



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

VÁROSI TÉR ÁTSZELLŐZÉSÉNEK SZÉLCSATORNA VIZSGÁLATA

Készítette:

Tomor András

Mechanical Engineering Modelling mesterszak
I. évfolyam (2. félév)

Konzulens:

Balczó Márton, tudományos segédmunkatárs

Lezárás dátuma: 2013.10.30

NYILATKOZAT

Név:	Tomor András
Neptun kód:	IDTP8W
Egyetem:	Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Kar:	Gépészmérnöki Kar
Tanszék:	Áramlástan Tanszék
Alapszak / Mesterszak:	Gépészeti modellezés mesterszak (MSc képzés)
Szakirány:	Fluid Mechanics modul és Solid Mechanics modul
TDK dolgozat címe:	Városi tér átszellőzésének szélcsatorna vizsgálata
TDK szekció:	Áramlástan szekció
Beadás dátuma:	2013.10.31.

Alulírott, Tomor András (IDTP8W), a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem és sajátkezű aláírással igazolom, hogy a benyújtott jelen TDK dolgozat kizárólag saját munkám eredménye, a témavezető útmutatásai alapján meg nem engedett segítség nélkül magam készítettem.

A TDK dolgozatban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem, és a szerzői jogi szabályoknak megfelelően kezeltem (a szükséges lábjegyzet / végjegyzet hivatkozásokat, valamint az ábrák hivatkozását megfelelően helyeztem el).

Egyúttal elfogadom, hogy a TDK dolgozatban szereplő tudományos eredményeket a témavezető Tanszéke felhasználhatja további kutatási vagy oktatási célokra.

Budapest, 2013.10.31

(aláírás)

TÁJÉKOZTATÓ

A mind nyomtatott, mind elektronikus formátumban benyújtott TDK dolgozat, valamint annak hivatalos bírálata a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszék könyvtárában (H-1111 Budapest, Bertalan L. 4-6. BME „Ae” épület) érhető el.

KIVONAT

Környezetünk levegőminőségét a közlekedési eredetű szennyezők nagymértékben rontják. A közúti járművek által okozott légszennyezettség a városokban a legjelentősebb. A szennyezőanyagok kibocsátásának környezetében a szennyezők koncentrációja drasztikus mértékben növekszik, ezért légszennyezettség szempontjából a forgalmas utak és az ezek mellett elhelyezkedő terek fokozottan terheltek. A szennyezőanyagok terjedésében nagy szerepe van a környező épületek által nagymértékben befolyásolt áramlási viszonyoknak. Amennyiben egy utca vagy egy tér átszellőzése megfelelő, a keletkező szennyezőanyagok gyorsan elkeverednek, és a környék levegőminősége megfelel az előírásoknak.

Munkám során a Budapest V. kerületében található József nádor tér és a körülötte elhelyezkedő városrész 1:350 léptékű modelljét készítettem el, és ezen a modellen szélcsatorna méréseket végeztem az Áramlástan Tanszék nagy vízszintes szélcsatornájában LDA technikát alkalmazva. Ügyeltem arra, hogy a városrészt megfelelő részletességgel modellezem, és az elkészült modell arányaiban jó egyezőségben legyen az Áramlástan Tanszéken végzett, a József nádor tér vizsgálatára irányuló korábbi kutatások során alkalmazott szimulációs modellel is. Ilyen formában a mérések és a szimulációk eredményei egyaránt validálhatóak.

LDA technika alkalmazásával korábban még senki sem végzett méréseket a nagy vízszintes szélcsatornában. A mérések megkezdése előtt a pozicionáló szerkezetet – melyre később az LDA optikát rögzítettük – úgy helyeztük el, hogy az optikával lehetőségünk legyen a mérőtérhez alulról, üveglapon vagy plexin keresztül hozzáférni. Ez a technika lehetővé tette, hogy az optika egyáltalán ne zavarja meg az áramlást.

Ahhoz, hogy a József nádor tér modelljén végzett mérések eredményeiből helytálló következtetéseket vonhassak le az eredeti nagyságú térre vonatkozóan, nagyvárosi környezetben jellemző határréteget kellett modelleznem a szélcsatornában. Ennek megfelelően az LDA telepítése után először a határréteg paramétereit kellett megfelelően beállítani. A tér modelljén végzett mérések előtt tehát határréteg méréseket végeztem. A turbulencia generátor elemek elrendezésének többszöri megváltoztatása után a szélcsatornában létrehozott határréteget alkalmasnak találtam városi tér átszellőzésének szélcsatorna vizsgálatára.

A József nádor tér modelljén végzett mérések során a hangsúlyt adott síkokon a turbulens kinetikus energia és a sebességeloszlások vizsgálatára helyeztem.

A megvalósított modell segítségével számos további mérés végrehajtásához teremtettem lehetőséget, így például a későbbi kutatások során lehetőségünk lesz több szélirány mellett a téren kialakuló szélmező átfogó vizsgálatára, koncentrációmérések és homokeróziós vizsgálatok végrehajtására. Az LDA optikát a nagymozgatóra felszerelve a modellen felülről is végezhetőek mérések, így az alulról történő mérés eredményei összehasonlíthatóak a felülről történő mérés eredményeivel, és pontosan meghatározható, hogy az áramlásba felülről beengedett optika áramlást megzavaró hatása mennyire érvényesül, és ez mennyire befolyásolja a mérés eredményeit.

ABSTRACT

The air quality of our environment is significantly deteriorated by traffic pollution. Pollution caused by road vehicles poses a large problem in the cities. Concentration of contaminants increases dramatically in the vicinity of the emission of pollutants, so busy roads and nearby squares could be the most contaminated areas. Flow conditions affected by the nearby buildings play a big role in air pollutant dispersion. From air purity point of view the proper ventilation of a street or a square is very important. In case the ventilation of a square is satisfactory, the concentration of the pollutants is below the threshold limit, so the air quality complies with the requirements.

During my work, the small-scale model of the quarter surrounding József nádor square was created and with this 1:350 scale model measurements were carried out in the Large Horizontal Wind Tunnel of the Department of Fluid Mechanics using LDA technique. The quarter was modelled with correct precision and the complete model was in accordance with the CFD model which was created in a recent study focused on the examination of József nádor square by the Department of Fluid Mechanics. In this way, the results of the measurements and also the simulations can be validated.

Previously, there had not been any measurements carried out in the Large Horizontal Wind Tunnel using LDA technique. Before the beginning of the measurements the positioner had been set under the test section. The fiber-optic probe was mounted on the positioner. The fiber-optic probe accessed to the flow from below through a pane of glass. With the applied method the flow was absolutely not disturbed by the probe.

Our study focused on the investigation of urban squares so urban-type boundary layer was modelled in the wind tunnel. First, boundary layer measurements had been carried out to set the parameters of the boundary layer. The arrangement of the turbulence generator elements had been changed several times and I found the boundary layer generated by the final arrangement was applicable for investigation of urban squares.

From the measurements, which were carried out on the model of József nádor square a large amount of information about the flow characteristics could be obtained, for instance turbulent kinetic energy and velocity distributions on certain planes were determined.

Several additional measurements can be carried out with the created model, for example flow field measurements with more wind directions, concentration measurements and sand erosion measurements are realizable. The fiber-optic probe is mountable on the large positioner. With this method measurements can be carried out from above and its results can be compared to the results of the measurements carried out from below. In this way, the intrusiveness of the probe can be exactly determined.

TARTALOMJEGYZÉK

NYILATKOZAT.....	I
KIVONAT	II
ABSTRACT.....	III
TARTALOMJEGYZÉK.....	IV
JELÖLÉSJEGYZÉK.....	V
1 BEVEZETÉS.....	1
2 ELŐZMÉNYEK FELTÁRÁSA	2
2.1 Irodalmi áttekintés.....	2
2.2 A József nádor tér vizsgálatára irányuló korábbi kutatások az Áramlástan Tanszéken	4
3 HATÁRRÉTEG MÉRÉSEK A NAGY VÍZSZINTES SZÉLCSATORNÁBAN	6
3.1 Az atmoszférikus határréteg jellemzői	6
3.2 A mérések előkészítése	8
3.3 Első mérési sorozat	9
3.3.1 Mérések az LDA optika eredeti elhelyezkedése mellett.....	10
3.3.2 Az LDA optika felrögzítésének módosítása.....	12
3.4 A turbulencia generátorok elrendezésének módosítása.....	15
3.5 A határréteg mérések értékelése.....	24
4 MODELLKÉSZÍTÉS.....	25
5 MÉRÉSEK A JÓZSEF NÁDOR TÉR SZÉLCSATORNA MODELLJÉN	29
5.1 Profilmérések a József nádor tér szélcsatorna modelljén.....	30
5.2 Vízszintes síkok vizsgálata a József nádor tér szélcsatorna modelljén	37
5.3 A József nádor tér szélcsatorna modelljén végzett mérések értékelése.....	42
6 TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK, JÖVŐBELI CÉLOK.....	43
IRODALOMJEGYZÉK.....	44

JELÖLÉSJEGYZÉK

A	konstans [-]
B	konstans [-]
C	konstans [-]
d_0	profileltolási magasság [m]
D	konstans [-]
E	konstans [-]
f	a sebességingadozás frekvenciája [1/s]
f_{red}	redukált frekvencia [-]
h	átlagos épületmagasság modell léptékben [mm]
H	átlagos épületmagasság valós léptékben [m]
I_u	turbulencia intenzitás az u sebességkomponens irányában [-]
I_v	turbulencia intenzitás a v sebességkomponens irányában [-]
$L_{u,x}$	a turbulencia longitudinális integrál hosszléptéke [m]
R_{uu}	a sebességváltozás autokorrelációs együtthatója [-]
S_{uu}	a longitudinális sebességingadozás teljesítmény sűrűség spektruma [m^2/s]
t	idő [s]
T	mérési időtartam egy pontban [s]
TKE	turbulens kinetikus energia [m^2/s^2]
u	főáramlás irányában vett szélesebbesség [m/s]
$u_{c,d}$	főáramlás irányában vett korrigált és dimenziótlan időátlagolt sebesség a határréteg mérések során [-]
u_d	u komponens irányában vett dimenziótlan és korrigált átlagsebesség a téren végzett mérések során [-]
u_{href}	h magasságban mért referenciasebesség [m/s]
$u_{Prandtl,ref}$	Prandtl-csővel mért referencia sebesség a határréteg mérések során [m/s]
$u_{p,ref}$	Prandtl-csővel mért referencia sebesség a téren végzett mérések során [m/s]
u_{ref}	átlagos szélesebbesség a referenciamagasságban [m/s]
u_*	súrlódási sebesség [m/s]
$\bar{u}$	főáramlás irányában vett időátlagolt szélesebbesség [m/s]
$\bar{u}_p$	Prandtl-csővel mért átlagsebesség a téren végzett mérések során [m/s]
$\bar{u}_{Prandtl}$	Prandtl-csővel mért átlagsebesség a határréteg mérések során [m/s]
v	szélesebbesség v komponense [m/s]
v_d	v komponens irányában vett dimenziótlan és korrigált átlagsebesség [-]
v_{md}	a dimenziótlan időátlagolt sebesség nagysága [-]
$\bar{v}$	v szélesebbesség komponens időátlagolt értéke [m/s]
x	x koordináta [mm]
y	y koordináta [mm]
z	felszín feletti magasság, z koordináta [m], [mm]
z_0	érdesség magasság [m]
z_f	felszín feletti magasság valós léptékben [m]
z_{ref}	referenciamagasság [m]

GÖRÖG BETŰS JELÖLÉSEK

α	profilkitevő [-]
κ	Kármán konstans [-]
σ_u	u szélesebbesség komponens szórása [m/s]
σ_v	v szélesebbesség komponens szórása [m/s]

1 BEVEZETÉS

Az emberiség egyre nagyobb hányada lakik városokban, és ez a tendencia Magyarországra is jellemző. A városokban élő vagy dolgozó emberek számának növekedése maga után vonja a városokban közlekedő járművek számának növekedését. A legjelentősebb közlekedési eredetű szennyeződést a szén-monoxid, a szálló por és a nitrogén-oxidok okozzák. A városlakók egészségének védelme céljából a különböző szennyezőanyagok legnagyobb megengedett koncentrációját szigorú előírások határozzák meg.

A levegőbe jutó szennyezőanyagok terjedését, elkeveredését a különféle áramlási folyamatok határozzák meg. Ezek az áramlási folyamatok az atmoszférikus határrétegben játszódnak le, ezért az atmoszférikus határréteg jellemzői kulcsfontosságú szerepet játszanak a kibocsátott szennyeződések terjedésében.

Az atmoszférikus határréteg jellemzőit a domborzati viszonyok, a növényzet és az épületek jelentős mértékben befolyásolják, éppen ezért a nagyvárosi környezetben kialakuló atmoszférikus határréteg paraméterei lényegesen eltérnek a nem nagyvárosi környezetben – például egy mező felett – kialakuló határréteg paramétereitől.

Nagyvárosi környezetben a talaj közelében kialakuló áramlási viszonyokat leginkább a környező épületek befolyásolják. Egy forgalmas út közvetlen közelében a szennyezők koncentrációja rendkívüli mértékben növekszik, és a szennyeződés áttérjedhet az út mellett elhelyezkedő terekre is. A térre bejutott szennyezőanyagok elkeveredése nagymértékben függ a teret körülölelő épületek elhelyezkedésétől, alakjától és méretétől.

A Budapest V. kerületében található József nádor tér a rendkívül forgalmas József Attila utca mellett helyezkedik el, ezért a József Attila utca felől nagy mennyiségű szennyezőanyag áramolhat be a térre. Amennyiben a tér átszellőzése megfelelő, nem áramlik be jelentős mennyiségű szennyezőanyag, vagy a beáramló szennyezőanyag gyorsan elkeveredik és a tér levegőminősége megfelel az előírásoknak.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszékén korábban már zajlottak a József nádor tér vizsgálatára irányuló kutatások. A kutatások során a teret egyrészt numerikus szimuláció segítségével vizsgálták, másrészt egy nagymértékben egyszerűsített, 1:650 léptékű modellen végeztek szélcsatorna méréseket az Áramlástan Tanszék NPL típusú szélcsatornájában. Munkám során a József nádor tér és a körülötte elhelyezkedő városrész 1:350 léptékű modelljét készítettem el, és ezen a modellen szélcsatorna méréseket végeztem az Áramlástan Tanszék nagy vízszintes szélcsatornájában LDA technikát alkalmazva.

A tér modelljén végzett mérések előtt határréteg méréseket végeztem. A határréteg mérések során a turbulencia generátor elemek elrendezését többször megváltoztattam. A végső elrendezés mellett kapott eredmények alapján a szélcsatornában létrehozott határréteget alkalmasnak találtam városi tér átszellőzésének szélcsatorna vizsgálatára.

A mérések során egy különleges, egyedi technika került alkalmazásra, ugyanis a pozícionáló szerkezetet – melyre később az LDA optikát rögzítettük – úgy helyeztük el, hogy az optikával lehetőségünk legyen a mérőtérhez alulról, üveglapon vagy plexin keresztül hozzáférni. Az így kapott elrendezés mellett – a mérések végrehajtásához alkalmazott kétkomponensű LDA segítségével – az u és v sebességkomponensek meghatározására nyílt lehetőség.

2 ELŐZMÉNYEK FELTÁRÁSA

2.1 Irodalmi áttekintés

Városrészek, terek átszellőzésének, a szennyezőanyagok terjedésének vizsgálata többféle megközelítés alapján történhet. A vizsgálatokhoz alkalmazott két fő módszer a mérés és a számítás. A mérések lehetnek szélcsatorna mérések, vízcsatorna mérések vagy helyszíni (1:1 méretarányú vagy kis léptékű) mérések. A számítások történhetnek analitikus módon vagy numerikus szimuláció útján. Célszerű egy adott vizsgálathoz a felsorolt megközelítések közül legalább kettőt alkalmazni, ilyen formában mindkét módszerrel kapott eredmények validálhatóak.

A témával kapcsolatosan a szakirodalomban többféle vizsgált elrendezéssel találkozhatunk, ezeket az elrendezéseket komplexitás alapján osztályozhatjuk. A legegyszerűbb elrendezés esetén egyetlen kocka, téglatest vagy henger alakú tárgy körüli áramlás jellemzőit vizsgálják. Ez azért lehet elfogadható közelítés, mert egy épület legegyszerűbben egy kockával modellezhető. Fontos megemlíteni, hogy egy városi környezetben elhelyezkedő épület vizsgálata során a környező épületek hatása nem elhanyagolható, ennek ellenére egy különálló épület vizsgálata során kapott eredményekből is hasznos következtetések vonhatóak le. Santos és szerzőtársai [1] numerikus szimulációval (módosított RANS modell segítségével) vizsgálták a különálló, kocka alakú épület körüli áramlást és szennyezőanyag terjedést semleges, stabil és instabil atmoszférikus állapot mellett. Eredményeiket korábbi mérési eredményekkel validálták. Mavroidis és szerzőtársai [2] helyszíni és szélcsatorna méréseket végeztek, melyek során egyszerű geometriájú (henger, kocka, hasáb), különálló tárgyak, épületek körüli szennyezőanyag (füstcsóva) terjedését vizsgálták. A helyszíni méréseik során a szennyezőanyag jobban szétszóródott.

Olyan elrendezéssel is találkozhatunk, melynél városi környezetben jellemzően előforduló üreget, bemélyedést, utcakanyont vizsgálnak. Meroney és szerzőtársai szélcsatorna mérések és numerikus szimuláció (RANS modell) segítségével különböző téglatest és kocka alakú épületeket valamint egy kétdimenziós utcakanyon modellt vizsgáltak [3], meghatározták többek között a nyomástényező eloszlását a felületeken és a szennyezőanyag koncentrációt különböző helyeken. Egy másik kutatás során különböző utcakanyon konfigurációkat szélcsatorna mérésekkel tanulmányoztak [4], a forgalom által kibocsátott kipufogógázokat vonalforrással modellezték. Végtelen hosszúságú utcákat feltételeztek, a szennyezőanyag terjedést két dimenzióban vizsgálták. Ryu és Baik [5] numerikus szimulációval (RANS modell segítségével) vizsgálta egy kocka alakú üregben kialakuló sebességmezőt és a turbulencia jellemzőket. Kim és Baik kétdimenziós numerikus modellen végzett számítások segítségével egy utcakanyonban a belépő turbulencia jellemzők sebességmezőre gyakorolt hatását vizsgálta [6], míg egy másik kutatás során Kim és szerzőtársai egy hegy és/vagy két épület áramlási jellemzőkre és szennyezőanyag terjedésre gyakorolt hatását tanulmányozták [7] szintén kétdimenziós numerikus szimulációval (RANS modell alkalmazása mellett). Pavageau és Schatzmann [8] egy utcakanyon vizsgálatához szélcsatorna méréseket végzett, többek között meghatározta adott térbeli pontokban a szennyezőanyag időátlagolt koncentrációját és a koncentrációingadozást, eredményeit korábbi kutatási eredményekkel vetette össze.

Komoly következtetéseket lehet levonni két utca kereszteződésének vizsgálata során kapott eredményekből. Soulhac és szerzőtársai [9] egyszerű, kocka alakú blokkok által határolt merőleges kereszteződéseket vizsgáltak szélcsatorna mérésekkel és numerikus

szimulációval. Az áramvonalakat és a szennyezőanyag terjedést tanulmányozták különböző szélirányok esetén. A sebességmérések végrehajtásához LDA-t használtak. Ahmad és szerzőtársai [10] szélcsatorna méréseket végeztek, mely mérések során különböző geometriával rendelkező utcakanyonokban és kereszteződésekben a kialakuló áramlás jellemzőit vizsgálták. Különböző forgalmi viszonyokat feltételezve meghatározták többek között a szennyezőanyag koncentrációjának eloszlását is.

Kockák és téglatestek által alkotott mátrix elrendezéssel bizonyos esetekben egészen jól modellezhető egy adott városi környezet, bár ez nagymértékű egyszerűsítésnek számít. Princevac és szerzőtársai [11] vízcsatorna mérések segítségével 3x3-as és 5x5-ös szabályos mátrix elrendezéseken sebességmező analízist végeztek. Olyan elrendezést is vizsgáltak, melynél a központi épület magasabb volt a többinél. A mérések végrehajtásához PIV technikát alkalmaztak. Cheng és szerzőtársai [12] szélcsatorna méréseket végeztek különböző sűrűségben felhelyezett kockák által alkotott mátrix elrendezéseken, meghatározták a nyomástényező és ellenállás-tényező eloszlásokat valamint ábrázoltak többféle nyírófeszültség profilt. Hamlyn és szerzőtársai [13] szélcsatorna mérések segítségével különböző épületelrendezések és szélirányok mellett különböző koncentráció profilokat határoztak meg. Coceal és szerzőtársai [14] direkt numerikus szimuláció segítségével különböző mátrix elrendezéseket vizsgáltak. Szimulációjuk során nyomáskülönbség és különböző feszültség profilokat határoztak meg, vizsgálták a turbulens kinetikus energia eloszlását, az ellenállás-tényezőket és a keveredési úthosszokat. Eredményeiket korábbi kutatási eredményekkel hasonlították össze. Kim és Baik [15] numerikus szimuláció (RANS modell) segítségével a különböző szélirányok mellett kialakuló áramképeket és a szennyezőanyag koncentráció eloszlását vizsgálta kocka alakú épületek szabályos mátrix elrendezése esetén. Chang és Meroney [16] szélcsatorna méréssel és numerikus szimulációval egy különálló téglatest alakú épületet és ugyanilyen téglatestekből álló mátrix elrendezéseket vizsgált. Mindegyik vizsgált esetben egy adott épület tetején meghatározta a nyomástényező eloszlását. Cheng és szerzőtársai [17] nagy örvény szimulációkkal és standard $k-\epsilon$ RANS modell alkalmazásával vizsgáltak egy kockákból álló mátrix elrendezést, összehasonlítottak különböző esetekben kapott sebességprofilokat, sebességmezőket, Reynolds feszültség profilokat, vizsgálták a turbulens kinetikus energia eloszlását és az energia spektrumokat. Hanna és szerzőtársai [18] kockákból álló mátrix elrendezéseket vizsgáltak nagy örvény szimuláció és vízcsatornás mérés segítségével. Összehasonlították a mérés és a szimuláció során kapott átlagsebesség és turbulencia intenzitás profilokat. Mavroidis és Griffiths [19] szélcsatorna mérései során különböző sűrűségben felhelyezett kockákból álló mátrix elrendezéseket vizsgált, a mátrixokba azonban a jellemző kocka alaktól eltérő alakú (henger, magas hasáb) objektumokat is elhelyezett. Különböző szélirányok és szélesebségek mellett szennyezőanyag koncentráció profilokat mért, és gondoskodott az áramlás vizualizálásáról. Macdonald és szerzőtársai különböző sűrűségben felhelyezett kockákból álló mátrix elrendezéseket vizsgáltak terepen történő, kis léptékű mérések segítségével [20], míg egy másik kutatás során szélcsatorna (1:100 méretarányú) és terepen történő, kis léptékű (1:10 méretarányú) mérések segítségével vizsgáltak szintén kockákból álló elrendezéseket [21]. Méréseik középpontjában a szennyezőanyag koncentráció eloszlásának meghatározása állt. Davidson és szerzőtársai [22] különböző mátrix konfigurációkon végzett szélcsatorna mérések segítségével sebességprofilokat és szennyezőanyag koncentráció profilokat ábrázoltak.

Egy városrész legrészletesebb modelljében az épületek alakja és elrendezése arányaiban megegyezik az eredeti városrészben található épületek alakjával és elrendezésével, a modell lényegében kicsinyített mása az eredetinek. Az így létrehozott modellen végzett mérések segítségével vonhatjuk le a legpontosabb következtetéseket az eredeti városrészre

vonatkozóan. Kismértékű egyszerűsítések sok esetben előfordulnak, például egy közel téglatest alakú épület téglatesttel modellezhető. Parra és szerzőtársai [23] CFD szimulációval vizsgáltak egy Pamplonában található városrészt. A szimulációk során különféle szennyezőanyagok koncentrációjának térbeli és időbeli eloszlását vizsgálták, a kapott eredményeket helyszíni mérések eredményeivel vetették össze. Heist és szerzőtársai [24] egy Brooklynban található városrészt vizsgáltak szélcsatorna mérésével és nagy örvény szimulációval, áramlási jellemzőket határoztak meg és gondoskodtak az áramlás vizualizálásáról. A sebességmérés LDV rendszer segítségével történt. A kutatás második részében [25] a szennyezőanyag koncentráció vizsgálata állt a középpontban. Xie és Castro [26] egy Londonban található városrészt vizsgált nagy örvény szimulációval, RANS modell alkalmazásával és szélcsatorna mérésével. Átlagsebesség, turbulencia intenzitás és szennyezőanyag koncentráció profilokat határozott meg. Neofytou és szerzőtársai [27] CFD szimulációval vizsgáltak egy Helsinkiben található városrészt. Az áramlási teret és különféle szennyezőanyagok koncentrációjának eloszlását vizsgálták, eredményeiket helyszíni mérések során kapott eredményekkel vetették össze. Stathopoulos és Baskaran [28] egy Montrealban található városrész néhány épületéből álló elrendezést vizsgáltak numerikus szimuláció (RANS modell) és szélcsatorna mérés segítségével. Ábrázolták a szélcsatornában mért átlagsebesség és turbulencia intenzitás profilt, vizsgálták az épületek körül kialakuló sebességmezőt, valamint meghatározták a kapcsolatot a mért és a szimulált sebességáramnyok között. Egy adott pontban a sebességáramny az épület jelenlétében mért sebesség és az épület jelenléte nélkül mért sebesség hányadosa volt. Gadilhe és szerzőtársai [29] egy Nantes-ban található félkör alakú teret vizsgáltak szélcsatorna mérés és numerikus szimuláció (RANS modell) segítségével. Sebesség és turbulencia intenzitás profilokat ábrázoltak, meghatározták adott magasságban a tér különböző pontjain mért sebességértékeket, valamint összehasonlították a mérésével és a szimulációval kapott eredményeket.

Lajos és szerzőtársai tanulmányukban [30] összefoglalják azokat a tapasztalatokat, amelyeket a szerzők a közlekedési szennyezők városi terjedésével kapcsolatos szélcsatorna mérések és az áramlás numerikus szimulációjával végzett vizsgálatok során szereztek.

A fent idézett cikkek alapján kijelenthetjük, hogy a városi áramlások vizsgálata számos tanulmány témája volt, különböző egyszerűsítési szinteken, különböző módosító tényezők (domborzat, járműturbulencia stb.) figyelembevételével. Míg utcakanyonok és kereszteződésekéről számos ismeret áll rendelkezésünkre, a körülépített városi terek vizsgálatát csak néhány szerző tette vizsgálat tárgyává. Ez volt az egyik oka az Áramlástan Tanszéken e témában indult kutatásoknak, amelyet a következőkben ismertetek, és amelybe a TDK dolgozat keretében bekapcsolódtam.

2.2 A József nádor tér vizsgálatára irányuló korábbi kutatások az Áramlástan Tanszéken

Az OTP Ingatlan Zrt. 2006-ban megnyerte a budapesti V. kerületi József nádor tér alatt létesítendő mélygarázs építési és üzemeltetési jogának értékesítésére kiírt pályázatot, ezzel megszerezte a mélygarázs építésének jogát. A József nádor téren és környezetében akkoriban is igen jelentős volt a levegőszennyezettség, ezért a mélygarázs létesítése semmiképpen sem növelhette a levegő szennyeződését a József nádor tér környezetében.

Az OTP Ingatlan Zrt. megbízta a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Áramlástan Tanszékét a József nádor térre tervezett mélygarázs tervezett üzembe helyezése előtti és utáni levegőszennyezettség numerikus szimulációval történő meghatározásával.

A szimulációk elvégzéséhez az Áramlástan Tanszék a MISKAM szoftvert alkalmazta. A vizsgált terület a József Nádor tér illetve az Erzsébet téri légszennyezettséget vizsgáló automata mérőállomás környéke volt. Ennek a területnek a közelében lévő valamennyi jelentős szennyezőanyag forrás és áramlási viszonyokat befolyásoló objektum (épület és vegetáció) modellezésre került egy 1100x900 [m] méretű tartományon belül. A teljes számítási tartomány 1400x1440 [m] alapterületű és 500 [m] magas volt. Az épületeket – egy esettől eltekintve – lapos tetejű blokkokként modellezték. A MISKAM a vegetációt porózus cellaként vette figyelembe, míg a szennyezőanyag forrásokat a cellákban lévő térfogati forrásként kezelte. Egyes útszakaszokon a közlekedési eredetű levegőszennyeződést vonalforrásokkal modellezték, valamint a mélygarázs hatása is modellezésre került.

A szimulációk során kapott eredmények segítségével megállapították, hogy légszennyezettség szempontjából a József nádor tér északi része és a József Attila utca a legterheltebb. A leggyakrabban előforduló nyugati, északnyugati, északi, és északkeleti szélirányok esetén a legjelentősebb a tér légszennyezettsége. Ezeknél a szélirányoknál a tér északi negyedében-harmadában a légszennyezettség a határértéket jelentős mértékben meghaladja. A garázs hatását figyelembe véve megállapították, hogy a szennyeződést tartalmazó elhasznált levegő elvezetésének helyes megtervezése esetén a rámpa közvetlen közelében nő, a tér többi részén azonban 6-9 %-kal csökken a szennyezőanyag koncentráció a garázs nélküli esethez képest [31].

Manninger [32] diplomamunkájában a József nádor tér nagymértékben egyszerűsített, 1:650 léptékű modelljén végzett szélcsatorna méréseket az Áramlástan Tanszék NPL típusú szélcsatornájában. Mérései végrehajtásához LDA technikát alkalmazott. Sebességprofilokat mért, valamint kijelölt síkokon meghatározta az egyes sebességkomponensek nagyságának eloszlását. Az egyik síkon a turbulencia intenzitás eloszlását is ábrázolta. Méréseit egyetlen szélirány (északi) mellett végezte.

Varga [33] diplomamunkájában ugyanazt a modellt vizsgálta, mint Manninger [32]. Varga [33] egyrészt méréseket végzett a szennyezőanyag koncentráció eloszlásának meghatározása céljából, másrészt MISKAM szimulációkat futtatott északi, északnyugati, nyugati, délnyugati és déli szélirányokat beállítva, mely futtatások során a szennyezőanyag koncentráció eloszlás vizsgálata mellett a téren és a tér környékén kialakuló áramképet is meghatározta.

Varga és Manninger egyszerűsített térmodelljén azonosíthatóak voltak a téren kialakuló jellemző áramlási struktúrák. Az 1:650 modell és az NPL szélcsatorna kis mérőtere ugyanakkor korlátozta a mérés pontosságát, és nem adott lehetőséget a korábbi MISKAM szimulációk validálására.

Emiatt, valamint az áramlási struktúráknak a valódi József Nádor téren való azonosítására, egy nagyobb komplexitási fokú, részletesebb modellt készítettem és jelen dolgozat keretében szélcsatornában megvizsgáltam. Nagy hangsúlyt fektettem az atmoszférikus határréteg pontos modellezésére, amit a következő fejezetben ismertetek.

3 HATÁRRÉTEG MÉRÉSEK A NAGY VÍZSZINTES SZÉLCSATORNÁBAN

3.1 Az atmoszférikus határréteg jellemzői

Az atmoszférikus határréteg szélcsatornában történő modellezéséhez érdekességi elemek és adott esetben egyéb kiegészítő elemek (turbulencia rácsok, turbulencia generátorok, stb.) megfelelő kombinációjának alkalmazására, alkalmas elrendezésére van szükség [34]. Amennyiben egy szélcsatorna nem rendelkezik kellően hosszú előkészítő szakasszal, az atmoszférikus határréteg beállítása nehéz, időigényes feladat. Ahhoz, hogy egy tér (vagy városrész) modelljén végzett mérések eredményeiből helytálló következtetéseket vonhassunk le az eredeti nagyságú térre vonatkozóan, nagyvárosi környezetben jellemző határréteget kell modelleznünk a szélcsatornában. Esetünkben a határréteg paramétereit ennek megfelelően kellett beállítani. A paraméterekre vonatkozóan útmutatók állnak rendelkezésünkre. Az általam vizsgált paraméterek és az ezek meghatározására alkalmas összefüggések a következők:

Főáramlás irányában vett időátlagolt szélesebesség:

$$\bar{u}(z) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt \quad (3.1)$$

Ahol $\bar{u}(z)$ a magasságtól függő, főáramlás irányában vett időátlagolt szélesebesség, $u(t)$ a főáramlás irányában vett pillanatnyi szélesebesség (az adott magasságon), T pedig a mérési időtartam egy pontban.

v szélesebesség komponens időátlagolt értéke:

$$\bar{v}(z) = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (3.2)$$

Ahol $\bar{v}(z)$ a magasságtól függő v szélesebesség komponens időátlagolt értéke, $v(t)$ a pillanatnyi szélesebesség v komponense (az adott magasságon).

Turbulencia intenzitás az u sebességkomponens irányában:

$$I_u(z) = \frac{\sigma_u(z)}{\bar{u}(z)} \quad (3.3)$$

Ahol $I_u(z)$ a turbulencia intenzitás az u sebességkomponens irányában, $\sigma_u(z)$ az u szélesebesség komponens szórása.

Turbulencia intenzitás a v komponens irányában:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v(z)}{\bar{v}(z)} \quad (3.4)$$

Ahol $I_v(z)$ a turbulencia intenzitás a v komponens irányában, $\sigma_v(z)$ a v szélesebesség komponens szórása.

A turbulencia longitudinális integrál hosszléptéke:

$$L_{u,x} = \int_0^{\infty} R_{uu}(\Delta x) d\Delta x \quad (3.5)$$

Ahol $L_{u,x}$ a turbulencia longitudinális integrál hosszléptéke, R_{uu} a sebességváltozás autokorrelációs együtthatója, Δx pedig az eltolás.

A longitudinális sebességingadozás teljesítmény sűrűség spektruma:

$$\sigma_u^2 = \int_0^{\infty} S_{uu}(f) df \quad (3.6)$$

Ahol S_{uu} a longitudinális sebességingadozás teljesítmény sűrűség spektruma, σ_u az u szélsősebesség komponens szórása (az adott magasságon), f a sebességingadozás frekvenciája.

A mikrometeorológiai tartományban az alábbi dimenziótlan összefüggés érvényes:

$$\frac{f \cdot S_{uu}(f, z)}{\sigma_u^2(z)} = \frac{A \cdot f_{red}}{(E + B \cdot f_{red}^C)^D} \quad (3.7)$$

Ahol f_{red} a redukált frekvencia, $A...E$ pedig állandók. A méréseim során kapott teljesítmény sűrűség spektrumokat minden esetben a Kármán spektrummal hasonlítottam össze, a konstansokat és a redukált frekvenciát ennek megfelelően határoztam meg [35]. Ez alapján a redukált frekvenciát a következő összefüggés segítségével számíthatjuk ki:

$$f_{red} = \frac{f \cdot L_{u,x}}{u_{ref}} \quad (3.8)$$

Ahol u_{ref} az átlagos szélsősebesség z_{ref} magasságban.

A főáramlás irányában vett időátlagolt szélsősebesség ($\bar{u}(z)$) magasságfüggése az alábbi közelítő összefüggéssel vehető figyelembe [34]:

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_{ref}} = \left(\frac{z - d_0}{z_{ref} - d_0} \right)^\alpha \quad (3.9)$$

Ahol α a profilkitevő, z a felszín feletti magasság, z_{ref} a referenciamagasság, u_{ref} az átlagos szélsősebesség z_{ref} magasságban, d_0 a profileltolási magasság.

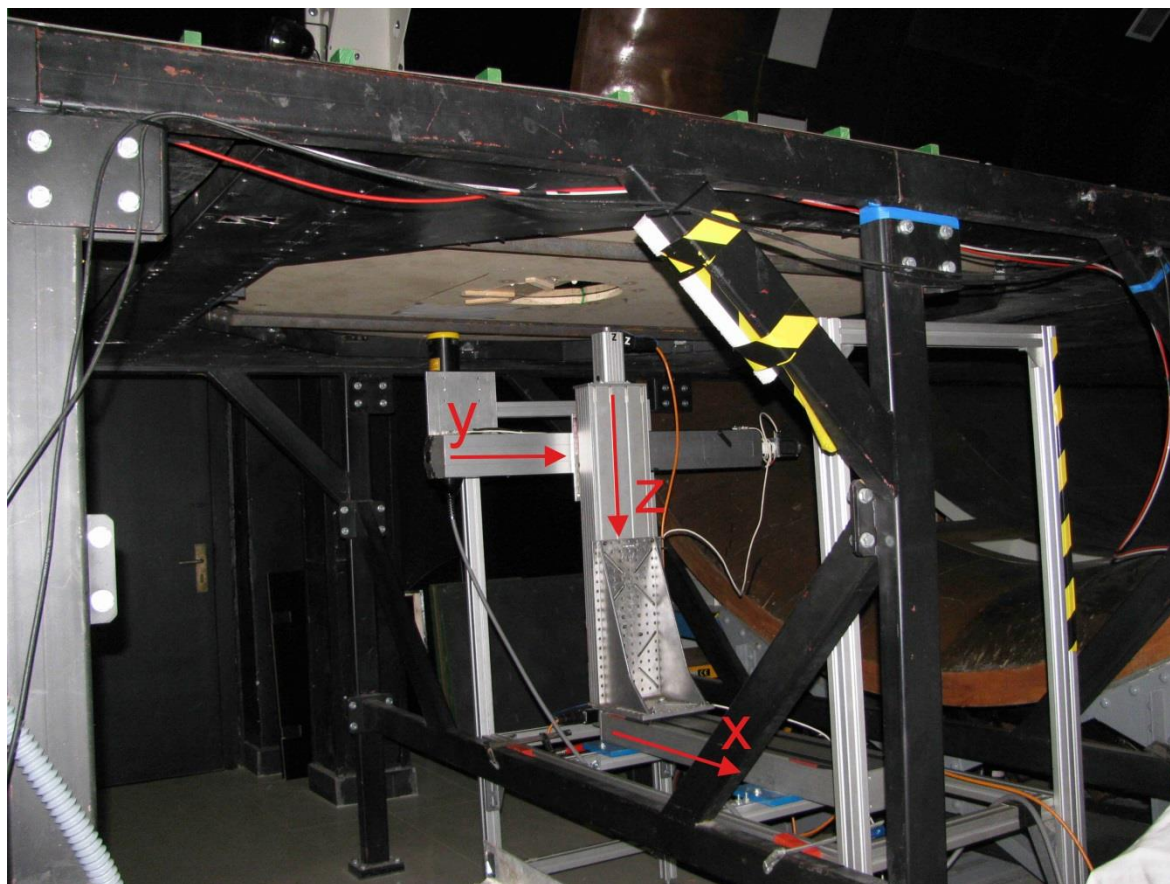
A talaj közelében (100 m alatti tartomány), ahol állandó impulzusáramot feltételezünk, a logaritmikus faltörvény érvényes [34]:

$$\frac{\bar{u}(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z - d_0}{z_0} \right) \quad (3.10)$$

Ahol u_* a súrlódási sebesség, κ a Kármán konstans, z_0 az érdesség magasság.

3.2 A mérések előkészítése

A mérések megkezdése előtt a pozicionáló szerkezetet közvetlenül a mérőtér alján elhelyezkedő rétegelt falemezből készült körlap alá rögzítettük. A pozicionáló szerkezet x , y és z tengelyei rendre a v , u és w sebességkomponensekkel párhuzamosak voltak, a pozitív y irány a pozitív u irányába mutatott, de a pozitív x és z irányok a negatív v és w irányokba mutattak. Az említett rétegelt lemez közepén egy – a mérések végrehajtásához megfelelő méretű, körülbelül 300 x 200 mm-es – kivágás található, amelyet egy vékony plexivel fedtem le. Ez a megoldás lehetővé tette az áramláshoz való optikai hozzáférhetőséget úgy, hogy a pozicionáló szerkezetre felszerelt LDA optika is kellően védett helyzetbe került. A mérőtérhez tehát alulról, plexi lapon keresztül férünk hozzá. A mérőtér alatt elhelyezkedő pozicionáló szerkezet és LDA optika látható a 3.1 ábrán:



3.1 ábra: A pozicionáló szerkezet és az LDA optika elhelyezkedése

Rögzített szélcsatorna kijelző állás esetén a belépő sebesség kismértékű, hosszú periódusidejű változása figyelhető meg. E jelenség miatt az időátlagolt sebességprofilokat célszerű korrigálni. A szélcsatornába felszerelt Prandtl-csővel mért dinamikus nyomást nyomástávadó közbeiktatásával analóg külső bemenetként definiáltuk az adatgyűjtő szoftverben. Ennek köszönhetően minden mérési ponthoz tartozott egy Prandtl-csővel mért átlagsebesség érték ($\bar{u}_{Prandtl}$), mellyel elosztottam a referenciának kijelölt sebességértéket ($u_{Prandtl,ref}$), mely minden esetben az első mérési ponthoz tartozó Prandtl-csővel mért átlagsebesség volt. Az így kapott dimenziótlan számmal megszoroztam az aktuális $u(z)/u_{ref}$ értéket. u_{ref} minden esetben (a határréteg mérések esetében) az adott profil mérése során a legnagyobb magasságban lévő mérési pontban (z_{ref}) LDA-val mért átlagsebesség értéke volt. Az imént leírtaknak megfelelően a főáramlás irányában vett

korrigált és dimenziótlan időátlagolt sebességet ($u_{c,d}$) a 3.11 összefüggés segítségével számíthatjuk ki.

$$u_{c,d} = \frac{\overline{u}(z)}{u_{ref}} \cdot \frac{u_{Prandtl,ref}}{\overline{u}_{Prandtl}} \quad (3.11)$$

3.3 Első mérési sorozat

Mivel LDA technika alkalmazásával korábban még senki sem végzett méréseket a nagy vízszintes szélcsatornában, első mérési sorozatom célja egyrészt az volt, hogy megvizsgáljam, mennyire jól alkalmazható az LDA mérések végzéséhez az Áramlástan Tanszék nagy vízszintes szélcsatornájában. Egyedi technikának számít az is, hogy a mérőtérhez alulról, üveglapon (vagy plexin) keresztül férünk hozzá, így ennek a technikának az alkalmazhatóságát is vizsgáltam. Összehasonlítottam adott szélcsatorna kijelző állás mellett különböző helyeken mért dimenziótlan időátlagolt sebességprofilokat, valamint adott helyen különböző szélcsatorna kijelző állások mellett mért dimenziótlan időátlagolt sebességprofilokat. Meghatároztam a létrehozott határréteg jellemzőit, így meg tudtam állapítani, hogy a határréteg célunknak megfelelő.

Első mérési sorozatom során a határréteg létrehozásához alkalmazott elemek elrendezése a következőképpen alakult:

- Érdességi elemek felhelyezése az előkészítő szakasz elejétől egészen a plexiig
- 6 db 1200 mm magas úgynevezett spike (örvénygenerátor) elhelyezése egyenletesen, egymástól 360 mm távolságra, az előkészítő szakasz elejénél
- 2 db örvénygeneráló kereszttrúd felhelyezése 35 és 145 mm magasságba, az előkészítő szakasz elejénél

Az így kapott elrendezés látható a 3.2 ábrán:

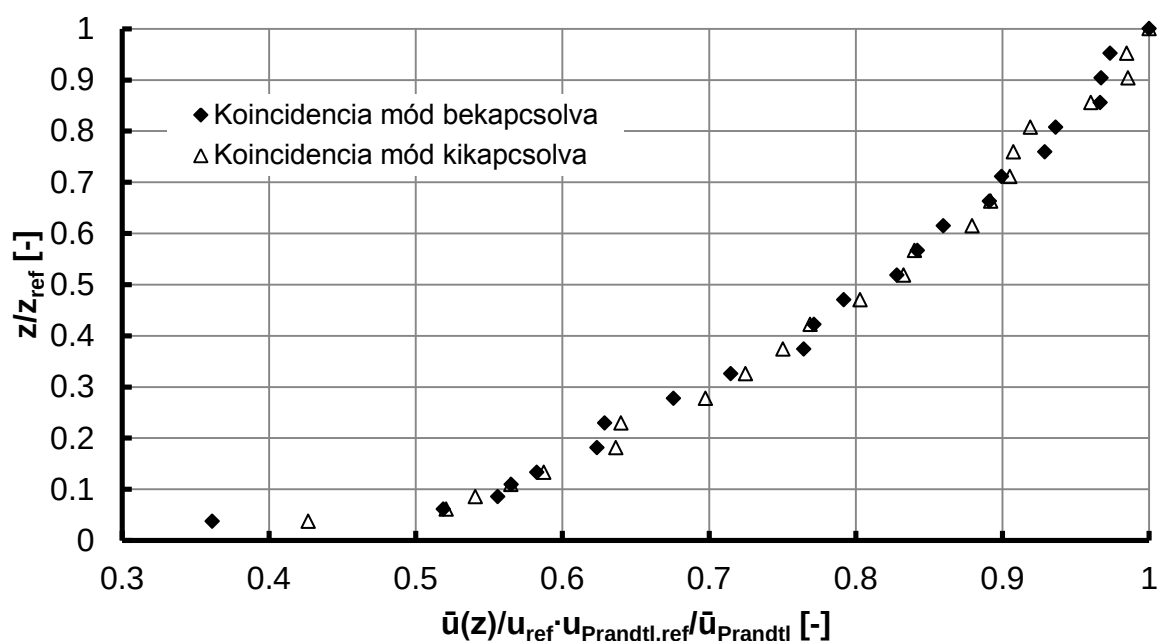


3.2 ábra: A határréteg létrehozásához alkalmazott elemek elhelyezkedése az első mérési sorozat során

Az áramláskövető részecskék áramlásba juttatásáról olajköd generátor segítségével gondoskodtam, melynek csövét az érdességi elemek közé vezettem be.

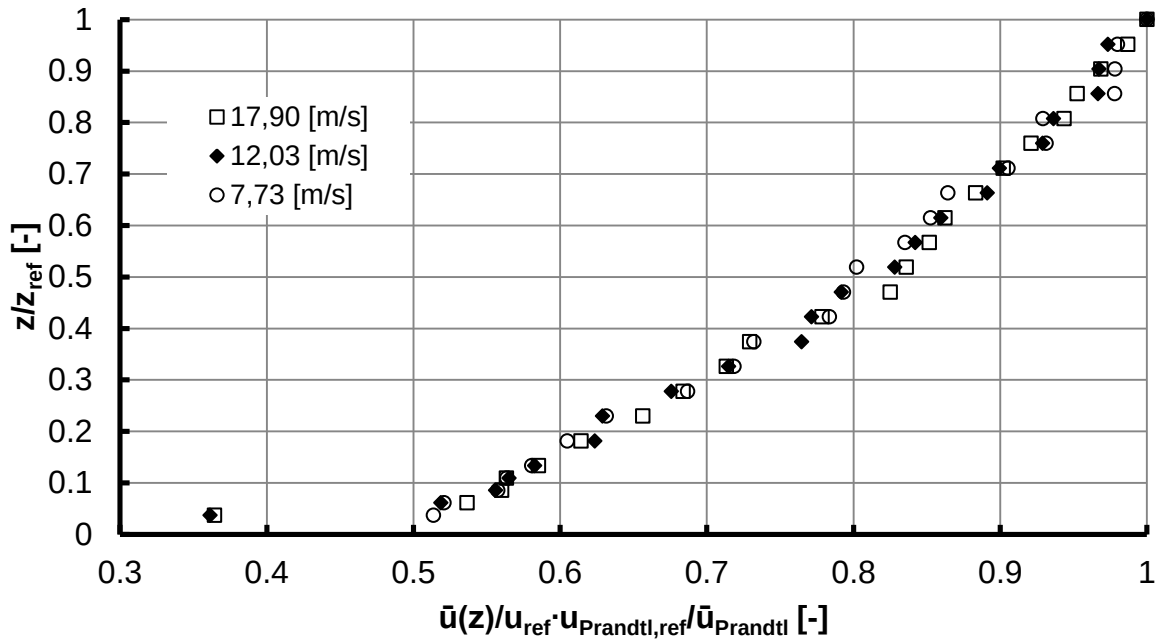
3.3.1 Mérések az LDA optika eredeti elhelyezkedése mellett

Elsőként 23 pontból álló profilokat mértem az $x=0$ [mm], $y=-100$ [mm] pozícióban, ahol az y tengely az áramlással párhuzamos, az x az áramlásra merőleges tengely, a z a függőleges tengely. A szélcsatorna keresztmetszetének középpontjában az átlagsebesség értéke 12 [m/s] körüli értéket vett fel. A mérési időtartam minden egyes pontban 60 [s] volt. A 3.3 ábrán a koincidencia módban mért, főáramlás irányában vett dimenziótlan időátlagolt sebességprofil láthatjuk a koincidencia mód kikapcsolása esetén mért profillal összehasonlítva. Koincidencia módban az LDA rendszer egyszerre méri a véletlenszerűen érkező részecskék x és y irányú sebességét (azaz sebességvektort határoz meg), míg kikapcsolva külön rögzíti az x és y irányban áthaladó részecskéket. Ebben az esetben nem lehet pillanatnyi sebességvektort meghatározni. Az alábbi diagramban ez az elvi különbség nem jelenik meg, ezért ez ismételt mérésnek tekinthető. Megállapítható, hogy az eltérés a két mért profil között csekély, az ismétlési hiba körülbelül 0,1-0,15 m/s.



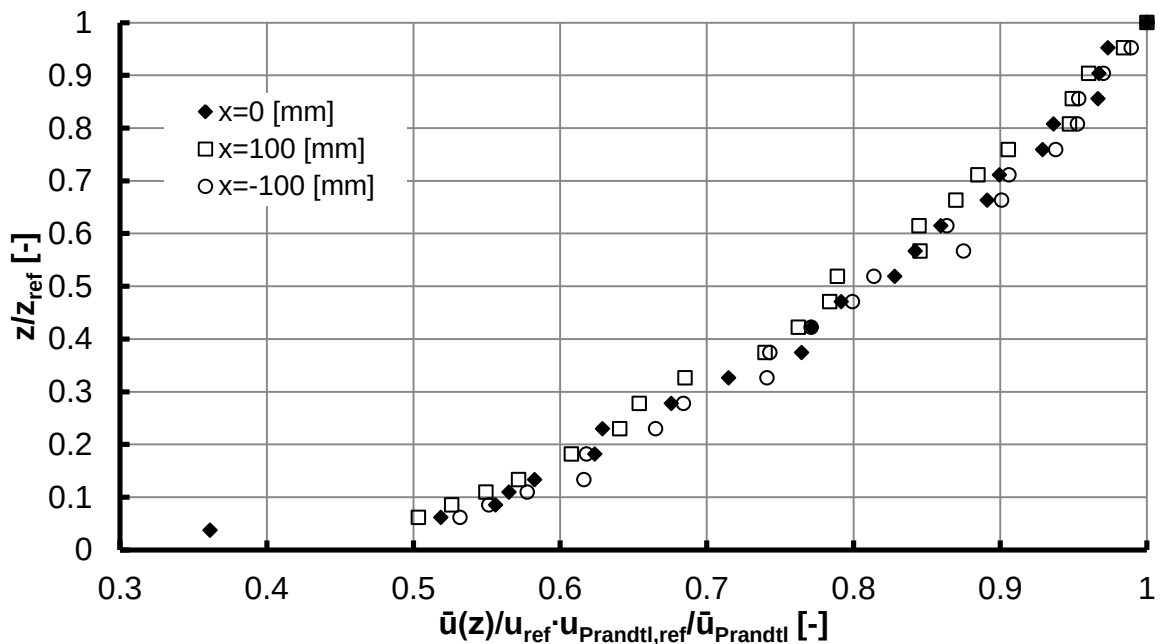
3.3 ábra: Főáramlás irányában vett dimenziótlan időátlagolt sebességprofil koincidencia mód be- és kikapcsolása esetén

A 3.4 ábrán különböző belépő szélességek mellett mért, főáramlás irányában vett dimenziótlan időátlagolt sebességprofilokat láthatunk. Ezek szintén 23 pontból álló profilok az $x=0$ [mm], $y=-100$ [mm] pozícióban. A mérési időtartam minden egyes pontban 60 [s] volt, valamint mindhárom profilt koincidencia módban mértem. Megállapíthatjuk, hogy a sebesség növelésétől függetlenül a dimenziótlan profilok nem változnak.



3.4 ábra: Főáramlás irányában vett dimenziótlan időátlagolt sebességprofilok különböző belépő szélsébségek esetén

A további mérések során a szélsátrna keresztmetszetének középpontjában (a Prandtl csőnél) az átlagsebesség értéke mindig 12 [m/s] körüli értéket vett fel. A 3.5 ábrán különböző pozíciókban mért, főáramlás irányában vett dimenziótlan időátlagolt sebességprofilokat láthatunk. Ezek szintén 23 pontból álló profilok. A különböző pozíciók csak az x koordinátában tértek el egymástól ($x=-100$ [mm], $x=0$ [mm], $x=100$ [mm]), az y koordináta végig változatlan ($y=-100$ [mm]) volt. A mérési időtartam az eredeti pozíciónál ($x=0$ [mm], $y=-100$ [mm]) minden egyes pontban 60 [s] volt, míg a két másik pozícióban 30 [s]. Mindhárom profilt koincidencia módban mértem.



3.5 ábra: Különböző pozíciókban mért, főáramlás irányában vett dimenziótlan időátlagolt sebességprofilok

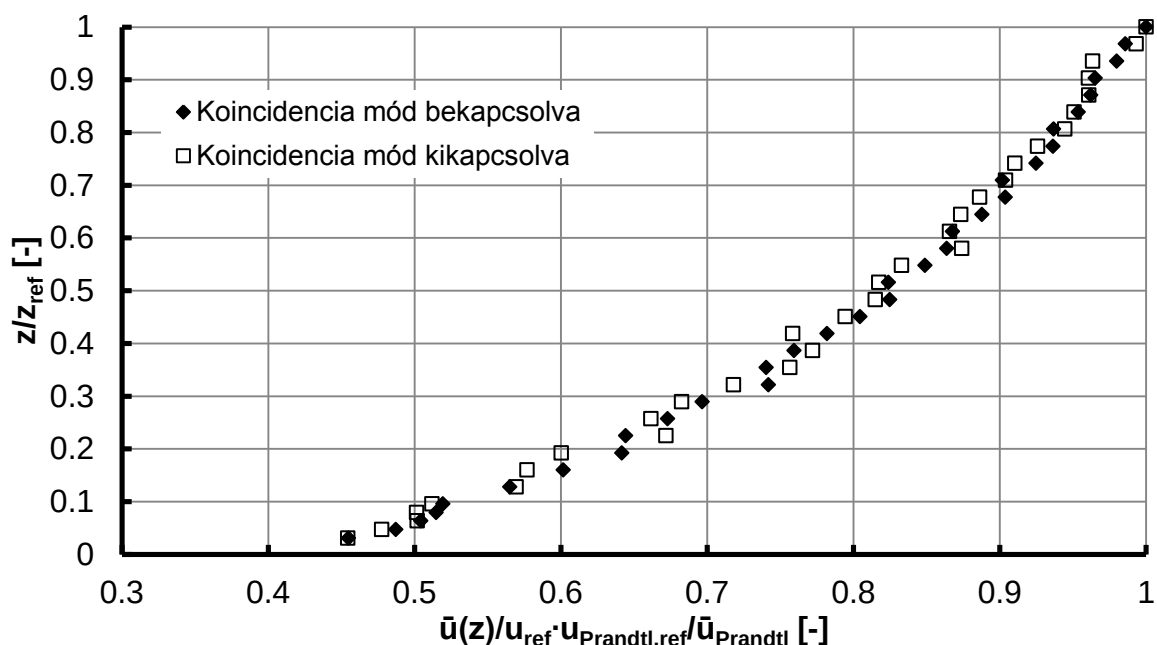
Az $x=-100$ [mm], $y=-100$ [mm] és az $x=100$ [mm], $y=-100$ [mm] pozíciókban a talajhoz legközelebb lévő mérési pontban a rendkívül alacsony adatrátá miatt gyakorlatilag értékelhetetlen eredményt kaptam, így ezeket a pontokat nem ábrázoltam a diagramon.

Az ábrázolt profilokat összehasonlítva általánosságban megállapítható, hogy a profilok jellegre jól egyeznek, de több helyen eltérés van az azonos magassághoz tartozó dimenziótlan átlagsebesség értékek között. Ezek az eltérések valószínűleg kiküszöbölhetőek, ha egy mérési pontban hosszabb ideig mérünk, mert így javítható a statisztikai reprezentativitás. A körülmények figyelembevételével (viszonylag gyors, teszt jellegű mérések) a kapott eredmények elfogadhatóak.

3.3.2 Az LDA optika felrögzítésének módosítása

Érdemes az LDA optikát úgy rögzíteni a pozicionáló szerkezetre, hogy a mérőtérben a lehető legmagasabbra fel tudjunk mérni. Egy tartó alkatrész megtervezése és legyártása után az LDA optika optimális felrögzítése lehetővé vált. Ez azt jelentette, hogy maximálisan 309,5 [mm] magasságig tudtam felmérni az újonnan felszerelt optika segítségével. Ez a magasság volt a referenciamagasság az LDA optika felrögzítésének módosítása után végzett mérések során.

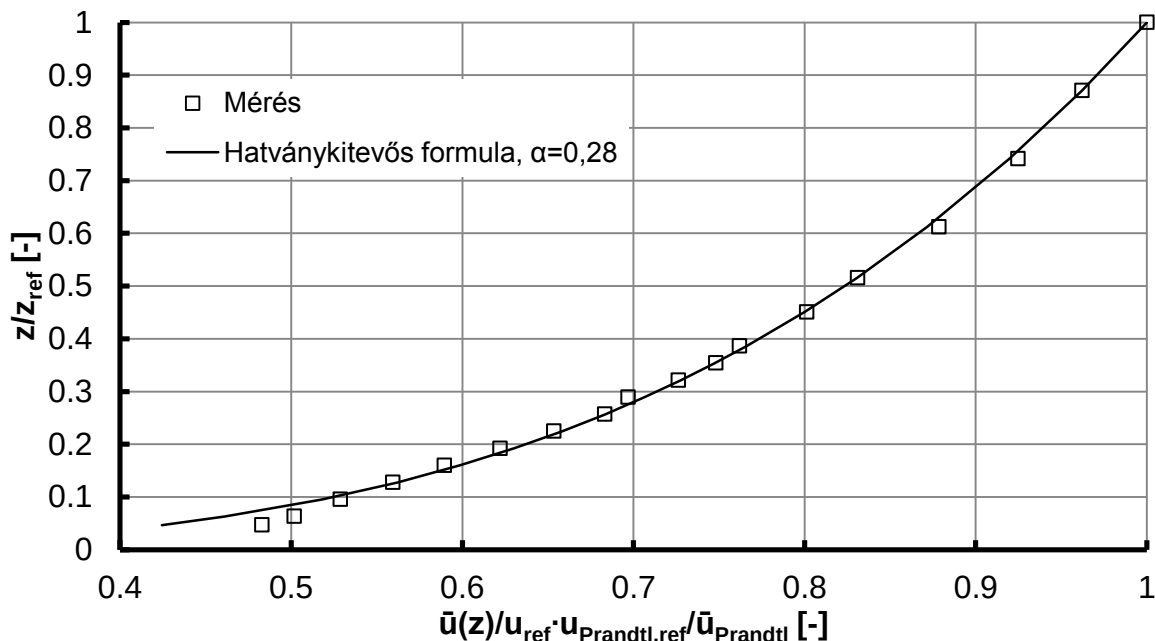
Az optika felrögzítésének módosítása után elsőként 34 pontból álló profilokat mértem az $x=0$ [mm], $y=-100$ [mm] pozícióban. A mérési időtartam minden egyes pontban 30 [s] volt. A 3.6 ábrán a felrögzítés módosítása után koincidenca módban mért, főáramlás irányában vett dimenziótlan időátlagolt sebességprofil láthatjuk a koincidenca mód kikapcsolása esetén mért profillal összehasonlítva.



3.6 ábra: A felrögzítés módosítása után mért, főáramlás irányában vett dimenziótlan időátlagolt sebességprofil koincidenca mód be- és kikapcsolása esetén

Ahhoz, hogy a spektrális jellemzőket kellő pontossággal meg tudjuk határozni, egy mérési pontban kellően hosszú ideig kell mérnünk. Ennek megfelelően a mérési időtartamot egy pontban 400 másodpercre állítottam be, és 18 pontból álló profilokat mértem az $x=0$ [mm], $y=-100$ [mm] pozícióban. A koincidenca módot kikapcsoltam. Az így végzett mérés eredményeiből határoztam meg a létrehozott határréteg főbb jellemzőit.

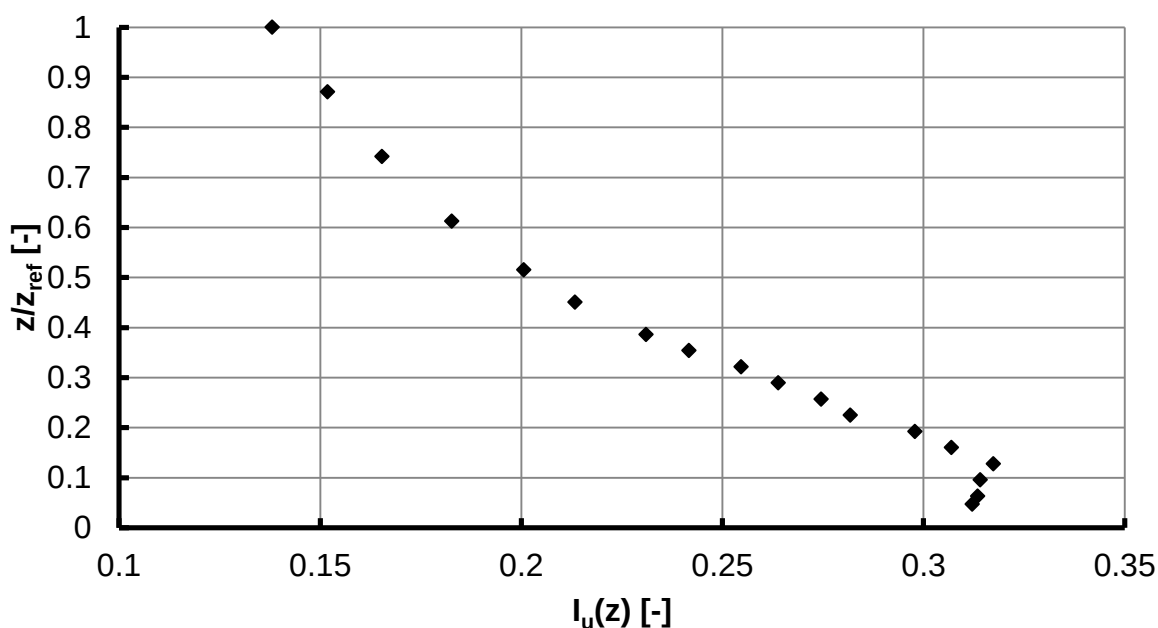
A 3.7 ábrán a mérés során kapott, főáramlás irányában vett dimenziótlan időátlagolt sebességprofil láthatjuk a (3.9) összefüggésben szereplő hatványkitevős formulából adódó profillal összehasonlítva. Esetünkben profileltolódás nem volt tapasztalható, így $d_0=0$ [m] értéket vett fel. A referenciamagasság (z_{ref}) a legmagasabb, LDA-val mért mérési pont, u_{ref} pedig az ehhez a ponthoz tartozó átlagsebesség értéke volt.



3.7 ábra: Megnövelt mérési időtartam mellett mért, főáramlás irányában vett dimenziótlan időátlagolt sebességprofil a hatványkitevős formulából adódó profillal összehasonlítva

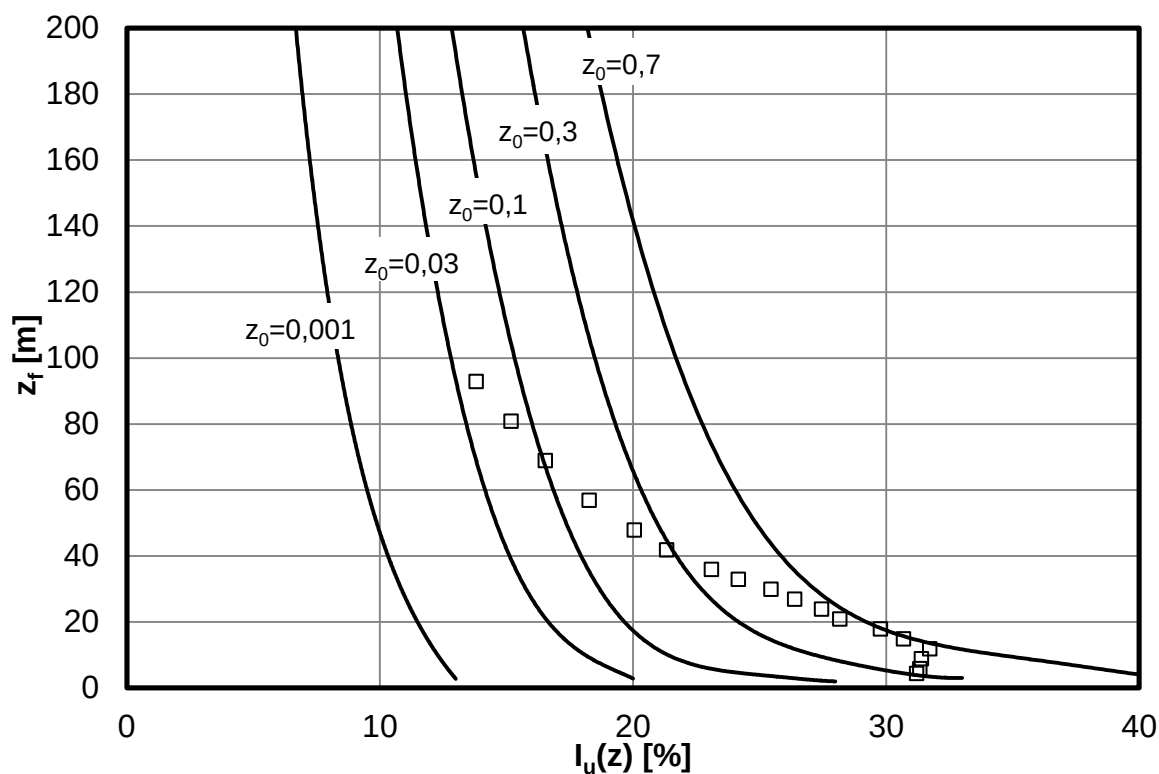
$\alpha=0,28$ mellett adódott a legjobb egyezés a mért profil és a hatványkitevős formula segítségével kapott profil között. Nagyvárosi környezetben α értéke jellemzően 0.28 és 0.4 közé esik [36], a kiadódott profilkitevő tehát megfelelő tartományban helyezkedett el. Jól látható, hogy a megnövelt mérési időtartam egyenletesebb profilt eredményezett.

A 3.8 ábrán az $I_u(z)$ turbulencia intenzitás profil láthatjuk.



3.8 ábra: Turbulencia intenzitás profil az u sebességkomponens irányában

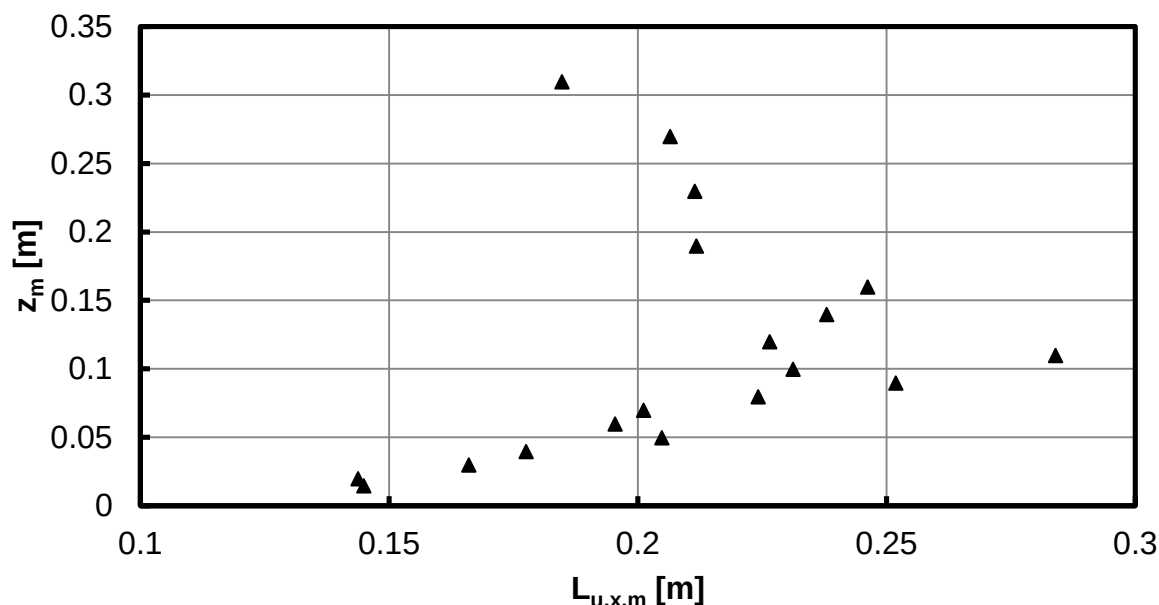
A modell léptékben lévő turbulencia intenzitás profilt valós léptékűre (eredeti méretre) átszámítva a profil közvetlenül összehasonlítható ESDU 85020 [37] adatokkal. A 3.9 ábrán az eredeti méretre átszámított $I_u(z)$ turbulencia intenzitás profilt láthatjuk ESDU 85020 [37] adatokkal összehasonlítva, 1:300-as modell léptéket feltételezve.



3.9 ábra: Eredeti méretre átszámított $I_u(z)$ turbulencia intenzitás profil ESDU 85020 [37] adatokkal összehasonlítva, 1:300-as modell léptéket feltételezve

ESDU 85020 [37] adatokkal összehasonlítva megállapítható, hogy a kapott turbulencia intenzitás profil nem megfelelő. Nagyvárosi környezetben z_0 értéke 0,5 [m] és 2 [m] közé esik [35]. Jól látható, hogy a kapott profil több pontja e tartományon kívül helyezkedett el.

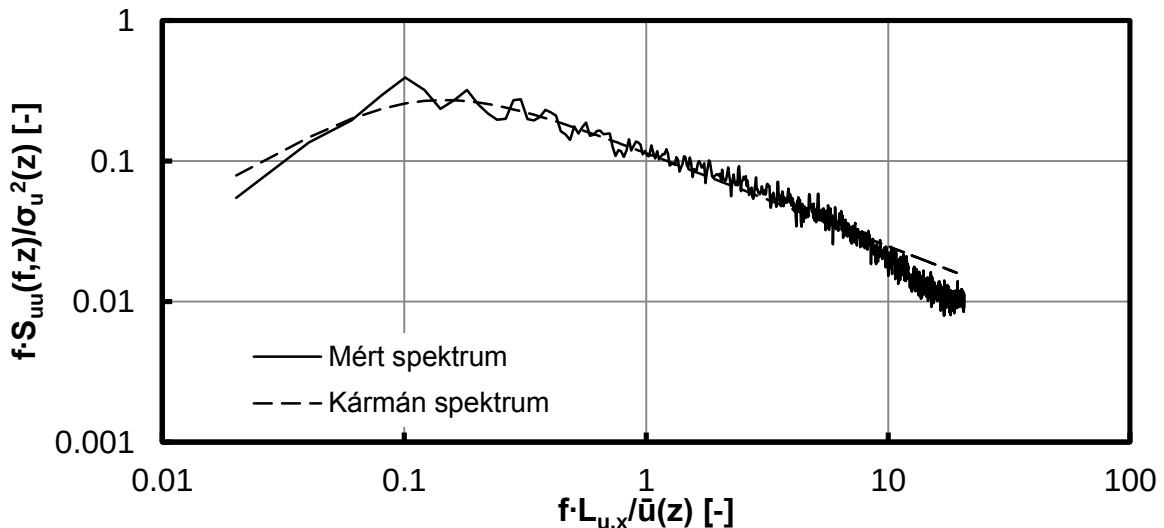
A 3.10 ábrán az $L_{u,x}$ integrál hosszlépték profilt láthatjuk modell léptékben.



3.10 ábra: $L_{u,x}$ integrál hosszlépték profil modell léptékben

1:300-as modell léptékben, $d_0=0$ [m] esetén, 0,0333 [m] magasságban az $L_{u,x}$ integrál hosszlépték értékének 0,15 [m] és 0,20 [m] közé, míg 0,1 [m] magasságban 0,33 [m] és 0,63 [m] közé kell esnie [36]. Látható, hogy ez feltétel 0,0333 [m] magasságban teljesült, nagyobb magasságokon az $L_{u,x}$ integrál hosszlépték értéke azonban nem a megfelelő tartományon belül helyezkedett el. A szakirodalom ajánlásaitól nagymértékű eltérés is tapasztalható volt.

A 3.11 ábrán a longitudinális sebesség-ingadozás teljesítmény sűrűség spektrumát láthatjuk $z=189,5$ [mm] magasságban. A mérés során kapott spektrumot a Kármán spektrummal hasonlítottam össze.



3.11 ábra: A longitudinális sebesség-ingadozás teljesítmény sűrűség spektruma $z=189,5$ [mm] magasságban

Nagyon jó egyezés figyelhető meg a mérés során kapott spektrum és a Kármán spektrum között.

Az első mérési sorozat eredményeiből a következő következtetéseket vontam le:

- Az LDA kiválóan alkalmazható mérések végzéséhez az Áramlástan Tanszék nagy vízszintes szélszatórnájában.
- A technika – mely alkalmazása esetén a mérőter alá helyezzük el az optikát – kiváló pontosságú mérés végrehajtását teszi lehetővé, a módszer praktikus alkalmazható az Áramlástan Tanszék nagy vízszintes szélszatórnájában.
- A létrehozott határréteg paraméterei többé-kevésbé megfelelőek, de az $I_u(z)$ turbulencia intenzitás profil, valamint lehetőség szerint az $L_{u,x}$ integrál hosszlépték profil javítása szükséges.

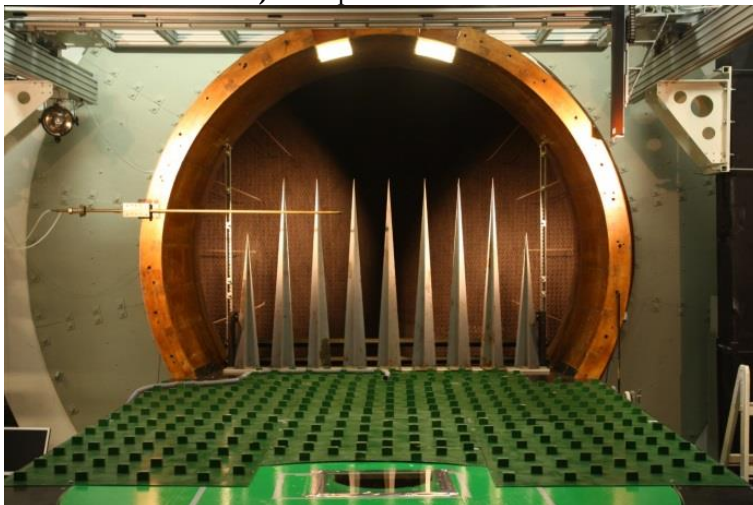
3.4 A turbulencia generátorok elrendezésének módosítása

A turbulencia intenzitás profil javítása céljából a turbulencia generátor elemek elrendezését változtattam meg. Az eredeti (6 db 1200 mm magas spike egymástól 360 mm távolságra) konfiguráción kívül három különböző elrendezést vizsgáltam meg:

- 7 db 1200 mm magas és 2 db 860 mm magas (összesen 9 db) spike elhelyezése egyenletesen, egymástól 220 mm távolságra
- 6 db 1200 mm magas és 2 db 860 mm magas (összesen 8 db) spike elhelyezése egyenletesen, egymástól 250 mm távolságra
- 7 db 1200 mm magas spike elhelyezése egyenletesen, egymástól 300 mm távolságra

A turbulencia generátor elemek módosított elrendezései láthatók a 3.12 ábrán.

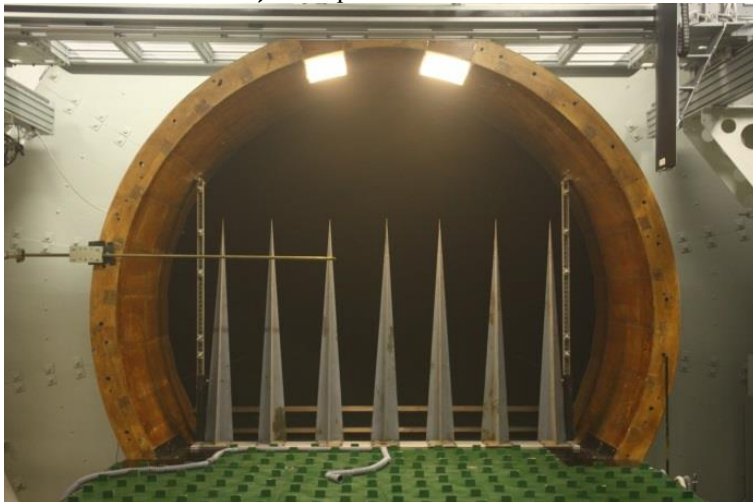
a) 9 db spike alkalmazása



b) 8 db spike alkalmazása

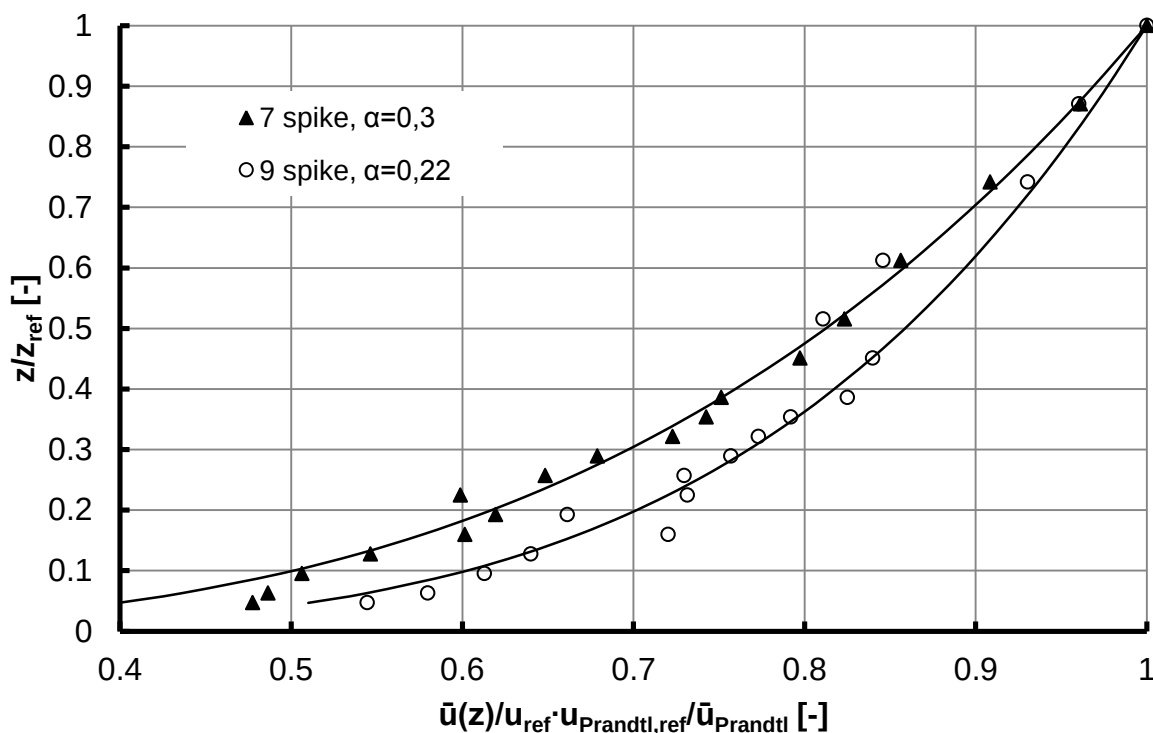


c) 7 db spike alkalmazása



3.12 ábra: A turbulencia generátor elemek módosított elrendezései; **a)** 9 db spike, **b)** 8 db spike, **c)** 7 db spike alkalmazása

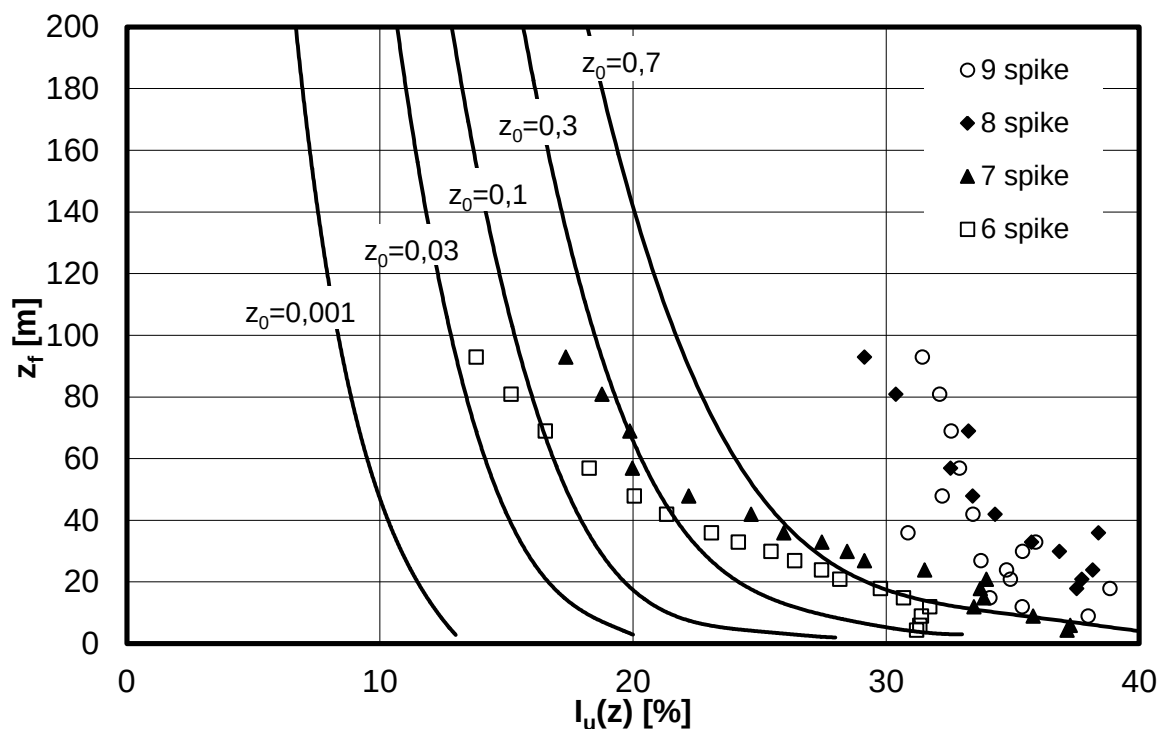
Mindegyik elrendezés alkalmazása esetén 18 pontból álló profilokat mértem az $x=0$ [mm], $y=-100$ [mm] pozícióban. A mérési időtartam minden egyes pontban 30 [s] volt. A koincidencia módot kikapcsoltam, hogy növeljem az adatgyűjtés frekvenciáját a spektrális vizsgálathoz. A 3.13 ábrán a főáramlás irányában vett dimenziótlan időátlagolt sebességprofil láthatjuk 7 illetve 9 spike alkalmazása esetén. Mindkét mért profilt összehasonlítottam a (3.9) összefüggésben szereplő hatványkitevős formulából adódó profillal.



3.13 ábra: Főáramlás irányában vett dimenziótlan időátlagolt sebességprofil 7 illetve 9 spike alkalmazása esetén

9 spike alkalmazása esetén $\alpha=0,22$ mellett adódott a legjobb egyezés a mért profil és a hatványkitevős formula segítségével kapott profil között. A kiadódott profilkitevő nem a megfelelő tartományban ($0,28 \leq \alpha \leq 0,4$) helyezkedett el. 7 spike alkalmazása esetén a profilkitevőre azonban kiváló ($\alpha=0,3$) érték adódott.

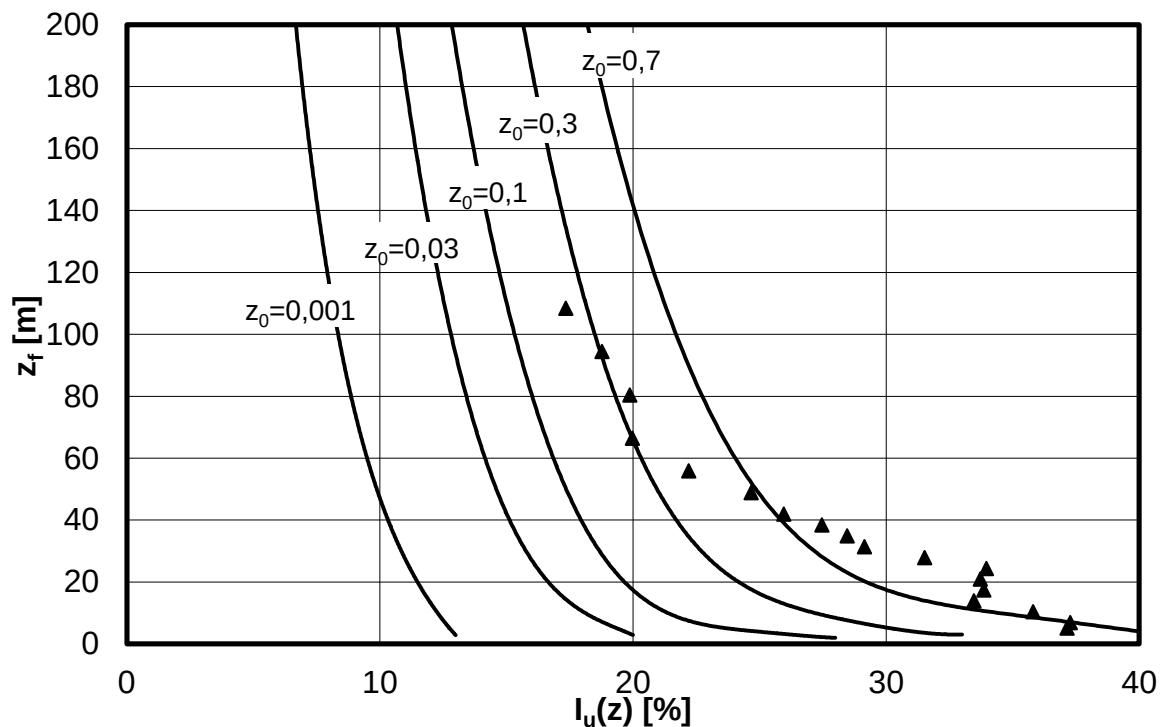
A 3.14 ábrán a turbulencia generátorok négy különböző elrendezése mellett kapott, eredeti méretre átszámított $I_u(z)$ turbulencia intenzitás profilokat láthatjuk ESDU 85020 [37] adatokkal összehasonlítva, 1:300-as modell léptéket feltételezve.



3.14 ábra: A turbulencia generátorok négy különböző elrendezése mellett kapott, eredeti méretre átszámított $I_u(z)$ turbulencia intenzitás profilok ESDU 85020 [37] adatokkal összehasonlítva, 1:300-as modell léptéket feltételezve

Jól látható, hogy a négy eset közül 7 spike alkalmazása esetén adódott a legjobb turbulencia intenzitás profil.

A 3.15 ábrán a 7 spike alkalmazása esetén kapott, eredeti méretre átszámított $I_u(z)$ turbulencia intenzitás profilt láthatjuk ESDU 85020 [37] adatokkal összehasonlítva, 1:350-es modell léptéket feltételezve.

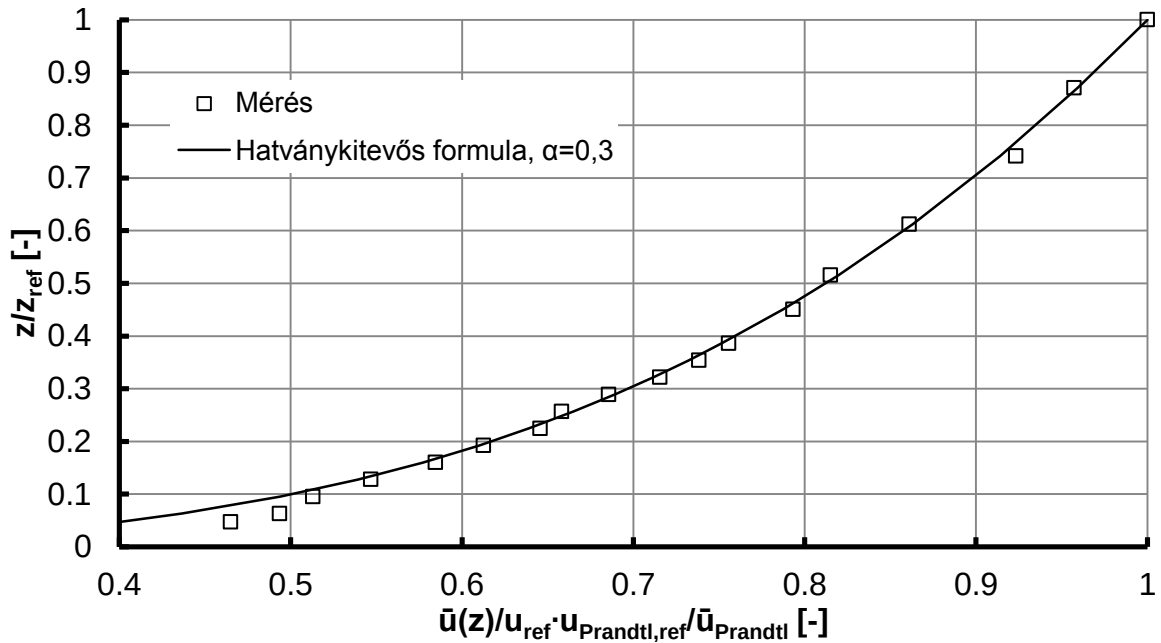


3.15 ábra: 7 spike alkalmazása esetén kapott, eredeti méretre átszámított $I_u(z)$ turbulencia intenzitás profil ESDU 85020 [37] adatokkal összehasonlítva, 1:350-es modell léptéket feltételezve

A modell léptéket 1:350-re változtatva a turbulencia intenzitás profil további (kismértékű) javulása volt megfigyelhető. A 7 spike alkalmazása mellett létrehozott határrétegben körülbelül 159,5 [mm] magasságig (körülbelül 55 [m] eredeti méretre átszámított magasságig) az $I_u(z)$ turbulencia intenzitás értéke kiváló. Ez a magasság az általam vizsgált városrész átlagos épületmagasságának közel kétszerese, ami bőven elegendő hiteles mérések kivitelezéséhez. A kapott eredmények alapján megállapítottam, hogy a létrehozott határréteg 7 spike alkalmazása esetén rendelkezett a legjobb jellemzőkkel a vizsgált tér modelljén történő mérések elvégzéséhez, így ezt az elrendezést tartottam meg.

A létrehozott határréteg jellemzőinek átfogó vizsgálatához egy hosszabb mérést végeztem. A mérési időtartamot egy pontban 300 másodpercre állítottam be, és 18 pontból álló profilokat mértem az $x=0$ [mm], $y=-100$ [mm] pozícióban. A koincidencia módot kikapcsoltam.

A 3.16 ábrán a mérés során kapott, főáramlás irányában vett dimenziótlan időátlagolt sebességprofil láthatjuk a (3.9) összefüggésben szereplő hatványkitevős formulából adódó profillal összehasonlítva.



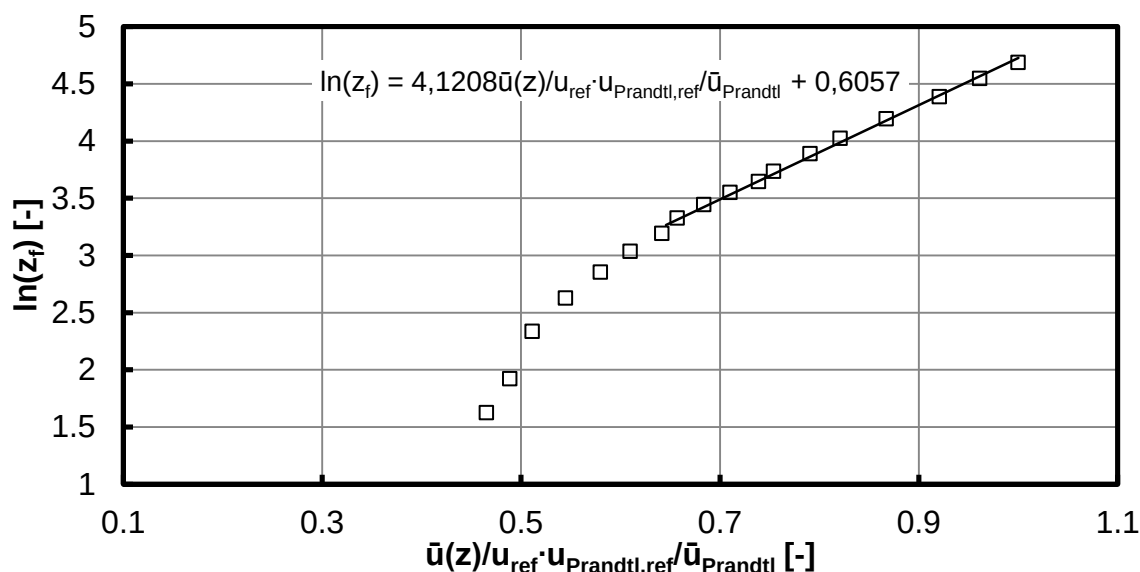
3.16 ábra: A turbulencia generátor elemek végleges elrendezése mellett mért, főáramlás irányában vett dimenziótlan időátlagolt sebességprofil a hatványkitevős formulából adódó profillal összehasonlítva

A modell léptékben lévő időátlagolt sebességprofilat valós léptékűre (eredeti méretre) átszámítva, és a z_f magasságok természetes alapú logaritmusát ábrázolva a függőleges tengelyen, a (3.10) összefüggésben (a logaritmikus faltörvényben) szereplő z_0 érték meghatározható. A (3.10) összefüggést átrendezve a (3.12) összefüggéshez juthatunk, amennyiben $d_0=0$ [m]:

$$\ln(z) = \frac{u(z) \cdot \kappa}{u_*} + \ln(z_0) \quad (3.12)$$

Ha az időátlagolt sebességprofilat az előbb említett módon ábrázoljuk, a talajtól számítva egy bizonyos pont fölött az ábrázolt profil lineáris jelleget mutat. A profil lineáris szakaszára egyenes illeszthető. A (3.12) összefüggés alapján belátható, hogy az illesztett egyenes egyenletében lévő konstans egyenlő $\ln(z_0)$ értékével. A 3.17 ábrán az eredeti

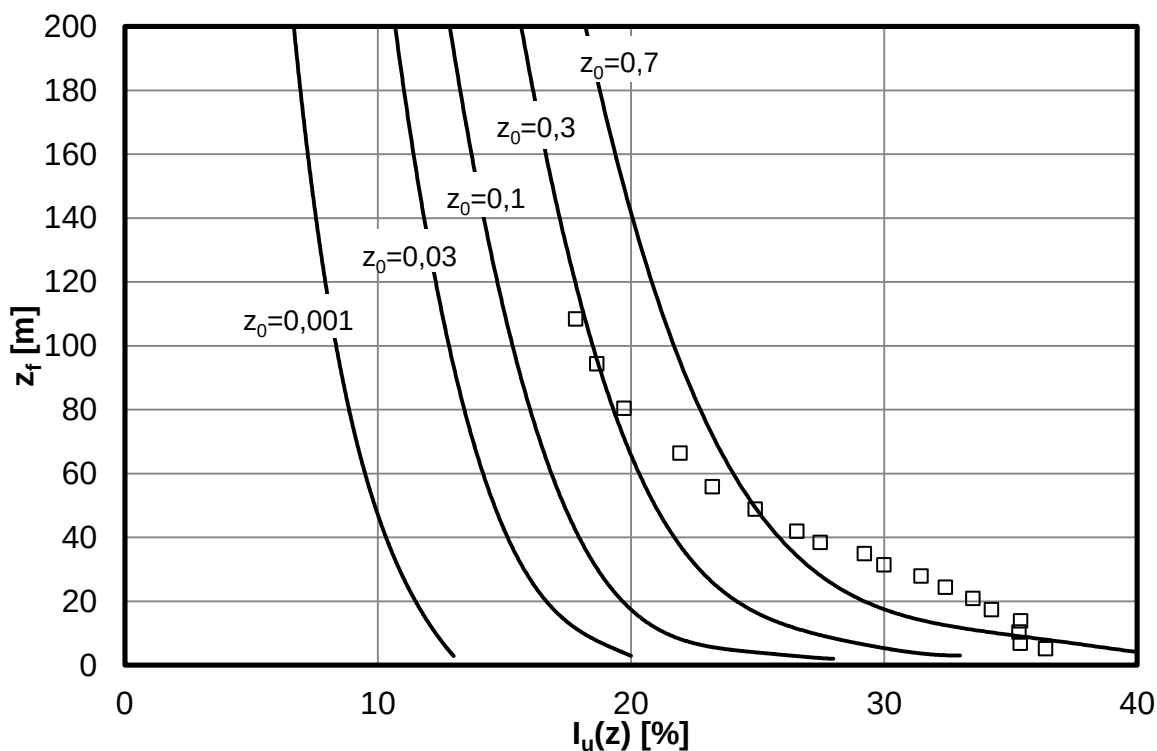
méretre átszámított dimenziótlan időátlagolt sebességprofilt láthatjuk, a függőleges tengelyen a z_f magasságok természetes alapú logaritmusát ábrázolva.



3.17 ábra: Eredeti méretre átszámított dimenziótlan időátlagolt sebességprofil, a függőleges tengelyen a z_f magasságok természetes alapú logaritmusát ábrázolva

Az illesztett egyenes egyenletéből z_0 értékére 1,83 [m] adódott. Nagyvárosi környezetben z_0 értéke 0,5 [m] és 2 [m] közé esik [35], a kiadódott érdesség magasság tehát megfelelő tartományban helyezkedett el.

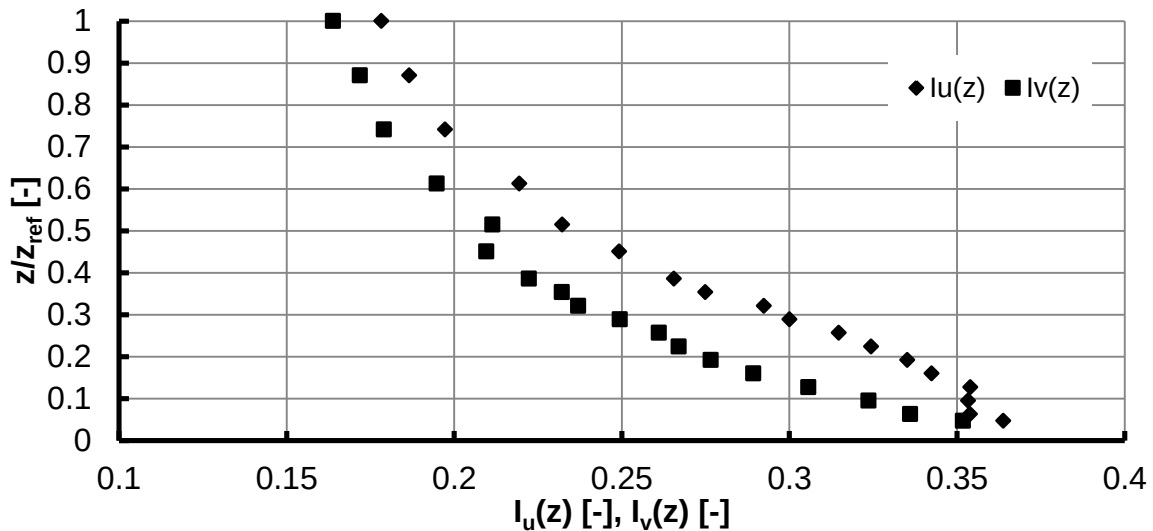
A 3.18 ábrán a turbulencia generátor elemek végleges elrendezése mellett mért, eredeti méretre átszámított $I_u(z)$ turbulencia intenzitás profilt láthatjuk ESDU 85020 [37] adatokkal összehasonlítva, 1:350-es modell léptéket feltételezve.



3.18 ábra: A turbulencia generátor elemek végleges elrendezése mellett mért, eredeti méretre átszámított $I_u(z)$ turbulencia intenzitás profil ESDU 85020 [37] adatokkal összehasonlítva, 1:350-es modell léptéket feltételezve

Jól látható, hogy a 7 spike alkalmazása mellett létrehozott határrétegben – a megnövelt mérési időtartam mellett végzett mérések alapján – körülbelül 189,5 [mm] magasságig (körülbelül 66 [m] eredeti méretre átszámított magasságig) az $I_u(z)$ turbulencia intenzitás értéke kiváló.

A 3.19 ábrán az $I_u(z)$ turbulencia intenzitás profilt láthatjuk az $I_v(z)$ profillal összehasonlítva.



3.19 ábra: $I_u(z)$ és $I_v(z)$ turbulencia intenzitás profilok

Az atmoszférikus határréteg talajhoz közeli rétegében a következő összefüggés érvényes [38]:

$$I_u : I_v : I_w = 1 : 0,75 : 0,5 \quad (3.13)$$

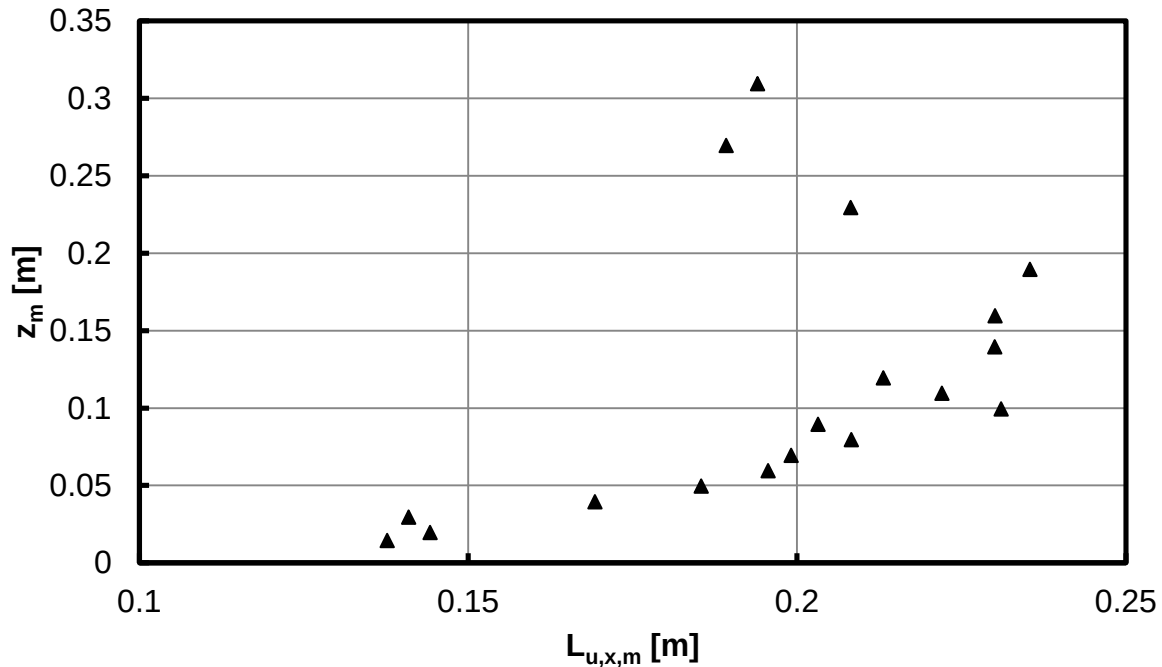
Más források 1:0,8:0,5-ös arányt említenek. A 3.1 táblázatban az egyes magasságokhoz tartozó I_u és I_v értékeket, valamint az $I_u : I_v$ arányokat láthatjuk.

3.1 táblázat: Az egyes magasságokhoz tartozó I_u és I_v értékek, valamint az $I_u : I_v$ arányok

z [mm]	I_u	I_v	$I_u : I_v$
309,5	0,1782	0,1638	1:0,9191
269,5	0,1865	0,1718	1:0,9210
229,5	0,1973	0,1790	1:0,9074
189,5	0,2194	0,1948	1:0,8877
159,5	0,2322	0,2114	1:0,9103
139,5	0,2492	0,2095	1:0,8408
119,5	0,2655	0,2223	1:0,8370
109,5	0,2748	0,2321	1:0,8444
99,5	0,2923	0,2370	1:0,8106
89,5	0,3000	0,2494	1:0,8312
79,5	0,3147	0,2610	1:0,8295
69,5	0,3243	0,2669	1:0,8229
59,5	0,3351	0,2765	1:0,8251
49,5	0,3424	0,2892	1:0,8447
39,5	0,3540	0,3056	1:0,8634
29,5	0,3533	0,3236	1:0,9158
19,5	0,3538	0,3361	1:0,9497
14,5	0,3638	0,3518	1:0,9668

Látható, hogy az $I_u : I_v$ arány körülbelül 1:0,81 és 1:0,97 között ingadozott. Ez nincs jó egyezésben a (3.13) összefüggéssel, de nagyságrendi eltérés nincsen a mérés során kiadódott arányok és a szakirodalom [38] javaslatai között, így az eredmények elfogadhatóak.

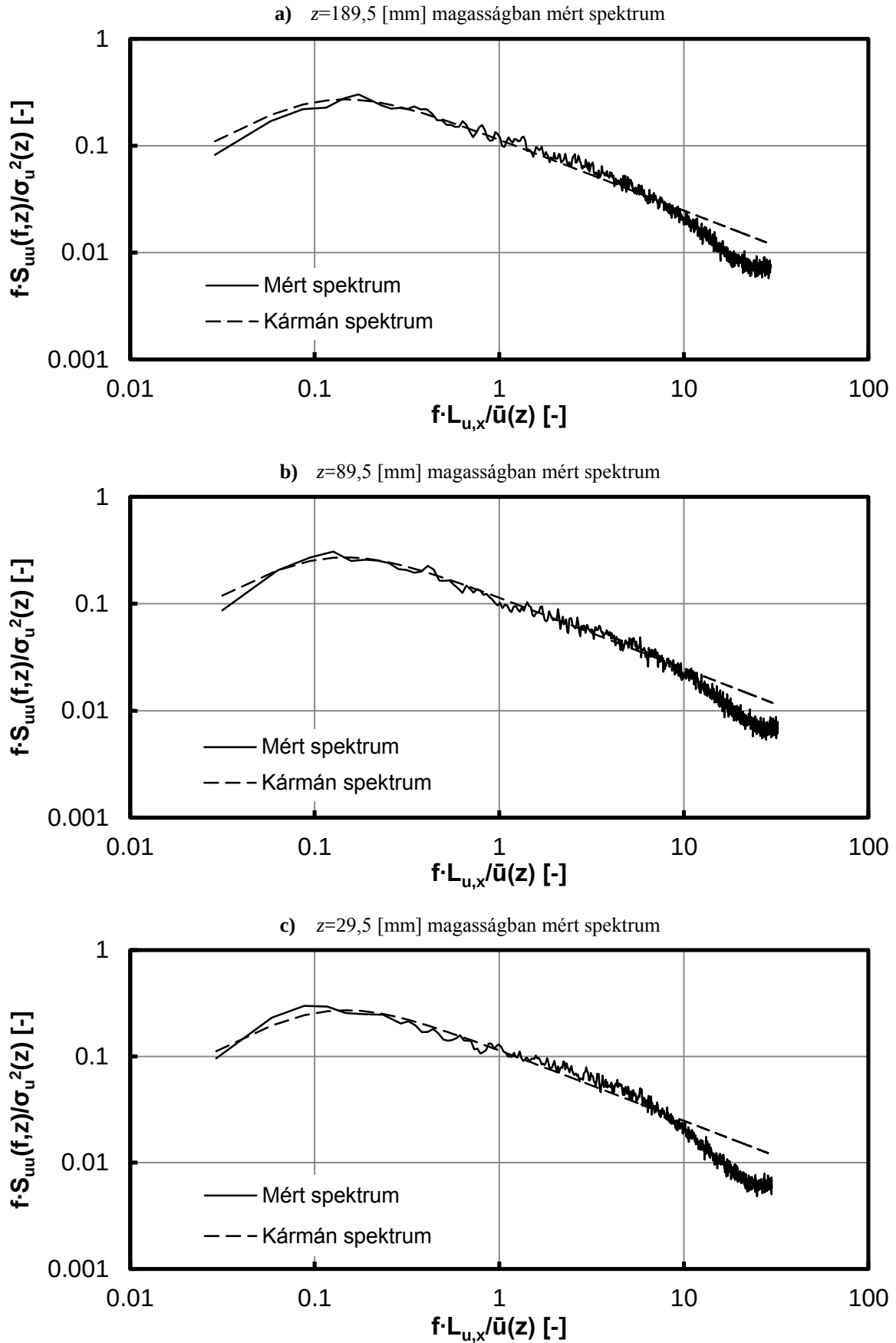
A 3.20 ábrán az $L_{u,x}$ integrál hosszlépték profil láthatjuk modell léptékben.



3.20 ábra: A turbulencia generátor elemek végleges elrendezése mellett mért $L_{u,x}$ integrál hosszlépték profil modell léptékben

1:350-es modell léptékben, $d_0=0$ [m] esetén, 0,0285 [m] magasságban az $L_{u,x}$ integrál hosszlépték értékének 0,13 [m] és 0,17 [m] közé, míg 0,0857 [m] magasságban 0,29 [m] és 0,54 [m] közé kell esnie [36]. Látható, hogy ez feltétel 0,0285 [m] magasságban teljesült, nagyobb magasságokon az $L_{u,x}$ integrál hosszlépték értéke azonban kisebb mintegy 30%-kal. A kapott eredmények ennek ellenére elfogadhatónak bizonyultak, mivel épületmagasságban és az alatt az egyezés jó.

A 3.21 ábrán a longitudinális sebességingadozás teljesítmény sűrűség spektrumát láthatjuk $z=189.5$ [mm], $z=89.5$ [mm] és $z=29.5$ [mm] magasságban. A mérés során kapott spektrumokat a Kármán spektrummal hasonlítottam össze.



3.21 ábra: A longitudinális sebesség-ingadozás teljesítmény sűrűség spektruma; a) $z=189,5$ [mm], b) $z=89,5$ [mm] és c) $z=29,5$ [mm] magasságban

Nagyon jó egyezés figyelhető meg a mérés során kapott spektrumok és a Kármán spektrum között, csupán a legmagasabb frekvenciákon tapasztalható némi eltérés, ahol a Heisenberg-féle viszkózus disszipációs tartomány hatása érvényesül.

3.5 A határréteg mérések értékelése

A határréteg mérések során alkalmazott mérési technika több szempontból is kiválóan minősíthető. Kiváló pontosságú mérési eredmények érhetők el, a módszer praktikusán alkalmazható az Áramlástan Tanszék nagy vízszintes szélcsatornájában. A turbulencia generátor elemek végső elrendezése esetén létrehozott határréteg jellemzői kifejezetten jónak mondhatóak, a határréteg alkalmas városi tér átszellőzésének szélcsatorna vizsgálatára.

4 MODELLKÉSZÍTÉS

A határréteg mérések eredményei alapján 1:350-es modell lépték alkalmazása mellett döntöttünk. A vizsgált városrész modellje egy 2 [m] átmérőjű rétegelt falemezből készült körlapra került. Ennek a körlapnak a közepén egy 800x800 [mm] méretű kivágás található, melyet egy 840x840x5 [mm] méretű üveglappal fedtünk le. Az üveglapot 5 [mm] mélyre süllyesztettük a rétegelt falemezbe, így az üveglap és a körlap felső felülete egy magasságba esett. Vizsgálataim elsősorban a József nádor tér átszellőzésére irányultak, ezért a tér nagyjából az üveglap közepén helyezkedett el. A tér közelében lévő valamennyi épület modellezésre került a körlap által meghatározott 700 [m] (modell léptékben 2 [m]) átmérőjű tartományon belül.

A József nádor tér és a körülötte elhelyezkedő városrész látható a 4.1 ábrán.



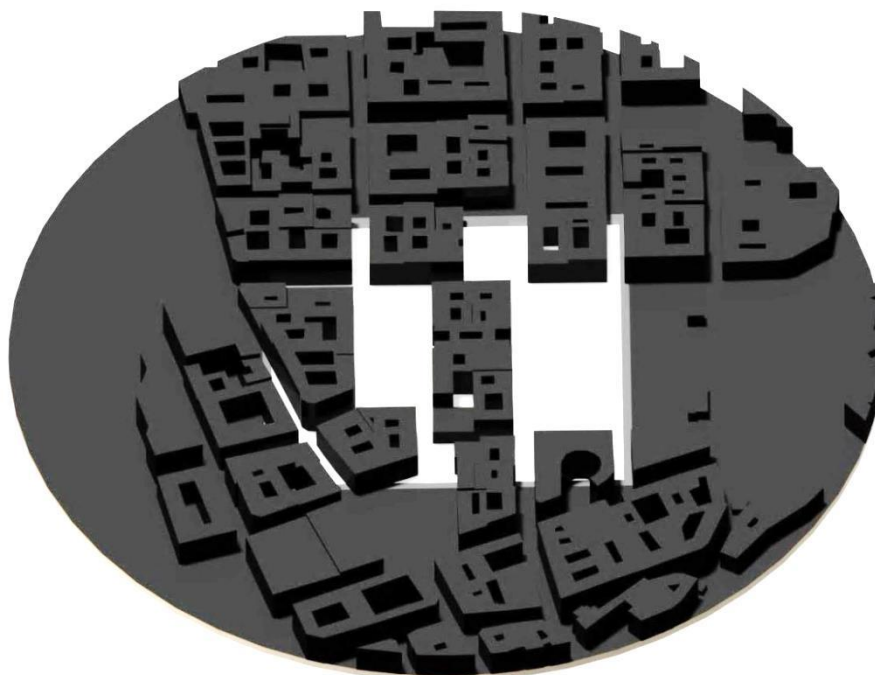
4.1 ábra: A József nádor tér és a körülötte elhelyezkedő városrész

A József nádor tér vizsgálatára irányuló korábbi kutatások során elkészült a tér és a körülötte lévő városrész nagypontosságú felülnézeti rajza. A rendelkezésre álló adatbázisban az épületmagasságokat is feltüntették. A 4.2 ábrán a József nádor tér és a körülötte lévő városrész felülnézeti rajza látható. A rajzon a körlap és az üveglap határoló vonalait is feltüntettem, így az is látható, hogy pontosan melyik épületek kerültek modellezésre.



4.2 ábra: A József nádor tér és a körülötte lévő városrész felülnézeti rajza

Mindegyik épületmodell egy poligon alapú hasáb. Az adatbázisban található eredeti épületmagasságokat egymástól 1,5 méterrel különböző osztályokba soroltam, és az épületmodellek magasságát is ennek a klasszifikálásnak megfelelően, a modell lépték segítségével határoztam meg. Az épületmodellek magasságának meghatározása után elkészítettem a vizsgált városrész 3D-s modelljét. Az elkészített 3D-s modell látható a 4.3 ábrán. A numerikus (MISKAM) szimulációval való összehasonlíthatóság érdekében a háztetőket nem modelleztem.



4.3 ábra: A vizsgált városrész 3D-s modellje

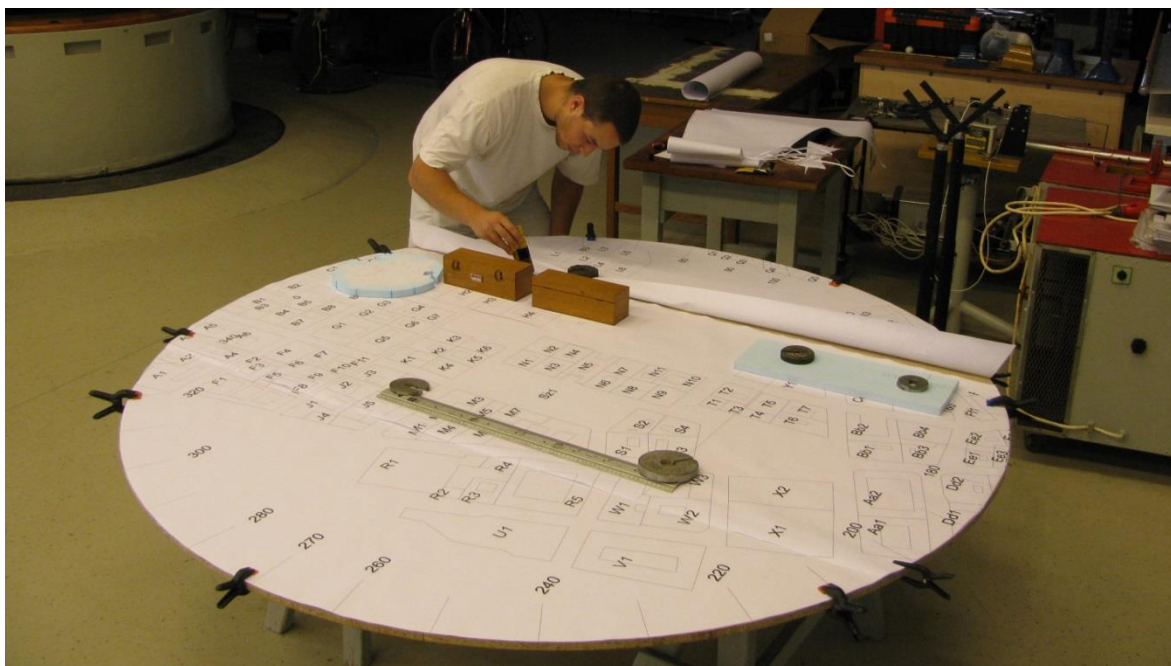
Az épületeket 100 [mm] magas XPS polisztirol hab anyagú táblákból vízszegélyes vágási technológia segítségével vágattuk ki. Az udvarok – melyek körvonalait a 4.1 ábrán a piros vonalak jelzik – szintén vízszegélyes vágással kerültek kivágásra. A vízszegélyes vágás után mindegyik épület 100 [mm] magasságú volt, ezeket az Áramlástan Tanszéken található forrószélcsatorna segítségével megfelelő méretűre vágattuk.

A végleges méretűre vágott épületeket épülettömböként 6 [mm] magasságú rétegelt falemezekre ragasztottam. A rétegelt falemezeket szintén vízszegélyes vágási technológia segítségével vágattuk megfelelő alakúra, a falemezek magasságát a tervezés során figyelembe vettem. Egy adott épületmodell magassága a hab és a falemez magasságának összegeként adódott. Az összeragasztott épülettömböket facsavarok segítségével rögzítettem a körlapra, az üveglapon elhelyezkedő tömböket pedig ragasztással rögzítettem az üveglapra. A 4.4 ábrán az összeragasztott épülettömböket láthatjuk.



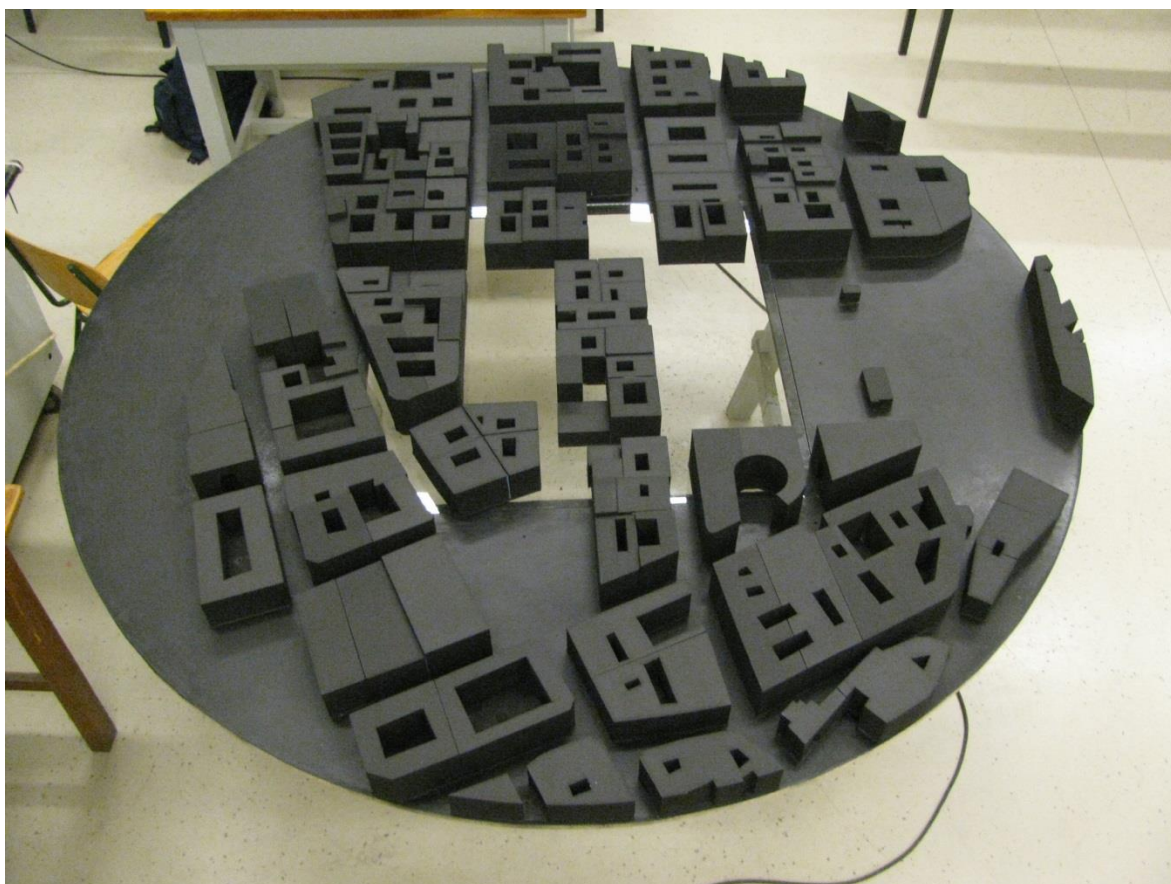
4.4 ábra: Az összeragasztott épülettömbök

Az épülettömbök körlapon történő pontos elhelyezéséhez kinyomtattam a vizsgált városrész modell léptékben lévő felülnézeti rajzát, a rajzot pontosan ráigazítottam a körlapra, és egy szikével átjelöltem az épületek körvonalait. A körlapra illesztett, nyomtatott felülnézeti rajz látható a 4.5 ábrán.



4.5 ábra: A körlapra illesztett, nyomtatott felülnézeti rajz

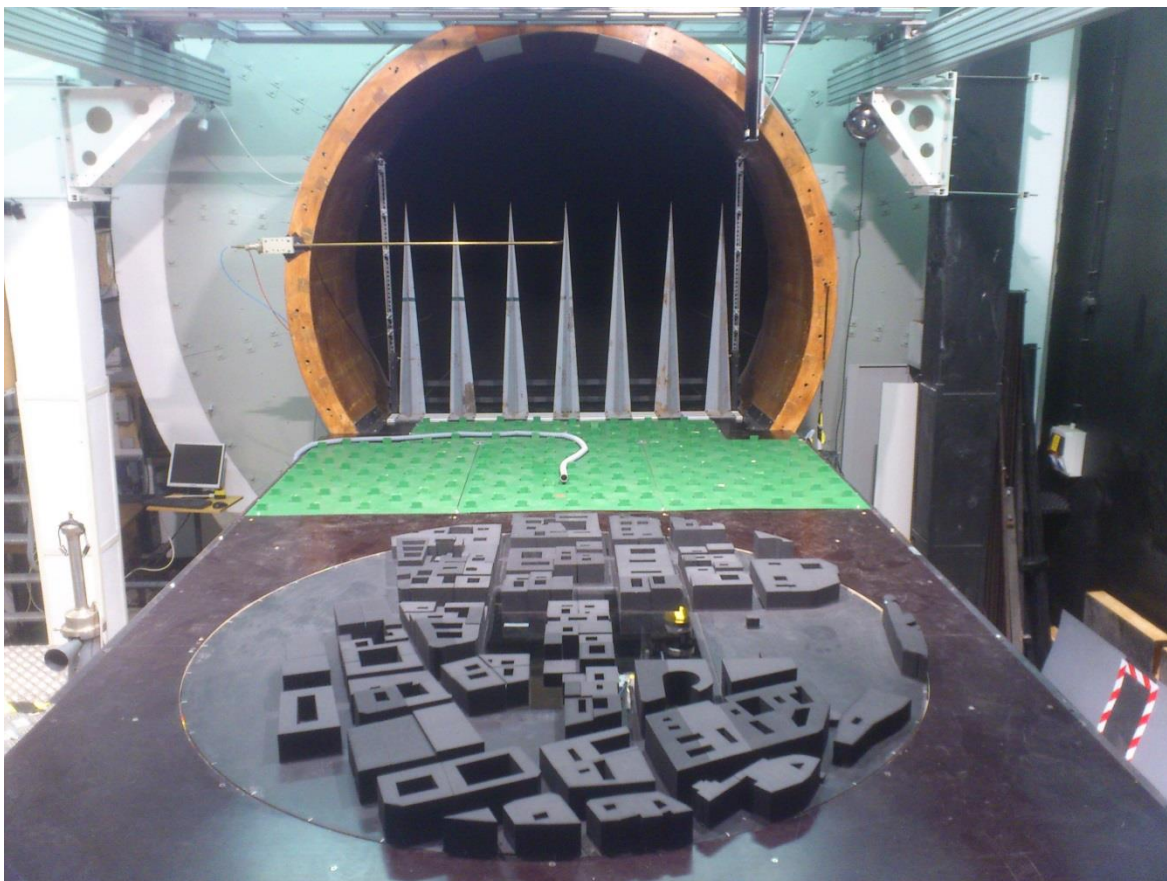
A körlapot és az épülettömböket egyaránt matt fekete színűre festettem le a reflexió minimalizálásának céljából. A jövőben a modellen homokeróziós méréseket is végre fogunk hajtani, a homokeróziós méréseknél pedig szintén praktikus, ha a modell matt fekete színű. A festés után az épülettömböket felrögzítettem a körlapra és az üveglapra, ezzel elkészült a modell. A 4.6 ábrán az elkészült modell látható.



4.6 ábra: A vizsgált városrész modellje

5 MÉRÉSEK A JÓZSEF NÁDOR TÉR SZÉLCSATORNA MODELLJÉN

Az elkészült modellt a szélcsatornába helyeztük. A körlap forgatásával a modellt olyan szöghelyzetbe állítottam, amely esetén a térre előzőleg felvett koordináta-rendszer tengelyei a pozícionáló szerkezet tengelyeivel párhuzamosak voltak. A szélcsatornába elhelyezett modell látható az 5.1 ábrán.



5.1 ábra: A szélcsatornába elhelyezett modell

A József nádor tér szélcsatorna modelljén egy szélirány mellett végeztem méréseket. Ez a szélirány a környéken leggyakrabban előforduló szélirányok egyike, az északi szélirány volt. Vizsgálataim során időátlagolt sebességprofilokat és szórásprofilokat határoztam meg a tér különböző pontjain, valamint különböző magasságokban lévő síkokon az időátlagolt sebesség és a turbulens kinetikus energia eloszlását vizsgáltam.

A referenciamagasság (z_{ref}) a profilmérések és a vízszintes síkok vizsgálata során egyaránt az átlagos épületmagasság értéke volt. Az átlagos épületmagasság modell léptékben $h=80$ [mm], eredeti méretre átszámítva $H=28$ [m]. A dimenziótlanításhoz azt a főáramlás irányában vett időátlagolt sebességértéket használtam, amelyiket a határréteg mérések során, a turbulencia generátor elemek végleges elrendezése mellett h magasságban mértem. A József nádor tér modelljén végzett mérések során kapott eredményeket is korrigáltam. A korrigált, dimenziótlan sebességeket az (5.1) és az (5.2) összefüggés segítségével számoltam ki.

$$u_d = \frac{u}{u_{href}} \cdot \frac{u_{p,ref}}{u_p} \quad (5.1)$$

$$v_d = \frac{v}{u_{href}} \cdot \frac{u_{p,ref}}{u_p} \quad (5.2)$$

Ahol u_d illetve v_d rendre az u illetve v komponens irányában vett dimenziótlán és korrigált átlagsebesség, u illetve v az adott pontban LDA-val mért, u illetve v irányában vett átlagsebesség, u_{href} a h magasságban mért referencia sebesség, $u_{p,ref}$ a Prandtl-csővel mért referencia sebesség, u_p pedig az adott pont mérése során Prandtl-csővel mért átlagsebesség. A József nádor tér modelljén végzett mérések során minden mérési pontban kapott sebesség dimenziótlán és korrigált értékének kiszámításához ugyanazt az $u_{href}=3.02$ [m/s] és $u_{p,ref}=12.02$ [m/s] értéket használtam, ilyen formában a kapott eredmények összehasonlíthatóak. Vizsgálataim során egy mérési pontban általában 60 másodpercig mértem, kiváló adatrátá esetén a mérési időt egy pontban 50 másodpercre csökkentettem.

5.1 Profilmérések a József nádor tér szélcsatorna modelljén

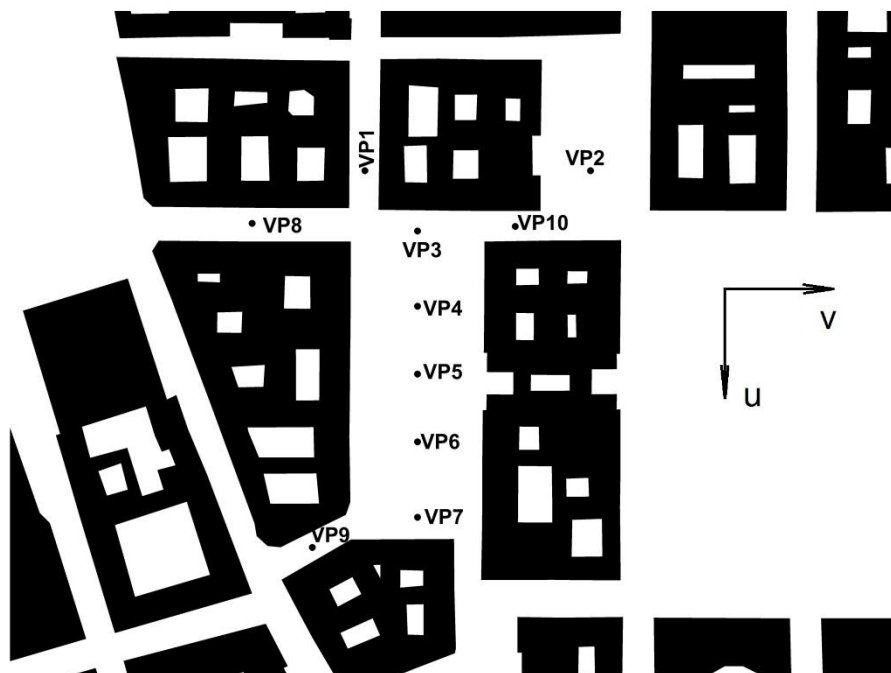
A térre előzőleg felvett koordinátarendszer x tengelye az u sebességkomponenssel, y tengelye a v sebességkomponenssel volt párhuzamos és egyirányú, a koordinátarendszer origója az $x_0=569,5$ [mm], $y_0=142$ [mm], $z_0=309,5$ [mm] traversz-koordinátáknak megfelelő pontban helyezkedett el. A mérési pontok koordinátáit mindig a térre felvett koordinátarendszerben adtam meg.

A téren és a tér környékén összesen tíz különböző helyen mértem profilokat. A profilok legfelső pontja – a VP9 és a VP10 profil kivételével – $z=304$ [mm] magasságban helyezkedett el, ami a valóságban 106,4 [m], az épületek magasságának 3,8-szorosa. A VP9 profil esetében $z=232$ [mm] magasságban, míg a VP10 profil esetében $z=256$ [mm] magasságban volt a profil legfelső pontja. Az 5.1 táblázatban a profilok pontos elhelyezkedését láthatjuk, valamint a táblázatban az is megtalálható, hogy az egyes profilok hány pontból álltak.

5.1 táblázat: A mért profilok pontos elhelyezkedése és a profilokat alkotó pontok száma

Profil	x koordináta [mm]	y koordináta [mm]	Pontok száma
VP1	0	-110	26
VP2	-300	-110	26
VP3	-70	-30	26
VP4	-70	70	26
VP5	-70	160	26
VP6	-70	250	26
VP7	-70	350	26
VP8	150	-40	26
VP9	70	390	24
VP10	-200	-36	25

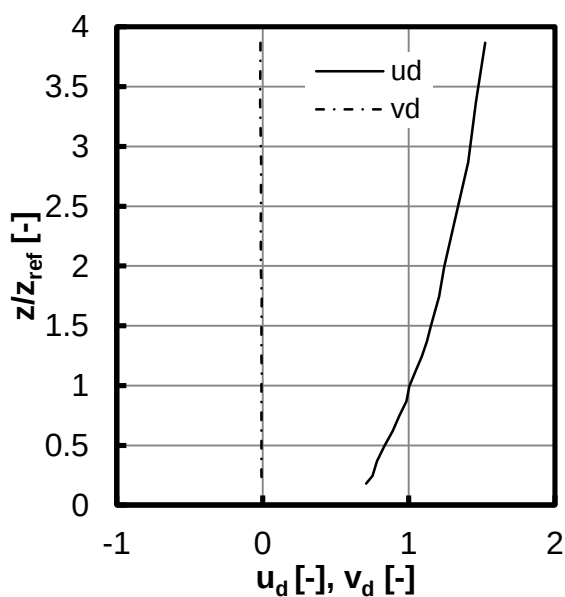
Az 5.2 ábrán a profilok elhelyezkedését láthatjuk felülnézetből.

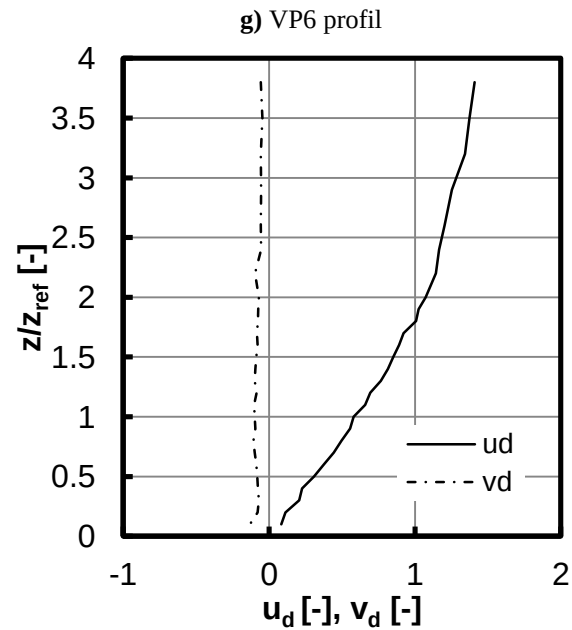
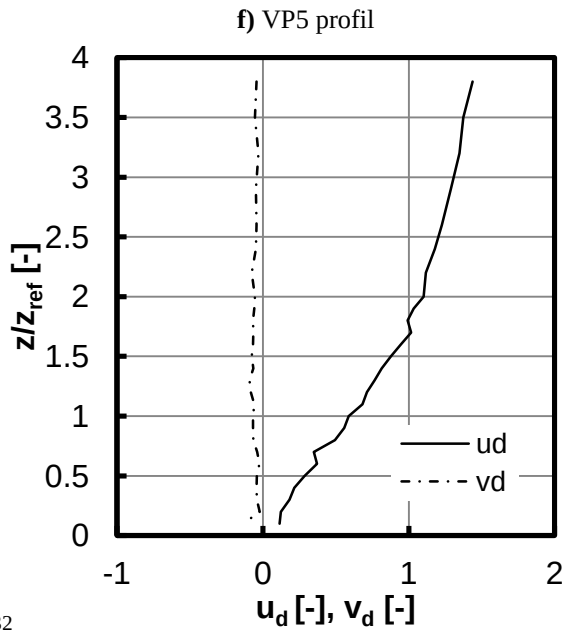
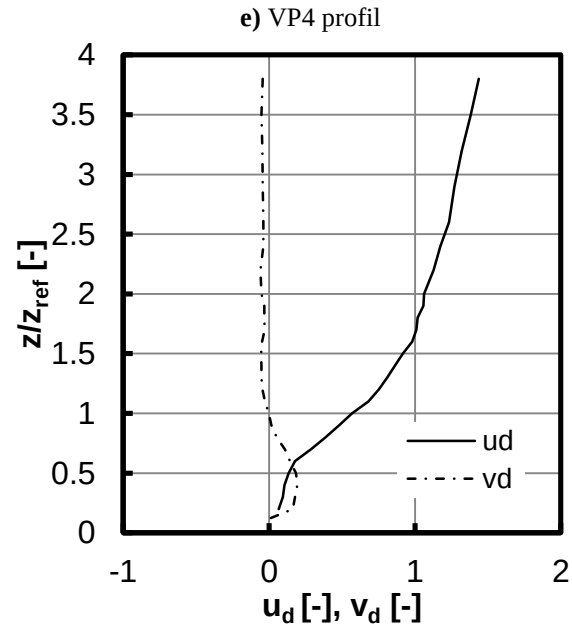
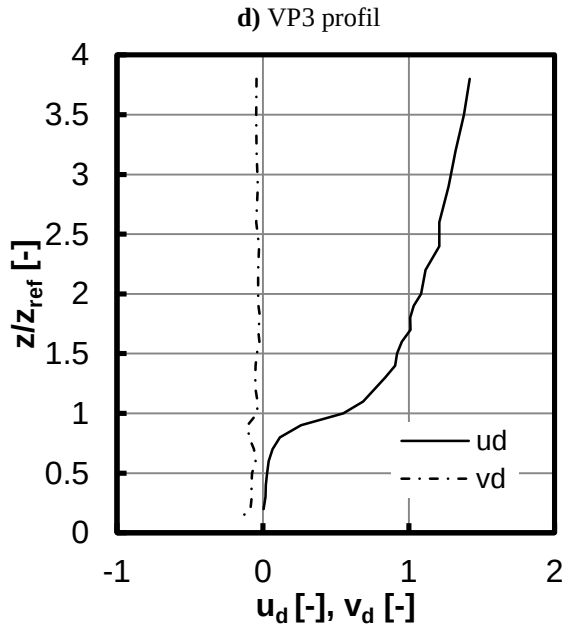
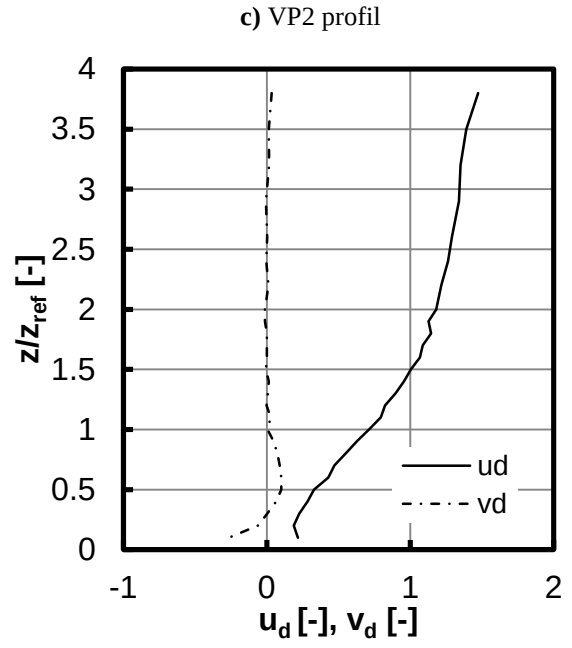
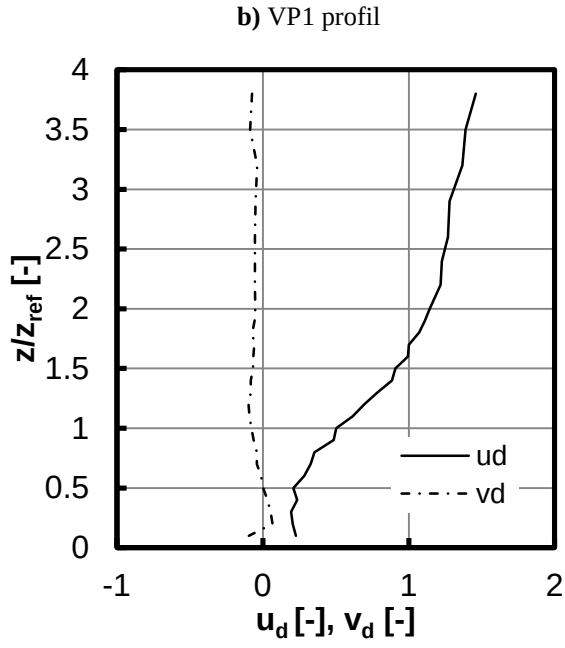


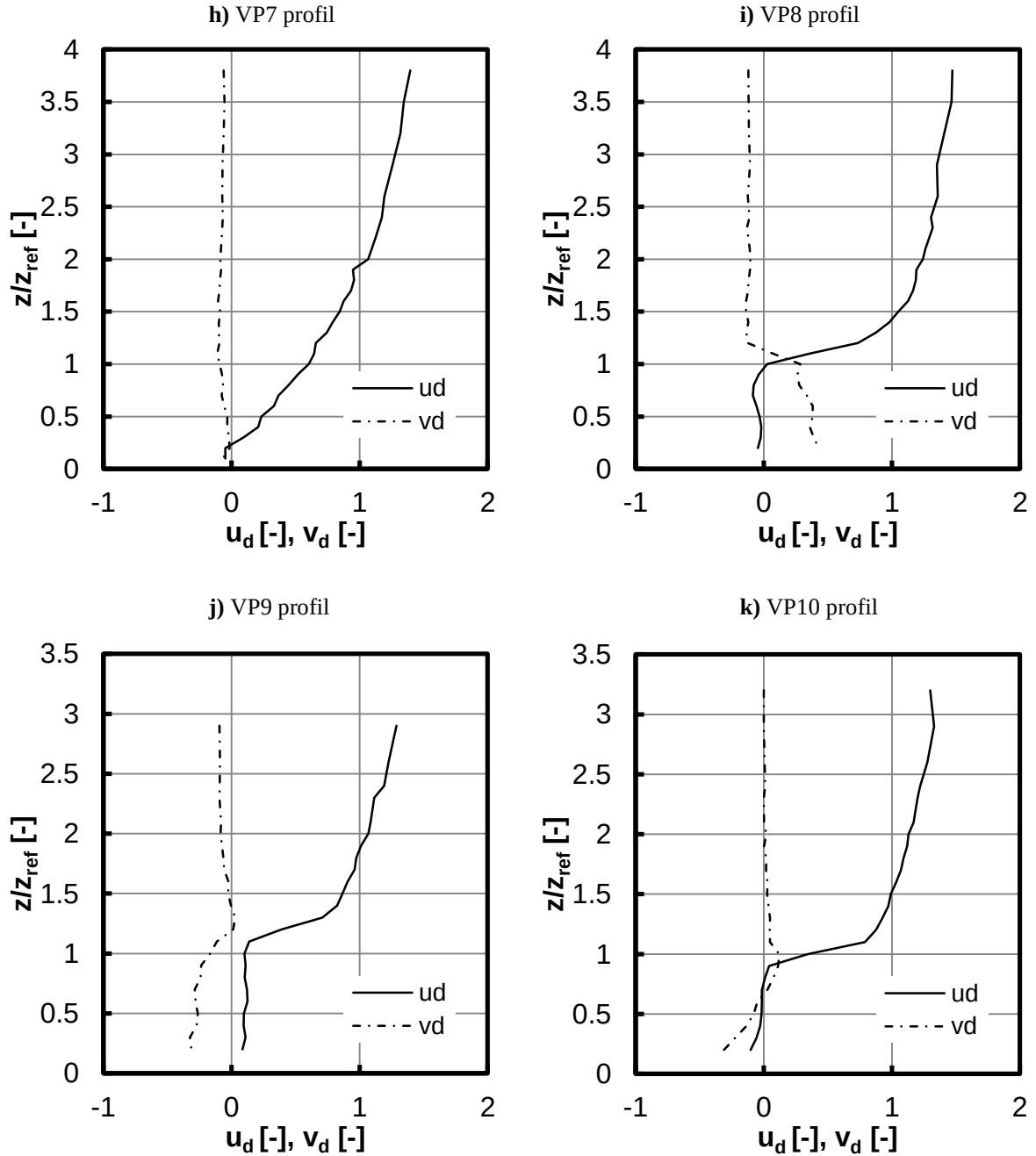
5.2 ábra: A profilok elhelyezkedése felülnézetből

Az 5.3 ábrán a különböző helyeken mért, u illetve v komponens irányában vett dimenziótlan időátlagolt sebességprofilokat láthatjuk. Az 5.3 ábrán összehasonlításképpen közlöm a határréteg mérések során, a turbulencia generátor elemek végleges elrendezése mellett mért profilt is, melyet VP0-nak neveztem el.

a) VP0 profil







5.3 ábra: Különböző helyeken mért, u illetve v komponens irányában vett dimenziótlant időátlagolt sebességprofilok; **a)** VP0 profil, **b)** VP1 profil, **c)** VP2 profil, **d)** VP3 profil, **e)** VP4 profil, **f)** VP5 profil, **g)** VP6 profil, **h)** VP7 profil, **i)** VP8 profil, **j)** VP9 profil, **k)** VP10 profil

Az 5.3 ábrán lévő profilokat szemügyre véve megállapíthatjuk, hogy az u komponens irányában a VP1, VP2, VP4, VP5, VP6 és VP7 profilok esetében az időátlagolt sebességprofil viszonylag egyenletes, míg a VP3, VP8, VP9 és a VP10 profiloknál az átlagos épületmagasság környékén egy jelentős törés figyelhető meg. Ez a jelenség egyértelműen azért tapasztalható, mert a VP8, VP9 és VP10 profilok a főáramlás irányára merőleges vagy majdnem merőleges utcakanyonokban helyezkednek el, a VP3 profil pedig a főáramlás irányában közvetlenül egy épület után helyezkedik el. A főáramlás irányára merőleges utcakanyonokban és az épületek nyomában a főáramlás irányában vett sebesség lényegesen kisebb. A VP8 profil esetében az átlagos épületmagasság alatt, a VP10 profil esetében körülbelül $h/2$ magasság alatt kismértékű visszaáramlás is megfigyelhető. A profilok legmagasabbban lévő pontjában az u komponens irányában vett időátlagolt

sebesség értéke közel egyenlő mindegyik profil esetében. Ilyen magasságban (közel 4h magasságban) az épületek hatása már nem számottevő.

A v komponens irányában, zavartalan esetben az időátlagolt sebesség nulla. Nagyobb magasságokban a VP2 és VP10 profilok esetében a v komponens irányában vett időátlagolt sebesség nulla, a többi profil esetében azonban nagyobb magasságokban is megfigyelhető nullától való kismértékű eltérés, jellemzően negatív irányban. Ez azt jelenti, hogy v irányban az épületek áramlást módosító hatása nagyobb magasságokban is érvényesül, így az u és v sebességkomponensek összegeként adódó sebességvektor a város fölött bizonyos helyeken nullánál nagyobb szöget zár be a zavartalan belépő sebességgel.

A VP5, VP6 és VP7 profilok kivételével körülbelül 1h-1,2h magasság alatt a v komponens irányában vett időátlagolt sebesség értéke jelentősebb mértékben eltér nullától, itt ugyanis az épületek hatása felerősödik.

A VP1, VP8, VP9, VP10 profilok utcakanyonokban helyezkednek el, ezek közül VP 8 és VP10 a főáramlás irányára merőlegesen. Ezeket szemlélve a következő megállapításokat tehetjük:

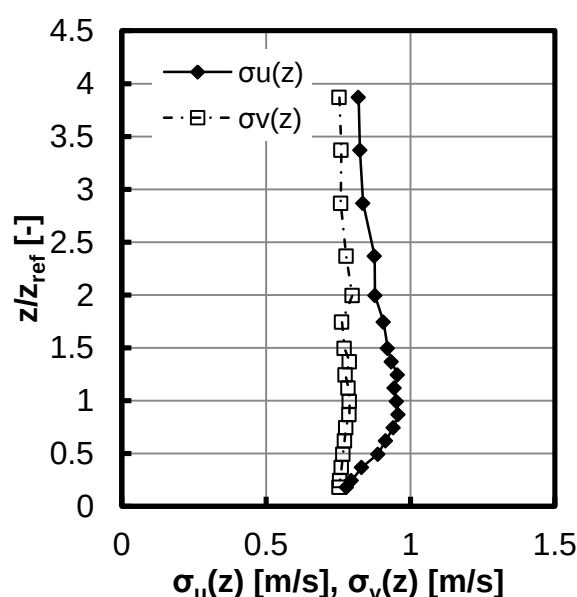
- Áramlással párhuzamos utcában sem jelentős a szélesebbség, a referencia mindössze 20 %-a.
- Áramlásra merőleges utcákon utcatengely irányú áramlás jön létre, tiszta utcakanyon örvény (hosszirányú sebesség nélkül) nem figyelhető meg.

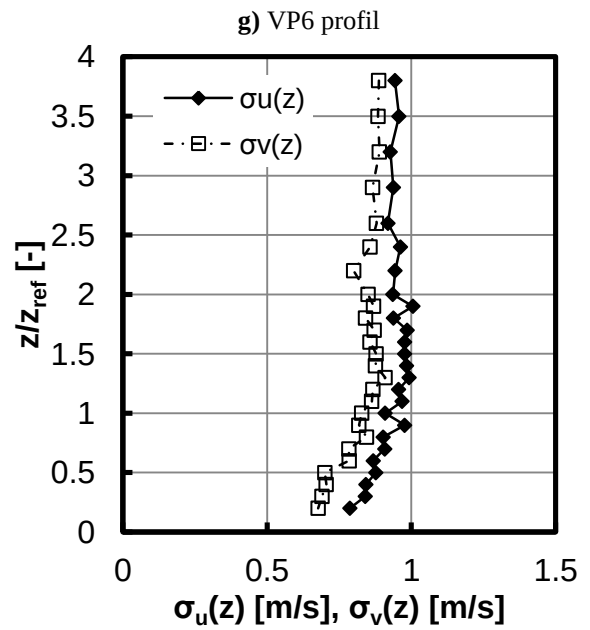
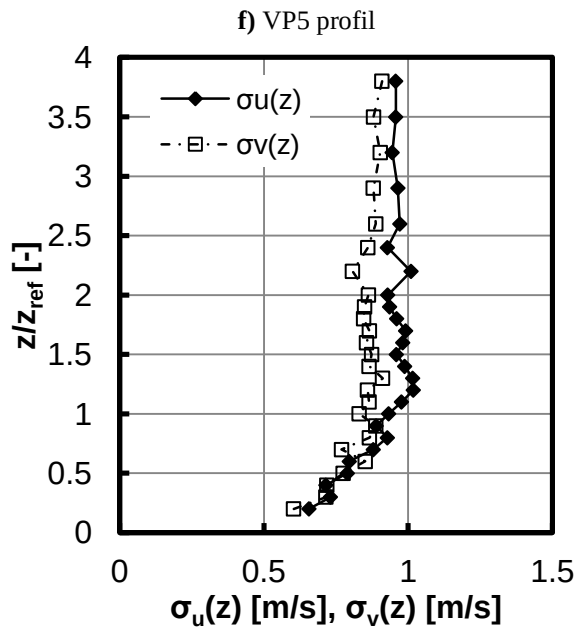
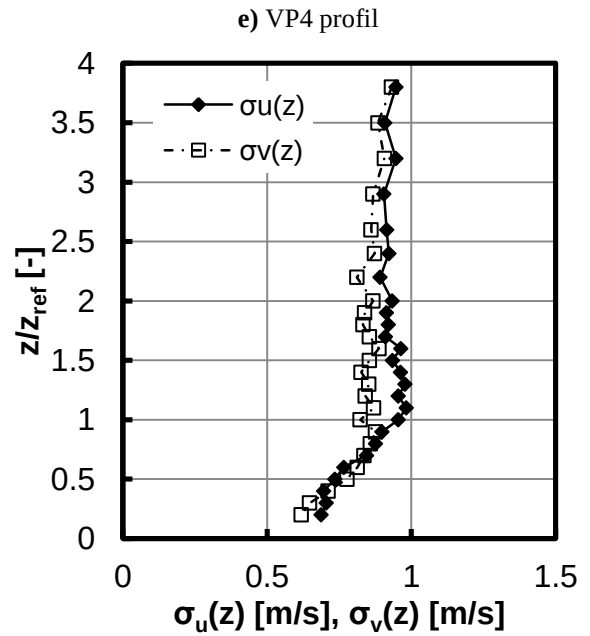
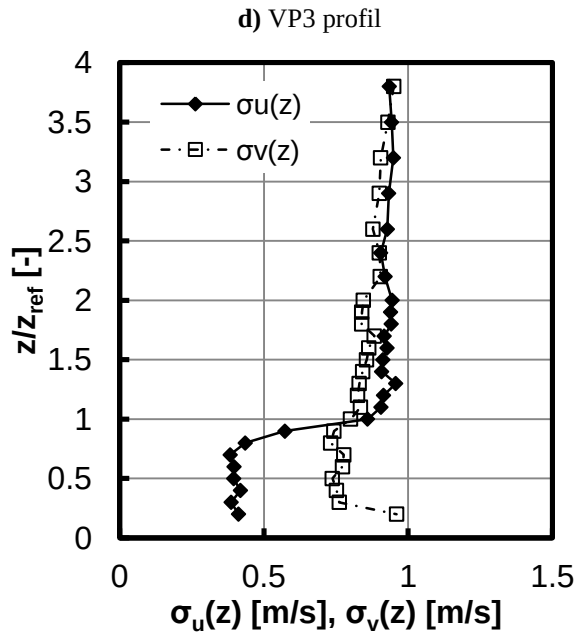
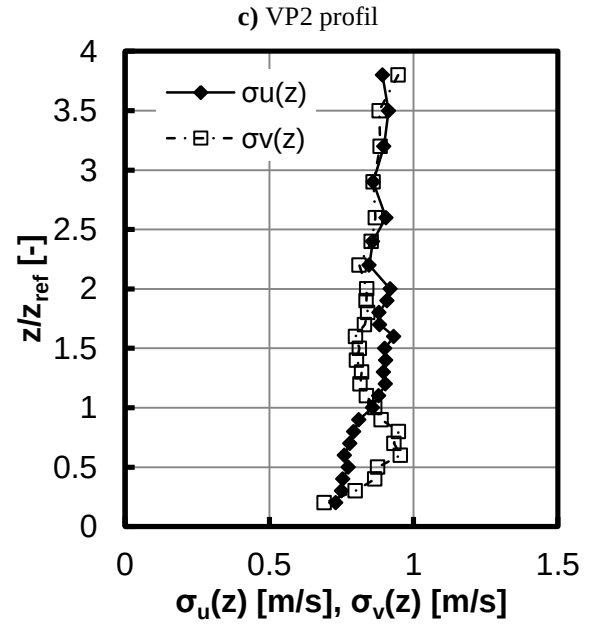
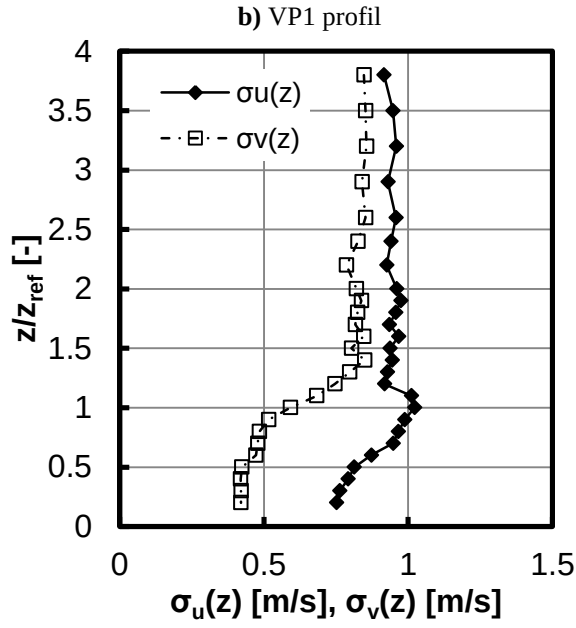
A téren elhelyezkedő profilok (VP3-7) alakulásán szépen megfigyelhető:

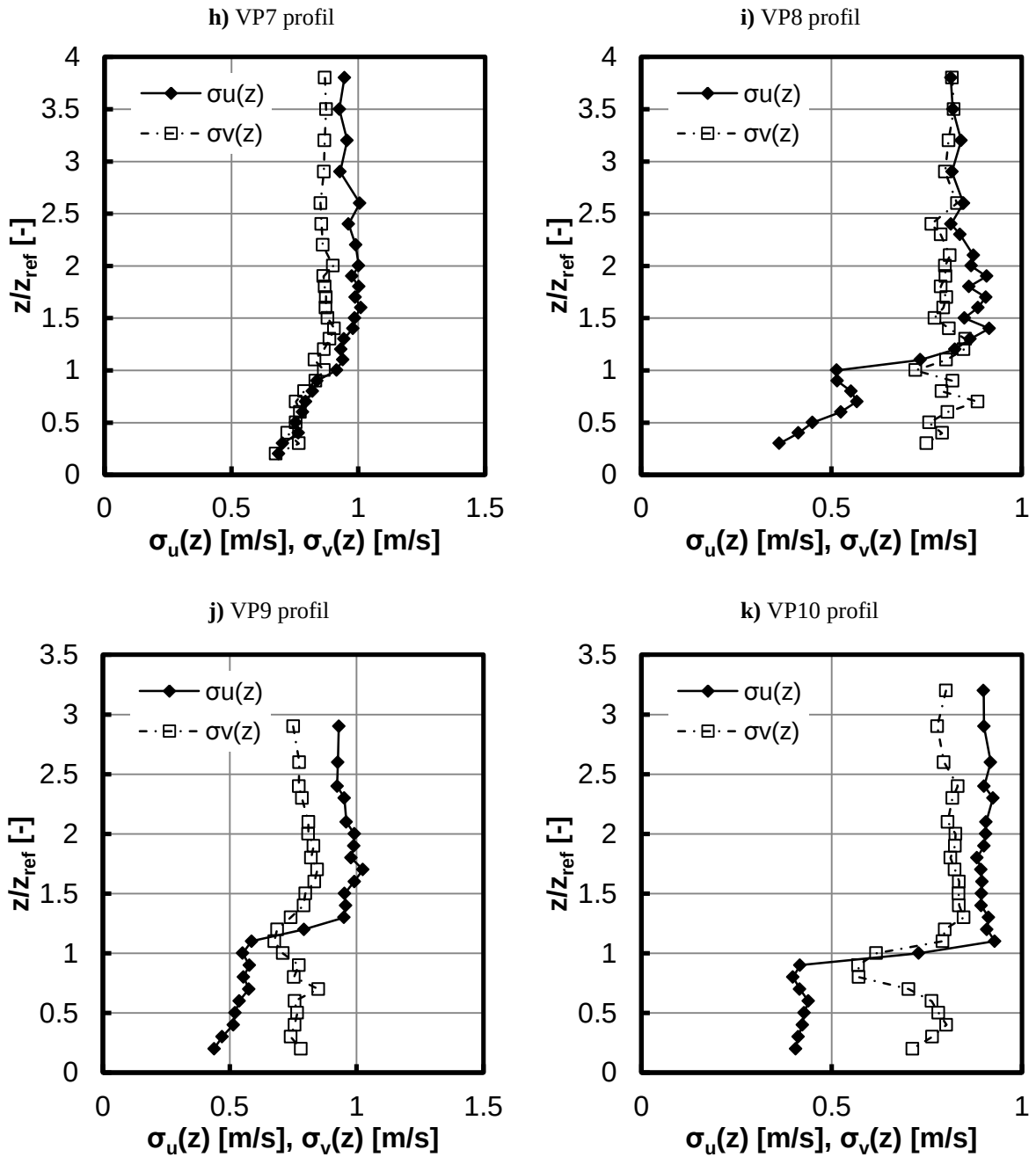
- Az északi épülettömb mögött kialakuló leválási buborék, amely a tér közepére eléri a felszínt.
- A határréteg a tér közepe – körülbelül 2-3 h távolság – után (VP6-7) benyomul, besüllyed a térre és telibe találja a déli épülettömböt.
- A v sebességkomponensek értéke az épületek magassága alatt eltérhet nullától (VP4), jelentősebb keresztirányú áramlást jelezve.

Az 5.4 ábrán a különböző helyeken mért $\sigma_u(z)$ és $\sigma_v(z)$ szórásprofilokat láthatjuk. Az 5.4 ábrán összehasonlítóképpen közlöm a határréteg mérések során, a turbulencia generátor elemek végleges elrendezése mellett mért profilt (VP0) is.

a) VP0 profil





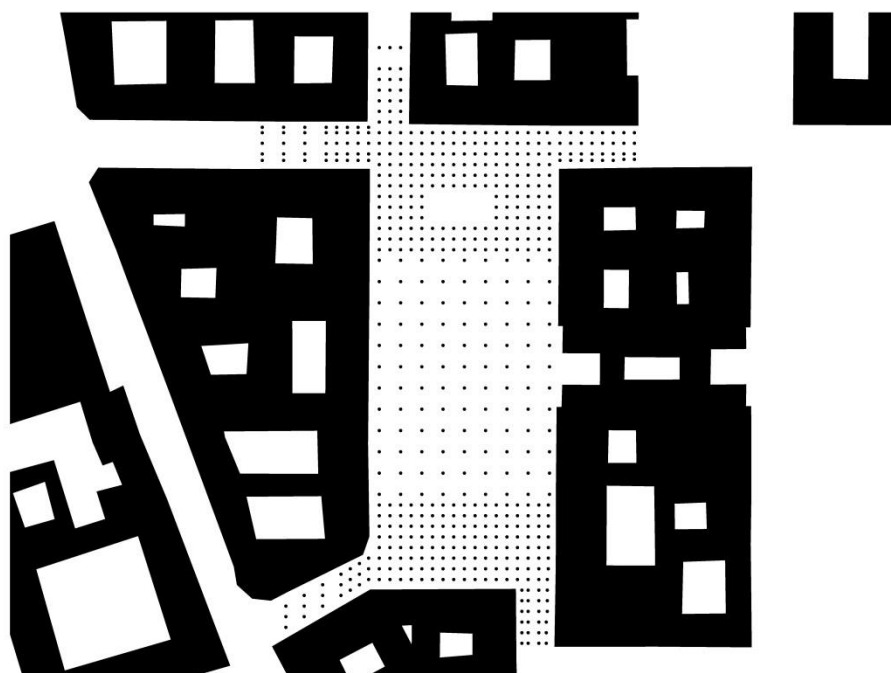


5.4 ábra: Különböző helyeken mért $\sigma_u(z)$ és $\sigma_v(z)$ szórásprofilok: **a)** VP0 profil, **b)** VP1 profil, **c)** VP2 profil, **d)** VP3 profil, **e)** VP4 profil, **f)** VP5 profil, **g)** VP6 profil, **h)** VP7 profil, **i)** VP8 profil, **j)** VP9 profil, **k)** VP10 profil

Az 5.4 ábrán látható profilokat szemügyre véve általánosságban megállapítható, hogy az u sebességkomponens szórása jellemzően nagyobb, mint a v sebességkomponens szórása. Az átlagos épületmagasság alatt a szélesebb komponensek szórása jellemzően csökkenő tendenciát mutat. A VP3, VP8, VP9 és VP10 profilok esetében az átlagos épületmagasság környékén az u sebességkomponens szórása jelentős mértékben, ugrásszerűen lecsökken, (a v sebességkomponens szórása alá csökken), és h alatt lényegesen alacsonyabb értékeket vesz fel, mint h fölött. Ez a jelenség összhangban van az időátlagolt sebességprofilok vizsgálatánál tapasztaltakkal, ugyanis az említett profilok vagy egy főáramlás irányára merőleges – vagy majdnem merőleges – utcakanyonban vannak, vagy egy épület nyomában helyezkednek el.

5.2 Vízszintes síkok vizsgálata a József nádor tér szélcsatorna modelljén

A József nádor tér szélcsatorna modelljén végzett mérések során három különböző magasságban elhelyezkedő vízszintes síkot vizsgáltam. A talajhoz legközelebbi sík az átlagos épületmagasság negyedének (20 [mm]), a középső sík az átlagos épületmagasság felének (40 [mm]) magasságában, míg a legfelső sík éppen az átlagos épületmagasságban (80 [mm]) helyezkedett el. Ezek a valóságban 7, 14 és 28 [m] magasságnak felelnek meg. A vízszintes síkok vizsgálatához egy hálót hoztam létre. Mindhárom sík vizsgálatához ugyanazt a hálót alkalmaztam. A mérési pontok ennek a hálónak a rácspontjaiban helyezkedtek el. Az 5.5 ábrán a mérési pontok láthatóak felülnézetből.



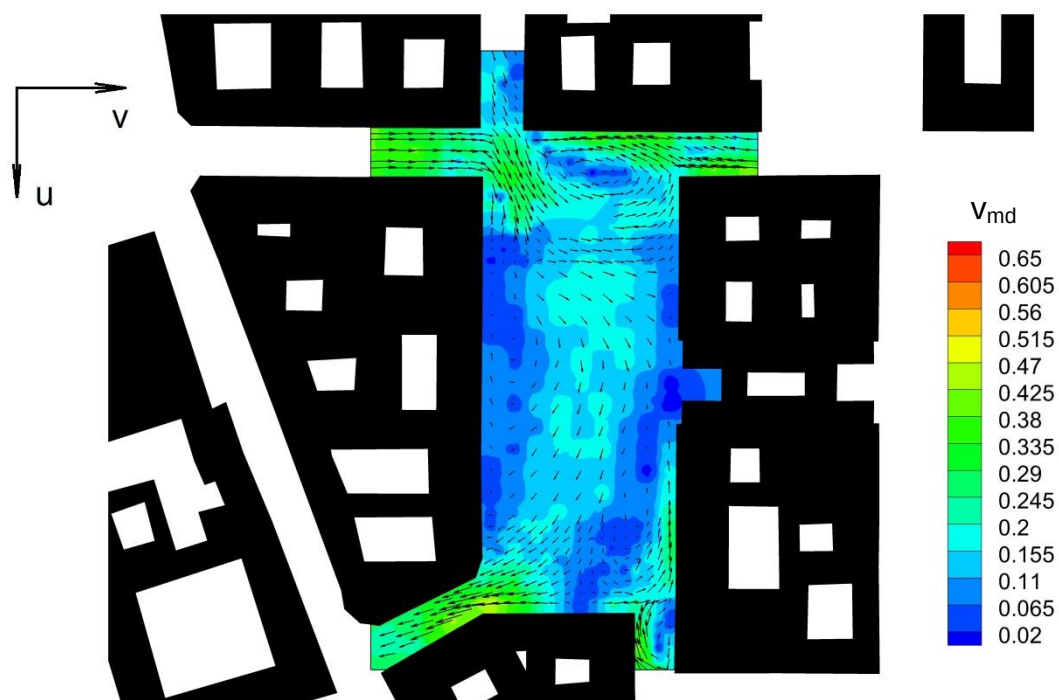
5.5 ábra: A síkok vizsgálatához létrehozott háló segítségével kapott mérési pontok felülnézetből

A dimenziótlan időátlagolt sebesség nagysága az (5.3) összefüggés segítségével számítható.

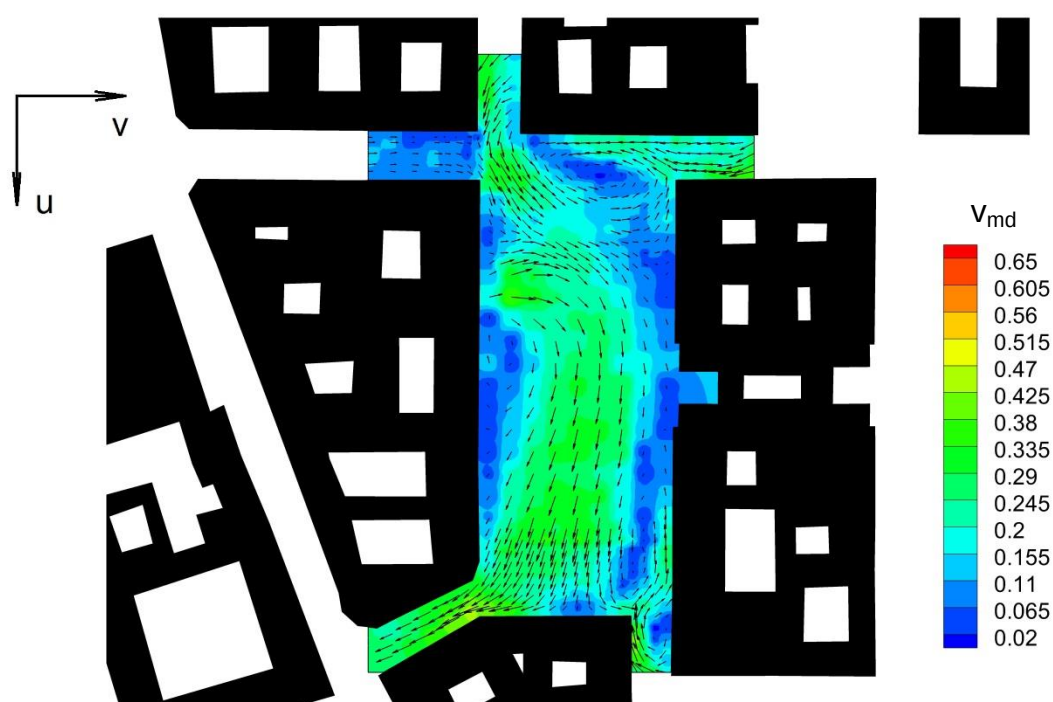
$$v_{md} = \sqrt{u_d^2 + v_d^2} \quad (5.3)$$

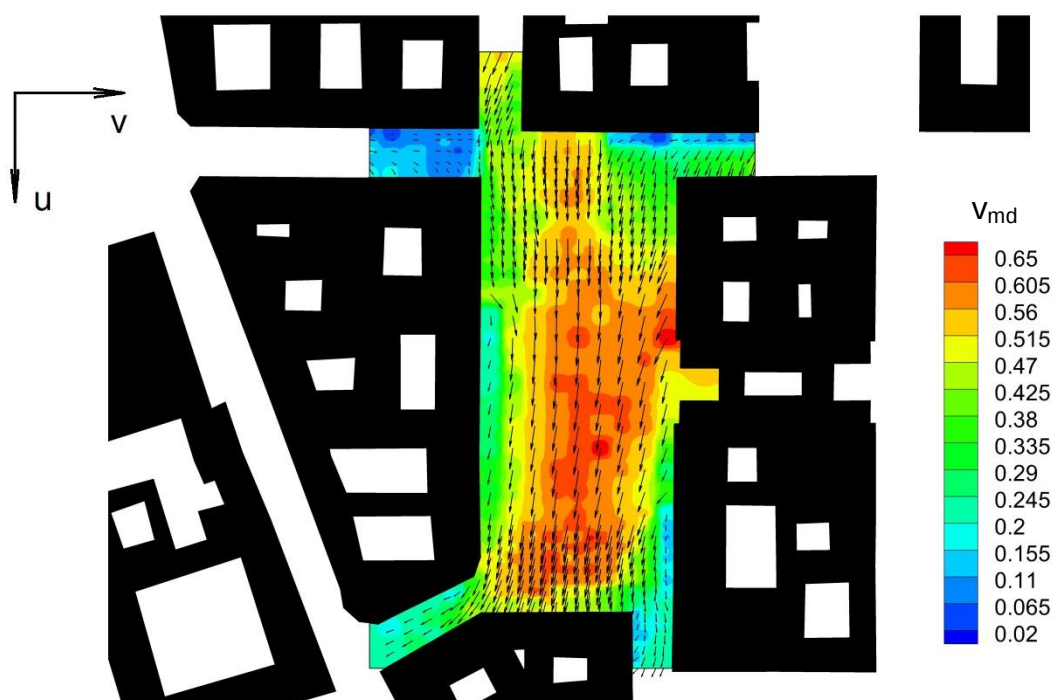
Az 5.6 ábrán a téren kialakuló dimenziótlan időátlagolt sebességmezőt láthatjuk $z=20$ [mm], $z=40$ [mm] és $z=80$ [mm] magasságban, a dimenziótlan időátlagolt sebességvektorok feltüntetésével, a diagramot a dimenziótlan időátlagolt sebesség nagysága (v_{md}) szerint színezve.

a) $z=20$ [mm] magasságban mért sebességmező



b) $z=40$ [mm] magasságban mért sebességmező



c) $z=80$ [mm] magasságban mért sebességmező

5.6 ábra: Dimenzióatlan időátlagolt sebességmező, a diagramot a dimenzióatlan időátlagolt sebesség nagysága (v_{md}) szerint színezve; **a)** $z=20$ [mm], **b)** $z=40$ [mm], **c)** $z=80$ [mm] magasságban

Az 5.6 ábrán látható sebességmezőket elemezve megállapítható, hogy a vizsgált síkok közül jellemzően a $z=80$ [mm] magasságban lévő síkon a legnagyobbak az időátlagolt sebesség értékek. Mindhárom sík esetében elmondható, hogy a térre észak felől csatlakozó utcákról a tér felé, a dél felől csatlakozó utcák közül pedig a nyugati oldalon elhelyezkedő utcán a térről kifelé áramlik a levegő. $z=80$ [mm] magasságban az egész tér fölött északról dél felé áramlik a levegő, és a tér déli oldalát határoló, átlagos épületmagasságnál alacsonyabb épülettömb fölött is jelentős sebességgel halad át a levegő. Ebben a magasságban visszaáramlás gyakorlatilag nem tapasztalható. Az időátlagolt sebesség a tér közepén és déli részén a legnagyobb.

Az időátlagolt sebesség értékek a tér közepén és déli részén a $z=80$ [mm] magasságban jellemző értékeknek $z=40$ [mm] magasságban csak 50-60 %-át, míg $z=20$ [mm] magasságban csak 20-30 %-át éri el. A dél felől csatlakozó utcák közül a nyugati oldalon elhelyezkedő utcán jelentős sebességgel áramlik ki a levegő. $z=20$ [mm] és $z=40$ [mm] magasságban a $z=80$ [mm] magasságban tapasztaltakkal szemben a dél felől csatlakozó utcák közül a keleti oldalon elhelyezkedő utcában visszaáramlás tapasztalható, mely kisebb mennyiségű levegőt szállít a térre, azaz a kiáramlást blokkolja. A tér déli oldalát határoló épület homlokfalán torlópont alakul ki. A tér északi részén, a József Attila utcánál egy nagyobb örvény alakul ki, ami a József Attila utcáról és a Nádor utcáról érkező levegő egy részét a tér északi részén keringeti. $z=20$ [mm] magasságban a József Attila utca felől nagyobb sebességgel áramlik a levegő a térre, mint a másik két magasságban.

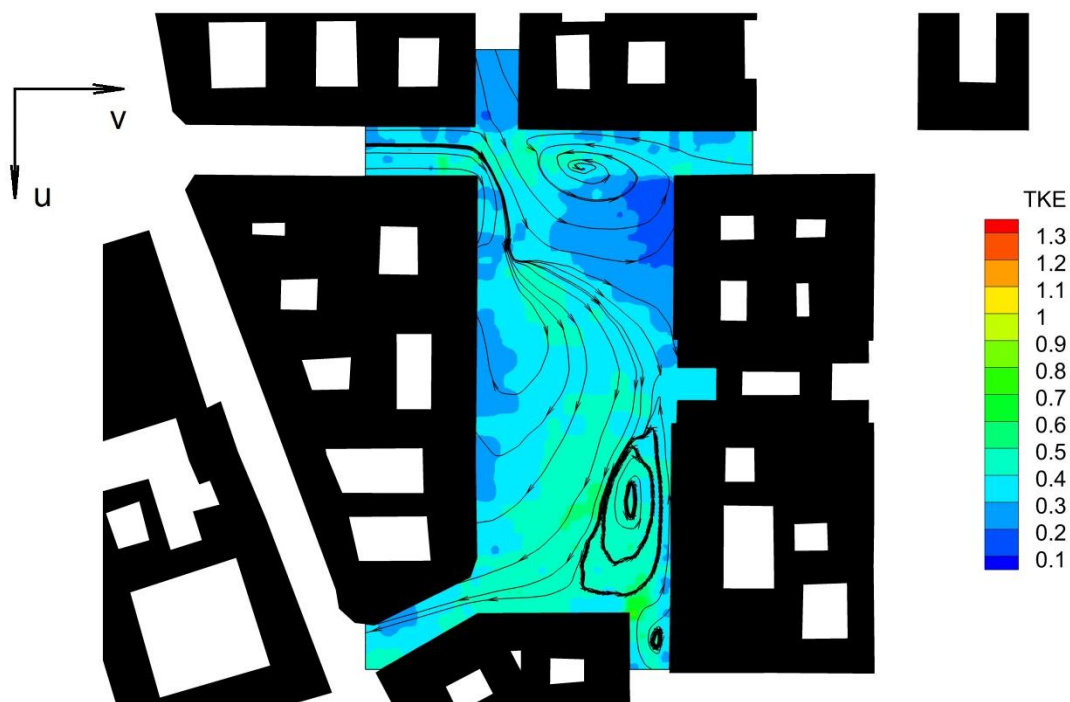
Általánosságban elmondható, hogy a téren az épületek közelében kisebb időátlagolt sebességértékek jellemzőek.

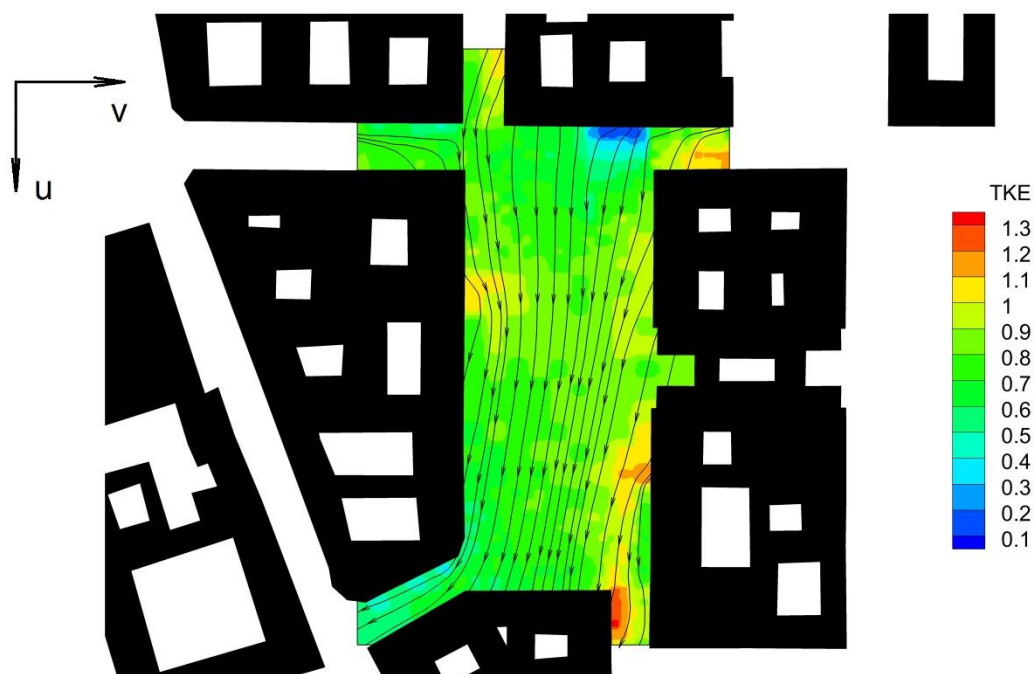
A turbulens kinetikus energia értékét az (5.4) összefüggés segítségével számítottam. Mivel a függőleges irányú sebességkomponens mérésére egyelőre nem volt módunk, annak értékével kisebb a számított turbulens kinetikus energia.

$$TKE = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_u^2 + \sigma_v^2) \quad (5.4)$$

Az 5.7 ábrán a téren kialakuló áramvonalakat láthatjuk $z=20$ [mm], $z=40$ [mm] és $z=80$ [mm] magasságban, a diagramot a turbulens kinetikus energia (TKE) nagysága szerint színezve.

a) $z=20$ [mm] magasságban kialakuló áramvonalak



b) $z=40$ [mm] magasságban kialakuló áramvonalakc) $z=80$ [mm] magasságban kialakuló áramvonalak

5.7 ábra: A téren kialakuló áramvonalak, a diagramot a turbulens kinetikus energia (TKE) nagysága szerint színezve; **a)** $z=20$ [mm], **b)** $z=40$ [mm], **c)** $z=80$ [mm] magasságban

Az 5.7 ábrán látható turbulens kinetikus energia eloszlásokat elemezve megállapítható, hogy a magasság növekedésével nő a turbulens kinetikus energia nagysága. $z=20$ [mm] és $z=40$ [mm] magasságban a falak közelében jellemzően kisebb a turbulens kinetikus energia értéke. Ez összhangban van az elvárásokkal, hiszen a falak közelében a sebesség szórása is csökken. $z=20$ [mm] és $z=40$ [mm] magasságban az áramlás kettéválk. Az északi utcákból érkező levegő egy része dél felé halad tovább és a dél felől csatlakozó utcák közül a nyugati oldalon elhelyezkedő utcán kiáramlik a térről, vagy a tér délkeleti sarkában kialakuló örvénybe keveredik. Az északi utcákból érkező légmennyiség többi része nem jut el a tér déli részére, hanem a József Attila utca felé visszaáramlik és a tér északi részén kering, a teret ezzel két részre osztva, ami feltehetőleg a szennyező-koncentráció eloszlásban is később mérhető lesz.

5.3 A József nádor tér szélcsatorna modelljén végzett mérések értékelése

A József nádor tér szélcsatorna modelljén végzett mérések segítségével – egy adott szélirány mellett a téren kialakuló szélmezőt vizsgálva – számos hasznos és érdekes információhoz jutottam. A kapott eredmények alapjául szolgálhatnak további mérések végrehajtásának és CFD modellek validálásának. Az alkalmazott LDA technika pontossága és az elkészített modell igényessége miatt rendkívül jó minőségű, jó térbeli felbontású mérésekre került sor. A jövőbeni mérésekre a következő javaslatokat teszem:

- A következő mérések során érdemes lenne közvetlenül talajközeli valamint 0,75h (60mm) magasságban is mérni a szélsősebesség-megoszlást.
- Legalább egy síkban célszerű lenne a teljes 800 x 800 mm-es terület mérése, hogy a környező utcák szellőzési viszonyairól is képet kapjunk.
- A modell lehetővé teszi a József Nádor tér és az Erzsébet tér közötti passzázs, valamint a házak belső udvaraiban történő mérést is.
- Célszerű lenne ezeket a kuriózumnak számító területeket is áramlás szempontjából vizsgálni.
- További széliránynak a 315 fok (északnyugat) és a 270 fok (nyugat) mindenképpen javasolt, hiszen ezek a területet érő legjellemzőbb szélirányok.

6 TOVÁBBFEJLESZTÉSI LEHETŐSÉGEK, JÖVŐBELI CÉLOK

Az áramlástan mérés technikájában alkalmazott egyik legpontosabb mérési módszer az LDA technika. Az LDA technika a méréseim során alkalmazott különleges elrendezés mellett is kiváló pontosságú mérési eredmények elérését tette lehetővé, ezért mindenképpen indokolt a mérések folytatása.

A munkám során megépített kiváló minőségű, részletes modell segítségével számos további mérés végrehajtásához teremtettem lehetőséget, így például a későbbi kutatások során lehetőségünk lesz több szélirány mellett a téren kialakuló szélmező átfogó vizsgálatára.

A szélmező vizsgálatokat követően koncentrációmérések végrehajtását tervezzük. A koncentrációmérések során vizsgálni fogjuk többek között a szennyezőanyag koncentrációjának eloszlását a téren és a tér környékén a József nádor tér alatti mélygarázs rámpájának elszívó hatását modellezve illetve a rámpa elszívó hatását figyelmen kívül hagyva.

A koncentrációmérések után a modellen homokeróziós méréseket kívánunk végrehajtani.

Az Áramlástan Tanszék nagy vízszintes szélcsatornájának szondamozgatójára felszerelhető az LDA optika. Az LDA optikát a nagymozgatóra felszerelve a modellen felülről is végezhetőek mérések, így az alulról történő mérés eredményei összehasonlíthatóak a felülről történő mérés eredményeivel, és pontosan meghatározható, hogy az áramlásba felülről beengedett optika áramlást megzavaró hatása mennyire érvényesül, és ez mennyire befolyásolja a mérés eredményeit.

Rendkívül nagymennyiségű, pontos mérési adatot sikerült előállítanom és feldolgoznom. Munkámat eredményesnek tartom, a témával a későbbiekben is foglalkozni szeretnék.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] JANE MERI SANTOS, NEYVAL COSTA REIS, JR., ELISA VALENTIM GOULART, ILIAS MAVROIDIS (2009): Numerical simulation of flow and dispersion around an isolated cubical building: The effect of the atmospheric stratification, *Atmospheric Environment*, Vol.43, Issue 34, pp.5484-5492.
- [2] I. MAVROIDIS, R.F. GRIFFITHS, D.J. HALL (2003): Field and wind tunnel investigations of plume dispersion around single surface obstacles, *Atmospheric Environment*, Vol.37, Issue 21, pp.2903-2918.
- [3] ROBERT N. MERONEY, BERND M. LEITL, STILLIANOS RAFAILIDIS, MICHAEL SCHATZMANN (1999): Wind-tunnel and numerical modeling of flow and dispersion about several building shapes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.81, Issues 1-3, pp.333-345.
- [4] ROBERT N. MERONEY, MICHEL PAVAGEAU, STILIANOS RAFAILIDIS, MICHAEL SCHATZMANN (1996): Study of line source characteristics for 2-D physical modelling of pollutant dispersion in street canyons, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.62, Issue 1, pp.37-56.
- [5] YOUNG-HEE RYU, JONG-JIN BAIK (2009): Flow and dispersion in an urban cubical cavity, *Atmospheric Environment*, Vol.43, Issue 10, pp.1721-1729.
- [6] JAE-JIN KIM, JONG-JIN BAIK (2002): Effects of inflow turbulence intensity on flow and pollutant dispersion in an urban street canyon, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.91, Issue 3, pp.309-329.
- [7] JAE-JIN KIM, JONG-JIN BAIK, HYE-YEONG CHUN (2001): Two-dimensional numerical modeling of flow and dispersion in the presence of hill and buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.89, Issue 10, pp.947-966.
- [8] MICHEL PAVAGEAU, MICHAEL SCHATZMANN (1999): Wind tunnel measurements of concentration fluctuations in an urban street canyon, *Atmospheric Environment*, Vol.33, Issues 24-25, pp.3961-3971.
- [9] L. SOULHAC, V. GARBERO, P. SALIZZONI, P. MEJEAN, R.J. PERKINS (2009): Flow and dispersion in street intersections, *Atmospheric Environment*, Vol.43, Issue 18, pp.2981-2996.
- [10] K. AHMAD, M. KHARE, K.K. CHAUDHRY (2005): Wind tunnel simulation studies on dispersion at urban street canyons and intersections—a review, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.93, Issue 9, pp.697-717.
- [11] MARKO PRINCEVAC, JONG-JINBAIK, XIANGYILI, HANSHENG PAN, SEUNG-BU PARK (2010): Lateral channeling within rectangular arrays of cubical obstacles, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.98, Issues 8-9, pp.377-385.

- [12] H. CHENG, P. HAYDEN, A.G. ROBINS, I.P. CASTRO (2007): Flow over cube arrays of different packing densities, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.95, Issue 8, pp.715-740.
- [13] DAVID HAMLYN, TREVOR HILDERMAN, REX BRITTER (2007): A simple network approach to modelling dispersion among large groups of obstacles, *Atmospheric Environment*, Vol.41, Issue 28, pp.5848-5862.
- [14] O. COCEAL, T.G. THOMAS, I.P. CASTRO, S.E. BELCHER (2006): Mean flow and turbulence statistics over groups of urban-like cubical obstacles, *Boundary-Layer Meteorology*, Vol.121, Issue 3, pp.491-519.
- [15] JAE-JIN KIM, JONG-JIN BAIK (2004): A numerical study of the effects of ambient wind direction on flow and dispersion in urban street canyons using the RNG k- ϵ turbulence model, *Atmospheric Environment*, Vol.38, Issue 19, pp.3039-3048.
- [16] CHENG-HSIN CHANG, ROBERT N. MERONEY (2003): The effect of surroundings with different separation distances on surface pressures on low-rise buildings, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.91, Issue 8, pp.1039-1050.
- [17] Y. CHENG, F.S. LIEN, E. YEEB, R. SINCLAIR (2003): A comparison of large Eddy simulations with a standard k- ϵ Reynolds-averaged Navier-Stokes model for the prediction of a fully developed turbulent flow over a matrix of cubes, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.91, No.11, pp.1301-1328.
- [18] S.R. HANNA, S. TEHRANIAN, B. CARISSIMO, R.W. MACDONALD, R. LOHNER (2002): Comparisons of model simulations with observations of mean flow and turbulence within simple obstacle arrays, *Atmospheric Environment*, Vol.36, Issue 32, pp.5067-5079.
- [19] I. MAVROIDIS, R.F. GRIFFITHS (2000): Local characteristics of atmospheric dispersion within building arrays, *Atmospheric Environment*, Vol.35, No.16, pp.2941-2954.
- [20] R.W. MACDONALD, R.F. GRIFFITHS, S.C. CHEAH (1996): Field experiments of dispersion through rectangular arrays of cubic structures, *Atmospheric environment*, Vol.31, pp.783-795.
- [21] R. W. MACDONALD, R. F. GRIFFITHS, D. J. HALL (1998): A comparison of results from scaled field and wind tunnel modelling of dispersion in arrays of obstacles, *Atmospheric Environment*, Vol.32, No.22, pp.3845-3862.
- [22] M. J. DAVIDSON, W. H. SNYDER, R. E. LAWSON, J. C. R. HUNT (1996): Wind tunnel simulations of plume dispersion through groups of obstacles, *Atmospheric Environment*, Vol.30, Issue 22, pp.3715-3731.
- [23] M.A. PARRA, J.L. SANTIAGO, F. MARTÍN, A. MARTILLI, J.M. , SANTAMARÍA (2010): A methodology to urban air quality assessment during large time periods of winter using computational fluid dynamic models, *Atmospheric Environment*, Vol.44, Issue 17, pp.2089-2097.

-
- [24] DAVID K. HEIST, JENNIFER RICHMOND-BRYANT, LAURIE A. BRIXEY, GEORGE E. BOWKER, STEVEN G. PERRY, RUSSELL W. WIENER (2009): The effect of a tall tower on flow and dispersion through a model urban neighborhood, Part 1. Flow characteristics, *Journal of Environmental Monitoring*, Vol.11, Issue 12, pp.2163-2170.
- [25] LAURIE A. BRIXEY, JENNIFER RICHMOND-BRYANT, DAVID K. HEIST, GEORGE E. BOWKER, STEVEN G. PERRY, RUSSELL W. WIENER (2009): The effect of a tall tower on flow and dispersion through a model urban neighborhood, Part 2. Pollutant dispersion, *Journal of Environmental Monitoring*, Vol.11, Issue 12, pp.2171-2179.
- [26] ZHENG-TONG XIE, IAN P. CASTRO (2009): Large-eddy simulation for flow and dispersion in urban streets, *Atmospheric Environment*, Vol.43, Issue 13, pp.2174-2185.
- [27] P. NEOFYTOU, M. HAAKANA, A. VENETSANOS, A. KOUSA, J. BARTZIS, J. KUKKONEN (2007): Computational Fluid Dynamics modelling of the pollution dispersion and comparison with measurements in a street canyon in Helsinki, *Environmental Modeling and Assessment*, Vol.13, Issue 3, pp.439-448
- [28] T. STATHOPOULOS, B.A. BASKARAN (1996): Computer simulation of wind environmental conditions around buildings, *Engineering Structures*, Vol.18, Issue 11, pp.876-885.
- [29] A. GADILHE, L. JANVIER, G. BARNAUD (1993): Numerical and experimental modelling of the three-dimensional turbulent wind flow through an urban square, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volumes 46&47, pp.755-763.
- [30] LAJOS TAMÁS D.SC., DR. GORICSÁN ISTVÁN, DR. RÉGERT TAMÁS, SUDA JENŐ, BALCZÓ MÁRTON (2008): Légszennyező anyagok terjedése városokban: A magas épületek hatása a légszennyezettségre, *Magyar Építőipar*, 4. szám, pp.139-146.
- [31] BALCZÓ M., LAJOS T. (2012): Active reduction of air pollutant concentrations at an urban square, International Conference on Urban Climate 6-10. August, 2012, Dublin, Ireland
- [32] MANNINGER P. (2011): Experimental investigation of flow in urban squares. Final Project, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Áramlástan Tanszék
- [33] VARGA M.J. (2011): Influence of urban squares on air pollutant dispersion. Final Project, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gépészmérnöki Kar, Áramlástan Tanszék
- [34] GORICSÁN I. (2005): Atmoszférikus határrétegben lejátszódó áramlási és transzportfolyamatok. Doktori értekezés, Budapest
- [35] VDI 3783 PART 12 (2000): Environmental meteorology, Physical modelling of flow and dispersion processes in the atmospheric boundary layer, Application of wind tunnels, VDI/DIN-Handbuch Reinhaltung der Luft, Band 1b

- [36] WTG-Merkblatt über Windkanalversuche in der Gebäudeaerodynamik (1994.12.27)
- [37] ESDU (1985): Characteristics of wind speed in the lower layers of the atmosphere near the ground. Part II: single point data for strong winds (neutral atmosphere), Engineering Sciences Data Unit 85020.
- [38] J. COUNIHAN (1975): Adiabatic Atmospheric Boundary Layers: A Review and Analysis of Data from the Period 1880-1972, *Atmospheric Environment*, Vol.9, Issue 10, pp.871-905.