen, P. H.** (2001). Observations of Singularity Formation during the Capillary Collapse and Bubble Pinch-off of a Soap Film Bridge. *Journal of Colloid and Interface Science*, 241, 448–458.
- Videó 1**, „Homemade Bubble Machine”. *Youtube*. Retrieved from: <http://www.youtube.com/watch?v=F32PctkY2T8> Cited on: 2013. 10. 21.
- Videó 2**, „The Steampunk Bubble Machine”. *Youtube*. <http://www.youtube.com/watch?v=szf0w9v8Fx0> Cited on: 2013. 10. 21.
- Wagaman, S. A., Rainwater, K. A., Mehta, K. C., Ramsey, R. H.** Full-scale flow visualization over a low-rise building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90, 1–8.
- Weblap 1**, „Veterinary medicine labels”. *Dailymed*. Retrieved from: <http://dailymed.nlm.nih.gov/dailymed/lookup.cfm?setid=97e2fb8b-484d-4a3c-818a-5ab861d69a4f> Cited on: 2013. 10. 21.
- Weblap 2**, *Soap Bubble Wiki*. Retrieved from: http://soapbubble.wikia.com/wiki/Soap_Bubble_Wiki Cited on: 2013. 10. 21.
- Weblap 3**, *Soapbubble.dk*. Retrieved from: <http://www.soapbubble.dk/en/> Cited on: 2013. 10. 21.
- Weblap 4**, „Super-large-scale flow visualisation with natural snow”. *St. Anthony Falls Laboratory*. Retrieved from: <http://www.safl.umn.edu/featured-story/super-large-scale-flow-visualization-natural-snow> Cited on: 2013. 10. 21.
- Weblap 5**, „How to make colored soap bubbles”. *Chemistry*. Retrieved from: <http://chemistry.about.com/od/chemistryhowtoguide/ht/colorbubble.htm> Cited on: 2013. 10. 21.
- Wren, C., Azarbajejani, A., Pentland, A.** (1997). Pfinder: Real-time tracking of the human body. *IEEE Trans. Patt. Analy. Mach. Intell.* 19, 7, 780–785.
- Xue, T., L. Qu, Z. Cao, T. Zhang** (2012). Three-dimensional feature parameters measurement of bubbles in gas–liquid two-phase flow based on virtual stereo vision. *Flow Measurement and Instrumentation*, 27, 29–36.
- Yilmaz, A., Javed, O., and Shah, M.** (2006). Object tracking: A survey. *ACM Comput. Surv.* 38, 4.

10 Ábrajegyzék

1. ábra: Kocka körül kialakuló áramlási képek (Cermak, 1993).....	5
2. ábra: Hasáb körül kialakuló struktúrák, a megfűjás iránya szerint (Becker, 2002).....	6
3. ábra: Épület mögött kialakuló örvények	7
4. ábra: Objektumkövetési módszerek (Yilmaz,2006)	14
5. ábra: Nagyméretű szappanbuborék.....	16
6. ábra: Az ELTE Lágymányosi Campus Budapesten (Google Maps)	20
7. ábra: Az ELTE Lágymányosi Campus felülnézeti képe (Google Earth).....	21
8. ábra: Az I. mérés helyszíne (Google Earth)	21
9. ábra: A II. mérés helyszíne (Google Earth).....	22
10. ábra: A buborékgép felépítése	23
11. ábra: A buborékgép működés közben.....	24
12. ábra: Általános mérés elrendezés.....	27
13. ábra: Az I. mérés elrendezése	28
14. ábra: A II. mérés elrendezése	29
15. ábra: A használt háttér eltávolítási módszer	31
16. ábra: A mért szélességek (első rész)	32
17. ábra: A mért szélességek (folytatás)	33
18. ábra: az I. mérés néhány pályája.....	34
19. ábra: az I. mérés néhány jellemző pályája.....	35
20. ábra: az I. mérés néhány pályája.....	35
21. ábra: az I. mérés néhány pályája.....	36
22. ábra: az I. mérés néhány pályája.....	36
23. ábra: az I. mérés pályái.....	37
24. ábra: a II. mérés néhány pályája	38
26. ábra: a II. mérés egy sebességvektoros ábrázolása	39
25. ábra: a II. mérés pályái	39
27. ábra: a II. kísérlet néhány pályája	40
28. ábra: a II. kísérlet néhány pályája	41
29. ábra: A süllyedési sebesség mérés	44
30. ábra: A buborékok süllyedési sebessége átmérőjük függvényében.....	45