

PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
FÖLDRAJZI ÉS FÖLDTUDOMÁNYI INTÉZET

Szélirányok, szellőkések és szélcsatornák vizsgálata Pécsett



Témavezetők: Dr. Gyenizse Péter
egyetemi docens

Készítette: Tóth Emese Zita
Földrajz Bsc

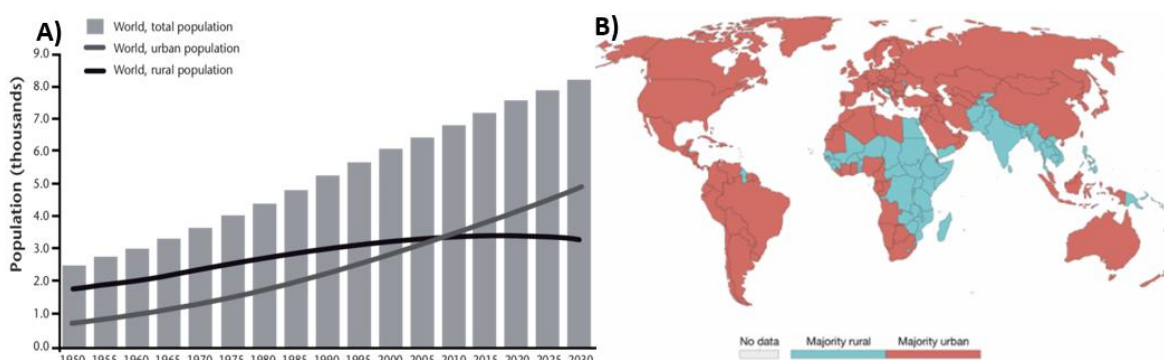
Dr. Sarkadi Noémi
adjunktus

Tartalom

1. Bevezetés.....	3
2. Célkitűzések	5
3. Városökológiai és városklimatikai szakirodalmi áttekintés	6
4. A vizsgált terület lehatárolása és jellemzése.....	15
5. Eszközök és módszerek	19
6. Eredmények	29
7. A dolgozat eredményeinek összefoglalása.....	57
Irodalomjegyzék.....	59

1. Bevezetés

Ahogy azt számos kutatás és a megfigyelhető trendek is alátámasztják, a városi népesség száma (mind az összlakosság számához, mind pedig a vidéken élő lakosság számához viszonyítva) folyamatosan növekvő tendenciát mutat. Az utóbbi évtizedben ez a folyamat egyre gyorsuló ütemben zajlott, amelyet szépen mutatnak a városi környezetben élő lakosság arányának növekvő értékei. Az 1950-es években becslések alapján ez az érték 30%-ra volt tehető, míg a napjainkban végzett felmérések szerint a lakosság 55%-a él városokban. Az előrejelzések alapján 2050-re körülbelül 68%-ra fog nőni ez a szám (ENSZ, 2019). Ezáltal biztosnak tekinthetjük, hogy a jövőben egyre nagyobb tömegeket fognak érinteni azok a mindennapos jelenségek, amelyek a helyi, lokális klímaviszonyokhoz köthetőek. Erre jó példa lehet a légszennyezettségi mutatók, a hőstressz vagy a humán komfortérzet romlása is, amelyet a városi környezet tudatos és helyes kialakításával, ezáltal többek közt területek megfelelő átszellőztetésével elkerülhetővé tehetünk (Piracha & Chaudhary, 2022).



1. ábra: A) A világ népességének növekedése és a városi ill. vidéki népesség megoszlásának aránya.¹ (jelmagyarázat: szürke oszlopok: a Föld össz. lakosságszáma; szürke vonal: a Föld össz. városi lakosságszáma; fekete vonal: a Föld össz. vidéki lakosságszáma)

B) Országok össz. lakosságának városi ill. vidéki élőhelye szerinti megoszlása 2018² (jelmagyarázat: kék területek: vidéki többség; piros területek: városi többség; fehér területek: nincs adat)

A kutatásom témáját a 2022-es szardíniai nyári egyetemen elhangzott előadásai inspirálták, amelyeken én is személyesen részt vettem. Az előadások főképp az okos városokról és fenntartható fejlődésről szóltak. Ekkor határoztam el, hogy hasonló vizsgálatokat fogok végezni Pécsen is. Kutatásom során fő motivációm a fenntartható és tudatos városfejlesztés fontosságára való figyelemfelhívás volt.

¹ https://www.researchgate.net/figure/The-urban-and-rural-population-of-the-world-1950-2030-Source-United-Nations-2006_fig2_287675244

² <https://ourworldindata.org/urbanization>

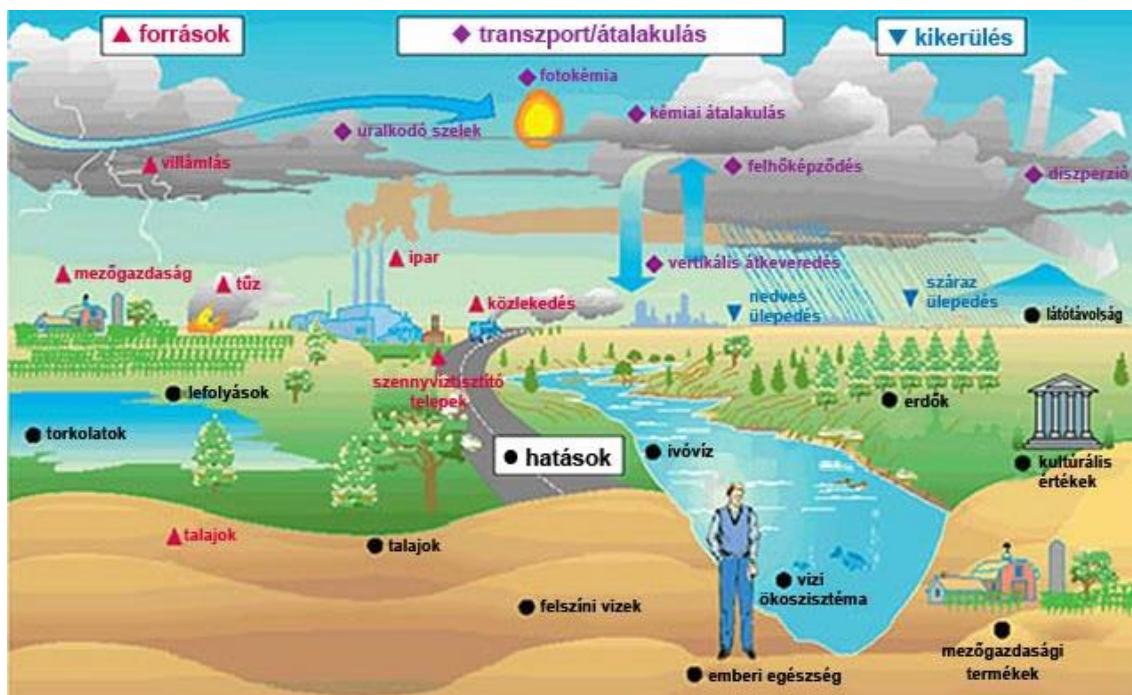
2. Célkitűzések

A városökológiai és városklimatikai, továbbá Pécs természet és társadalomföldrajzi szakirodalmak áttekintése után saját adatfeldolgozásaim és modellezéseim segítségével a következő kérdésekre kerestem választ:

- Mi a Pécsen uralkodó szélirány?
- Milyen értékeket mutatnak a különböző állomások átlagos szélereősség és maximális széllökés értékei?
- A mért adatokban tapasztalható-e bármiféle évszakokhoz köthető tendencia?
- Megfigyelhető-e tendencia a széllökések és átlagos szélesebesség értékek adataiban?
- Az épített környezet, a mérőállomások abszolút és relatív elhelyezkedése befolyásolja-e a mért értékeket?
- Számítógépes modellezéssel a nyugati városrész (Uránváros) mely területein határolhatóak le potenciális ventilációs folyosók? Milyen módon befolyásolják a szélirányt és szelerősséget az itt található magasabb (> 10 m) épületek?

3. Városökológiai és városklimatikai szakirodalmi áttekintés

A városok létrejöttével és sok esetben ezek nagyütemű növekedésével az addigi természetes terület bioszféráját változtatjuk meg, amely ezáltal elveszti (az addig feltételezett) stabilitását és dinamikáját (MEZŐSI G. ET AL., 2007). A már meglévő környezeti problémák hangsúlyosabbá válhatnak és kiegészülhetnek olyanokkal, amelyek a társadalom és a földrajzi környezet találkozása során jönnek létre (Nagy I., 2012). Ezen megváltozott, urbanizált tér konfliktusainak feltárására, emberekre való hatásának és az ott jelenlévő ökoszisztémák alkalmazkodóképességének vizsgálatára jött létre az interdiszciplináris városökológia tudománya (GÉCZI R., 1999) amelynek egyik hangsúlyos részét képezik a városklimatikai vizsgálatok is (pl.: a szélviszonyok, szélcsatornák vizsgálata). Az urbanizáció, mint jelenség természetesen nem egy új keletű dolog, egyedül annak mértéke az, amely drasztikus változáson megy keresztül. Az urbanizáció fogalma egyrészt az a jelenséget foglalja magába, amikor emberi befolyásra a felszín és tér fizikai tulajdonságai megváltoznak. Ennek hatására például a vizsgált terület feletti légterben kialakul egy, a vidékitől nagy mértékben eltérő légrétegződés, amelyet két fő részre oszthatunk, városi tetőrétegre (mikro léptékű, UCL – urban canopy layer), és a felette elhelyezkedő városi határrétegre (mezo léptékű, UBL – urban boundary layer). Ehhez adódik hozzá az urbanizációnak azon, másik folyamata, amely nem csak a környezetet, hanem a benne élők tevékenységeit, szokásait, és életmódját is módosítja. Ennek a változásnak köszönhetően a hő és vízgőz, a gázok, a füst, és egyéb szilárd szennyezőanyagok légterbe jutása a lakott területeken egyre fokozódik. Az utóbbiak forrására az egészen hétköznapi tevékenységektől kezdve sorolhatunk példákat, mint a fűtés, járművek használata által kibocsájtott kipufogógázok vagy ipari tevékenységek. Az ember jelenléte pedig nem csak az atmoszféra alsó részére van hatással, hanem befolyásolja a környező bioszférát, litoszférát, pedoszférát és hidroszférát is, amelyeket összegezve városi ökoszisztémát írhatunk le (OKE T., 2017). A többségében környezetünket negatív módon befolyásoló tevékenységek nem csak közvetlenül, lokálisan, hanem sokszor térben és időben (kémiai átalakulás, szállítás stb.) eltérő környezetben valósulnak meg (2. ábra).



2. ábra: A levegőszennyezés folyamata és hatásai (Forrás: www.met.hu³)

Mint a városökológiai kutatások nagy részét, jelen kutatást is egy 50 000 főnél nagyobb városban végeztem, mivel ez esetben már érzékelhetőek a különbségek a felszín, a mikroklíma és az életstílusbeli változásokban. Ez a határ az, amelytől már megfigyelhetünk különböző összefüggéseket is a város nagysága és az ott élők életminősége között (MEZŐSI G. ET AL., 2007). Továbbá a városok lakóinak energiaellátása nem korlátozódik csupán csak a Nap által termelt hőre, hanem különböző fosszilis energiahordozókkal egészítik ki azt. Ezek elégetésével, illetve feldolgozásával többletenergiához jutnak, ezzel egy időben viszont jelentős mértékben terhelik a környezetet (KERÉNYI A., 1995). A természetes környezet különböző mértékben képes ezeket az emberi tevékenységeket tolerálni, így néhányuk kevésbé (geológiai felépítés, globális klímakarakterek) néhányuk pedig sokkal könnyebben módosul (talajok, vegetáció, mikroklíma). A városokban még jelenlévő természetes ökoszisztémák felborulása láncszerűen kapcsolódik egymáshoz, így például a zöld növényzet csökkenése révén felborulhat a talaj vízháztartása, romló tendenciákat figyelhetünk meg az addig kedvező sugárzási és hőmérsékleti értékekben, valamint a szélviszonyok is módosulhatnak (MEZŐSI G. ET AL., 2007). Mindezek befolyásolják az ott lakó közösség életminőségét így esetlegesen ezek a megváltozott környezeti paraméterek társadalmi konfliktusokhoz is vezethetnek. Ezen rövid – és korántsem teljeskörű – problémakör felvázolásával jól szemléltethető, hogy a városökológia milyen komplex vizsgálati megközelítést igényel.

³ : <https://www.met.hu/omsz/tevekenysegek/levegokornyezet/bevezeto/>

A kutatásom során hasonlóan interdiszciplináris jelleget öltött az épített környezet, a természeti jelenségek és a társadalmi problémák közötti összefüggések tanulmányozása. Egyszerre játszik benne fontos szerepet a széladatok és meteorológiai jelenségek kiértékelése, a térinformatikai és modellező szoftverek számításai, valamint a várostervezés, az urbanisztika, nem utolsósorban pedig a tájépítészek által igazgatott városi növényzet telepítésének mennyiségi és minőségi kérdései is. Más szemszögből megközelítve, hasonlóan a város átszellőzésének kérdésköréhez juthatnánk, ha a légszennyezettségi mutatók vizsgálatával, hőérzettel, valamint a városi társadalom jóllétével foglalkoznánk elsősorban.

A város szerencsés földrajzi adottságainak köszönhetően a Mecsek által befolyásolt szélviszonyok alkalmasak lennének arra, hogy kialakítsanak olyan markáns lokális viszonyokat, amelyek jól kategorizálhatóak mind szélirány, mind szélesebbesség tekintetében (SALVADORI ET AL., 2021). A hazai szakirodalmi vizsgálatok száma minimális, de annál értékesebb, mivel ezek közül az egyik Szeged teljes városklimatológiai kiértékelését magába foglalja (Unger János & Gál Tamás, 2017). Ez a '*Városklíma*' című mű igen sokat segített a témában való elmélyülésben. Sajnos a kezdeti adatgyűjtésnél már kiderült, hogy Pécs nem rendelkezik olyan szintű mérőállomás-hálózattal, amelyre alapozva meghatározható lenne egy, az egész várost reprezentatívan lefedő kiértékelés. Unger és Gál (2017) munkájukban bemutatják azt is, hogy a folyamatok számítógépes modellezése igen jelentős számítási kapacitást igényel (erőforrás, és futtatási idő tekintetében). Sajnos sem a jelen kutatásra szánt időkeretbe, sem a rendelkezésre álló erőforrásokba nem fért volna bele egy ilyen mélységű kutatás, viszont a város pozitív jövőképének formálása érdekében bizonyosan hasznos lenne. Mindezek mellett nagy segítségemre volt T.R. Oke, G. Millis, A. Christen és J.A. Voogt által 2017-ben publikált '*Urban Climates*' című könyv is, amely a lehető legrészletesebben tárja fel a városi klímával kapcsolatos kérdéseket. Ezen túl, a témában egyesek esettanulmányokat készítenek például légszennyezettségi mutatókkal (Mayer, 1999), potenciális ventillációs folyosók lehatárolásával (Su et al., 2016) vagy éppen a városi kanyonok feltérképezésével és élettani hatásaival kapcsolatosan. Ez utóbbiak célja legfőképp a különböző megapoliszok és nagyütemben urbanizálódó területek szellőzésének és jövőképének vizsgálata volt (Shen et al., 2017). Míg mások a városi szélérőművek telepítésének hatásairól írnak (Stathopoulos et al., 2018).

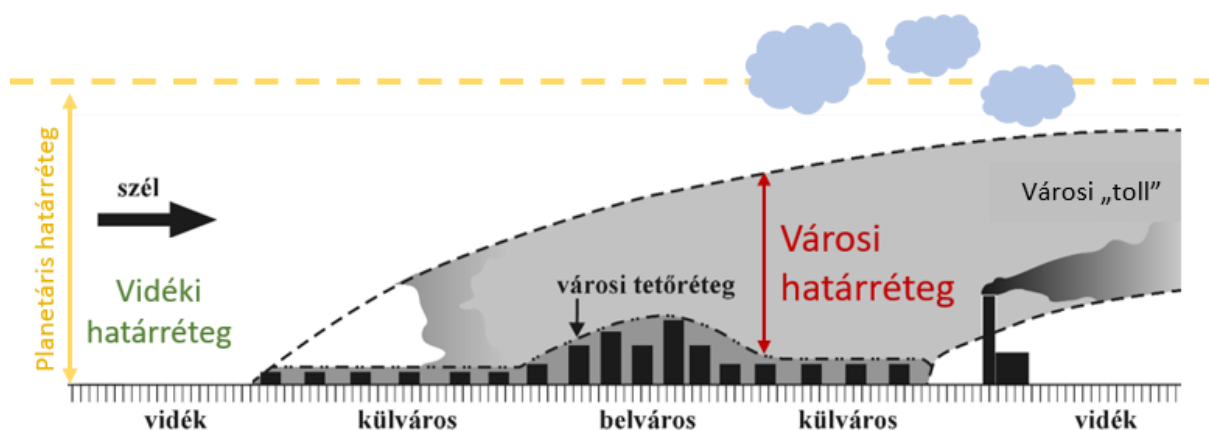
A városökológiával foglalkozó irodalom igen sokszínű, a különböző nyelvek szakirodalmi más és más témákra helyezik a hangsúlyt. Az általam is olvasott, fenntartható várostervezés és fejlesztés problematikájának körüljárása is ilyen, mivel ezen belül és ezeket kiegészítve más és

más témákra helyeződik a hangsúly (Nagy I., 2012). Így például a városökológia a német nyelvben kettős jelentéssel bír, egyrészt a városi élővilág és ökológiai háttér kutatásáról szól másrészt pedig a politikai döntéshozók és várostervezésért felelős emberek munkájának és programjainak értelmezéséről, elemzéséről majd ezek bemutatásáról a város jövőjére tekintve. (DEELSTRA, T. 1998) Az amerikai irányzat, főleg Chicago-i egyetem professzorai sokkal társadalomtudományokhoz közelebbi kérdéskört boncolgatnak, amelyben a városszerkezet térbeli szabályszerűségeit próbálják definiálni (hivatkozás?). További angol nyelvű irodalmak próbálják megválaszolni az olyan urbanizációval kapcsolatos kérdéseket, mint például, hogy hogyan tehető egy város minél jobban élhetővé a várostervezők által (hivatkozás?). A kínai kutatások pedig leginkább a szennyezőanyagok és veszélyeknek a megelőzését, az erdősítéseket, valamint a zöldterület-fejlesztéseket helyezik előtérbe (MEZŐSI GÁBOR ET AL., 2007). Ennek összefoglalására próbált Lichtenberger E. (1993) egy olyan háromszöget alkotni, amely csúcaiban a különböző tudományágak szerepelnek, így egyrészt a városok biológiai háttérével foglalkozó bioökológia, a társadalmi kérdésekkel foglalkozó (amerikai típusú) urbán-ökológia, valamint az ökocentrikus várostervezés. Ezáltal a háromszög által bezárt területen elhelyezhetőek mindazok a tudományterületek, amelyek megléte és ismerete kapcsolódik a városökológiai rendszerek megértéséhez és vizsgálatához (NAGY I., 2012).

3.1 Általános városi légrétegződés és éghajlat

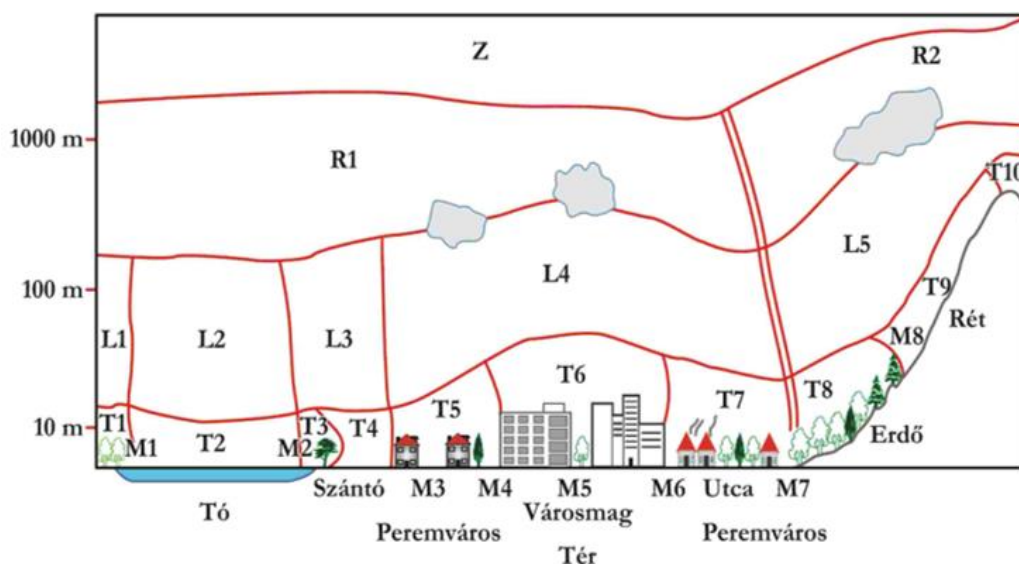
A városi légrétegződés szempontjából meghatározó a felszínnel közvetlenül kapcsolatban álló tartománya a troposzférának, az úgy nevezett planetáris határréteg. Ezt két részre oszthatjuk a felszín tulajdonságai alapján: vidéki határrétegre (természetes felszínborítás esetén) és városi határrétegre. Vastagsága a napszaktól függően az esti órákban a legkisebb, ilyenkor pár száz méteresre is zsugorodhat, míg napközben akár a 3 kilométert is elérheti. Átlagos vastagsága 1 km-re tehető. Ezen határréteg szerkezete nagyban függ a felszín fizikai tulajdonságaitól és anyagi minőségétől (felszínborítás), ezáltal a légköri tulajdonságainak ismeretében a különböző felszíni eltérések jól kimutathatóak. A határréteg felett elhelyezkedő, szabad légtömeg már

nincs kapcsolatban a turbulens, felszín közeli légáramlatokkal, valamint sem napszak, sem a felszínközeli érésségi paraméterek nem befolyásolják azt. (Geresdi I., 2022)



3. ábra: A vidéki és városi légrétegződés (Forrás: Oke, 1976; Unger J. et al., 2012 in Unger J. & Gál T., 2017)

A városi klíma, mint lokális jelenség, a természetes felszín megváltoztatása révén alakulhat ki, ahol az eltérő beépítettség és anyaghasználat miatt megváltozik az eredeti, természetes felszínborítottság felett kialakuló légrétegződés és klíma (Unger J. & Gál T., 2017). Ezzel egy időben a regionális klíma is hatással van az egyes területek urbanizációjának jellegére. Ezek alapján a városi/vidéki különbségek egy sokkal részletesebb, kisebb léptékű megközelítést kapjuk.

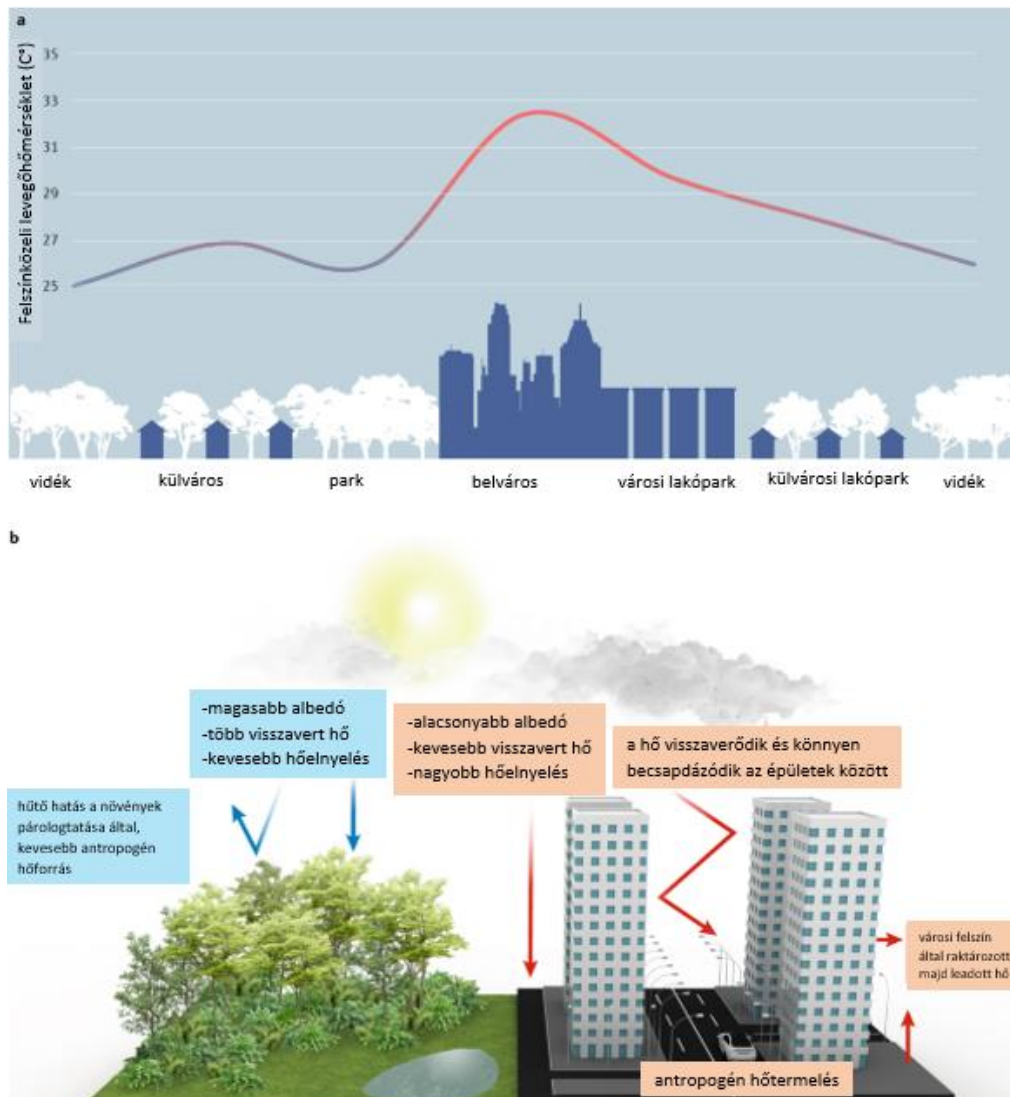


4. ábra: Városias és vidékies területek lehatárolása egyre csökkenő léptékben (jelmagyarázat: Z=zonális (makro) klíma; R=regionális (mezo) klíma; L=lokális klíma; T=topoklíma; M=mikroklíma) (Forrás: Yoshino, 1975; Unger J. et al., 2012 in Unger J. & Gál T., 2017)

Bár a lokális klímazónák néhány száz métertől akár több kilométerig is kiterjedhetnek mégis nehéz a bennük lejátszódó jelenségek között különbséget tenni, mivel azok nem elkülönülve, hanem folytonosan, egymással kölcsönhatásban változnak időbeli és térbeli kiterjedésük

függvényében. (Stewart & Oke, 2012; Unger & Gál, 2017). A Stewart & Oke (2012) olyan rendszert dolgozott ki, amelyben az egész Föld, minden régiójában meghatározható a lokális klímazóna (LCZ). A lokális klímazónák kialakításában figyelembe vett paraméterek a következők: a felszínborítás minősége, a szerkezet, az anyagtípusok és az antropogén hő kibocsátás. Továbbá, az egy típusba eső területegységek égboltiláthatósága, épület-alapterület aránya, vízzáró felszín aránya és felszíni albedójának értéke is hasonló értékeket kell, hogy mutasson (Stewart & Oke, 2012). Sok esetben a rurális térségektől nagymértékű eltérést figyelhetünk meg a városi határréteg levegőjének paramétereiben, mint például: hőmérséklet, páratartalom, szélerősség, szélirány és légszennyezettség. Korábbi kutatások kimutatták, hogy szoros összefüggés van a város utcáinak morfológiája (épületmagasság-utcaszélesség arány, oldalirányú nyitottság stb.) és az ott megfigyelhető levegőminőség és hőanomália mértéke között (vidéki területek értékeihez hasonlítva) (von Moos & WMO, 1996). Továbbá, az is megfigyelhető, hogy a város azon részein, ahol a beépítettség mértéke nagy, ott az épületek

közé beszoruló szilárd aeroszol részecskék és az épületek falai többszörösen visszaverik a beérkező rövidhullámú sugárzást, tovább növelve a hőmérsékletet (városi hősziget jelensége).



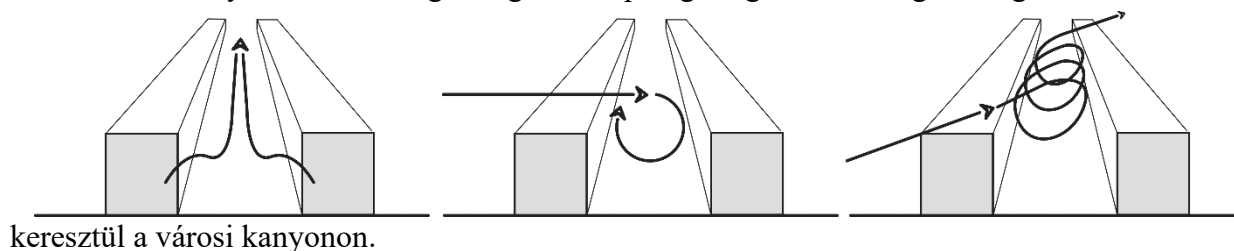
4. ábra: Városi és vidéki területek hőháztartásának okai (forrás: <https://www.nature.com/articles/s43017-020-00129-5#Abs1>)

3.2 Városi légmozgások

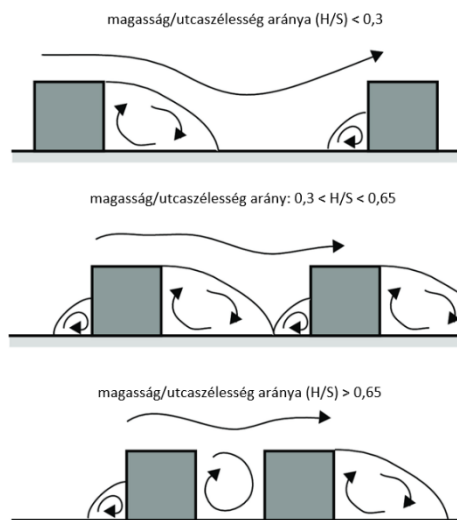
A városok határán megváltozik az érdesség és a szélprofil is, mivel a levegőrészecskék útjába eső akadályok (például épületek) mérete megnő. Ezáltal csökkenő szélsébséget és eltérített szélirányt tapasztalhatunk a házak között (GERESDI I., 2022). A beépített területeken nem lesz igaz a földfelszíntől számítható logaritmikusan növekvő szél erősség sem. Ezt a pontot a városias beépítettség esetében az átlagos tetőszint vonalába kell áthelyezni (Unger János & Gál Tamás, 2017; OKE ET AL., 2017). A mérőállomások elhelyezésére többek között ezért kell külön

figyelmet fordítani. A kutatás során használt műszerek értékei között is jól látható különbségeket fedezhetünk fel azon eredmények között, amelyeket egy épület tetejéről mérve kaptunk és azok közt, amelyek házak takarásában voltak lehelyezve. Továbbá az antropogén hő instabillá teszi a tetőszint alatt található légréteget, így ott megnő a feláramlási sebesség, ami növeli a határrétegben a turbulenciát. Sokszor ez a pozitív hőmérsékleti eltérés és konvekció eredményezi a városi határréteg megemelkedését is, valamint kupolaszerű kiemelkedését (GERESDI I., 2022). A turbulens áramlások egészen magasra (1-2 km-re is) képesek felszállítani a városokban felgyülemlett szennyezőanyagokat, amelyeket a szél nagy távolságokra képes elszállítani, ezáltal a városi „toll” jelenségét kialakítva (Unger János & Gál Tamás, 2017).

Visszatérve a kisebb léptékű vizsgálódásra, azt tapasztalhatjuk, hogy a város különböző pontjain mikro skálán igen nagy különbségek vannak a szél erősség és szélirányok értékeiben. Itt, akár egy-egy utca között is lehetnek eltérések a tájolásból és épületmagasság-utcaszélesség arányából adódóan. A nagyobb beépítettségű területeken városi kanyonokat határolhatunk le, amelyek 3 oldalról határolt utcaszakaszoknak feleltethetőek meg (Oke et al., 2017). Amennyiben a jellemző szélirány az utca vonalával párhuzamosan esik, úgy egy csatornahatást létrehozva állandóan tiszta levegővel látja el az ott tartózkodókat. Amennyiben viszont merőlegesen érkeznek a jellemző szelek az épületek vonalára, úgy turbulenciát hoznak létre a szélárnyékos oldalon (5. ábra). Ezen esetben fontos figyelembe venni azt, hogy hogyan viszonyul egymáshoz az épületmagasság és utca szélességének aránya. Míg az utca szélessége és az épületek magassága között el nem érjük az 1/3-ad 2/3-ad arányt addig az épületek szélárnyékában kialakuló turbulencia egyre növekvő értékeket mutat, ezzel is javítva néhány méter magasságig a felszín feletti szennyezett levegő minőségét. Amennyiben azt tapasztaljuk, hogy magas épületek sora egy szűk utcát szegélyez, valamint a területre érkező jellemző szélirány erre merőleges, úgy a két épületsor közötti levegő (minden szennyezőanyaggal együtt) elvágódik a felette elhelyezkedő városi határrétegtől és egy zárt cirkulációba kezd (OKE ET AL., 2017). Ezen három épületmagasság és utcaszélesség arány változatot mutatja be a 6. ábra. Átlós irányból érkező légtömeg estén pedig dugóhúzó mozgást végezve haladnak



5. ábra: Városi kanyonok légáramlása beérkező széliránytól függően (forrás: https://www.urbanclimate.nl/tool/infosheet/plan_element/index.php?id=8)



6. ábra: Városi kanyonok átszellőzése a magasság / utcaszélesség aránya alapján (forrás: Oke et al., 2017)

A szennyezettebb, nagyobb igénybevételt élvező területek levegőminőségének tisztántartása érdekében érdekelt a város felmérni utcahálózatának és a jellemző szelek irányának a kapcsolatát, valamint meghagyni azokat a potenciális ventillációs folyosókat, amelyek a vidéki területekről a belváros irányába vezetnek és oda tiszta levegőt juttatnak. A beáramlás mértéke leginkább a felszín érdességi paramétereitől függ, valamint attól, hogy a külterületektől vett távolságtól. Nagy pozitívumot jelent, ha ezek a széles, alacsony beépítettségű és kis mértékű kiszorítási rétegvastagsággal jellemezhető folyosók zöld területek is egyben, mivel ezek nem akadályozzák meg a városi cirkuláció alsó ágának működését. A levegő minőségének és hőmérsékletének megtartásában is szerepük van. Ezzel szemben, a hasonló paraméterekkel rendelkező, külvárosból beérkező vasúti pályák folyosói, közlekedési útvonalai és folyómedrei az két utóbbi kritériumnak nem tudnak eleget tenni, és sokszor inkább meleg és szennyezett levegőt hoznak a városi környezetbe, amely kezdetben lehet, hogy nem az volt, mégis útja során a felszín hatására megváltozott. A városi levegő felszínközeli rétegeinek minőségbeli javulását és cserélődését tehát ezen 'folyosók' mentén gyorsíthatjuk fel. Ahhoz, hogy a várostervezők a jövőben figyelembe tudják venni azokat a tényezőket, amelyekkel élhetőbbé, emberközpontúbbá és jobb hőháztartásúvá alakíthassák a városokat, szükséges ezen területek feltérképezése, majd beépítésük megakadályozása, új folyosók kialakítása és a meglévők bővítése (Unger J. & Gál T., 2017). Ehhez nyújtának igen sok segítséget azok a berendezések, amelyek városszerte mérik a szükséges paramétereket, mint például levegőhőmérséklet, páratartalom, szélereősség, szélirány stb. (ALLEGRIINI ET AL., 2015). Kutatásom során azt

tapasztaltam, hogy Pécsen igen sok kihelyezett hőmérséklet és csapadékmérő állomás van, míg a széladatokat rögzítő állomások száma hozzájuk képest csekély.

4. A vizsgált terület lehatárolása és jellemzése

Pécs, a Kárpát-medence Délnyugati részén, a Dél-Dunántúli tájegység keleti felén helyezkedik el központjában Kászim pasa dzsámijával, amely az északi szélesség $46^{\circ}04'37''$ -én és a keleti hosszúság $18^{\circ}13'41''$ -én található. Az 7. ábrán Pécs, valamint azon belül uránváros elhelyezkedését láthatjuk.



7. ábra: Pécs, azon belül Uránváros elhelyezkedése Magyarországon (forrás: saját szerkesztés)

4.1 Pécs domborzati adottságai

A város domborzati képét legnagyobb mértékben befolyásoló tényező egyértelműen a Mecsek jelenléte, amely ezen, nyugati szakaszán a legmagasabb csúcsok átlagosan 500 méter körül magasodnak. Bár a város majdnem teljes területe a Mecsek és a Baranyai-dombság közé eső, K-Ny csapásirányú Pécsi-medence területén helyezkedik el mégis az északi külváros egyes területei és a medencében mérhető pontok között akár több száz méteres szintkülönbség is lehet (Lóczy D. & Gyenizse P., 2013). A város központi része 160 m-rel helyezkedik el az átlagos tengerszint felett. Míg a keleti-Mecsek területe erősebben tagolt, addig a nyugati, Pécs városa felett is elhúzódó homokkő-gerincek és karsztfennsík sokkal lágyabb formát öltenek. Ez alól

kivételt képez a Jakab-hegy déli lejtője, amely homokkő sziklái jelentősebb szintkülönbséget tapasztalhatunk. A város feletti vonulatról leérkező, fluviális erózióra visszavezethető völgyek falainak meredeksége és szélessége nagyban befolyásolja a letelepedés mértékét is (Lóczy D. & Gyenizse P., 2013). Továbbá, ezek, a város területére eső völgyek lesznek azok, amelyek nagymértékben vezetik majd a hegygerincről lefelé áramló légtömegeket, ezzel is meghatározva a településen mérhető jellemző szélirányokat (Simor F., 1938). A város középső és legsűrűbben lakott része a Pécsi-medence területére esik, míg a város déli nyúlványa már a Baranyai-dombság északnyugati lejtőire épült. Ezen a területen is sokkal kedveltebbek letelepedés szempontjából a széles, pleisztocén vízfolyások és deráziós lejtőfolyamatok által erodált völgyek (Lóczy D. & Gyenizse P., 2013).

4.2 Pécs éghajlati jellemzői

Szoláris éghajlati besorolás alapján a terület a mérsékelt- és nyugatias szelek övébe esik. A Péczy-féle éghajlati osztályozás alapján Pécs a Mecsek közelsége miatt több kategória találkozásánál helyezkedik el (legfőképp meleg - mérsékeltén száraz / meleg - mérsékeltén nedves / mérsékeltén meleg - mérsékeltén nedves) (PÉCZELY GY., 1981). Bár Pécs a legdélebben fekvő a vidéki nagyvárosaink közül, mégis ugyanazok a tényezők határozzák meg makro léptékű éghajlati tulajdonságait, mint Magyarország többi részén. Ezek az Alpok és a Kárpátok vonulatai, amelyek délnyugati nyitottságának köszönhetően a Fekete-tenger felől érkező légtömegek sokszor csapadékot és enyhe időt hoznak (mediterrán ciklonok). Sokéves mérések alapján azt állapíthatjuk meg, hogy a telek mérsékeltén enyhék és mérsékeltén nedvesek, amelyek alól csak a magasabban fekvő területek zordabb körülményei képeznek kivételt. A nyár meleg és hosszú, amely elején egy csapadékmaximumot várhatunk. Az éves csapadékmennyiséghez (a város területén körülbelül 650 mm) az őszi eső másodmaximum is hozzájárul, bár még ekkor is érezhető a mediterrán klíma jelenléte a napsütéses órák számában (Lóczy D. & Gyenizse P., 2013). Az enyhe domborzati különbségek nem befolyásolják nagymértékben az éghajlatot, viszont kisebb léptékű, mezo-, mikro- és lokális klímákat alakíthatnak ki. Ezek nem összekeverendőek a következő fejezetben említésre kerülő lokális klímazónákkal (LCZ), mivel az itt említett kisebb léptékű klímák kialakulását specifikusan az adott hely természeti viszonyai határozzák meg. A különböző helyi tényezők (mint például városi aktivitás / városméret / városszerkezet) moderátor jellegűek így a városvezetők és az ott élők által befolyásolható, míg a fix tényezők (például napszak / évszak / időjárás vagy földrajzi

helyzet) nagyobb léptékűek és nem befolyásolhatóak (Unger János & Gál Tamás, 2017). Ezeket a 8. ábrán összegezve láthatjuk.



8. ábra: Városklímát befolyásoló tényezők (Forrás: Unger János et al., 2012))

4.3 Pécs és azon belül Uránváros fejlődése

A Mecsek déli oldalának kedvező éghajlati és természeti adottságainak köszönhetően ez a terület mindig is az átlagosnál kedvezőbbnek tetszett (a Kárpát-medence régióján belül) letelepedési szempontból (Lóczy D. & Gyenizse P., 2013). A város történelme majd két évezredes múltra tekint vissza, amely során nagy fejlődésen ment keresztül, több stagnáló és visszafejlődő időszak ellenére (TÓTH Z., 1976). Már időszámításunk előtt is éltek itt, a kezdetben itt élő illír népeket a kelták majd később a rómaiak váltották fel. Sopianae ekkor egy igen fontos város volt, közlekedési csomópontként is tekinthetünk rá, mivel az délről érkező, Eszék (Mursa) környéki Dráva átkelőtől Pécsen keresztül vezetett az út Pannónia tartomány további fontos városai felé. Ebből az időszakból maradt ránk a várost meghatározó fő tengelyek, utak nyomvonala is (SZÁSZ I., 1999). A Mecsek előterében a közlekedés, a hegyvonulattal párhuzamosan a K-Ny-i csapásirányban alakult ki, amelyet továbbá meghatároztak az akkoriban mocsaras medenceterületen elhelyezkedő szárazulatok és átkelők is. A kutatás során vizsgált ma Uránvárosnak nevezett városrész is ezen az egykori mocsaras területen feküdt, egészen a 20. század elejéig lakatlanul. Az akkori városi terjeszkedés igényeire tekintettel a Pécsi-vízet szabályozni kezdték, és a mocsarak lecsapolása is megkezdődött. Az 1950-es évek környékén felfedezett urán és szénérc lelőhelyek, valamint a hozzájuk kapcsolódó nagymértékű és letelepedésre igényt tartó munkaerő jelenléte váltotta ki, akkori nevén Újmecsekalja létrejöttét, és a nyugat felé való terjeszkedést is (Gyenizse P., 2009). Az így megépült

Uránváros, Dénesi Ödön munkásságának köszönhetően egységes képet mutat mind beépítésben, környezetformálásban és építészeti stílusban is. A körülbelül 100 hektáros területen 1955 és 1974 között 5000 lakást és ezentúl tucatnyi egyéb funkciót ellátó épületet húztak fel (KAPOSI Z. ET AL., 2019; TÓTH Z., 1976).

A mai városnegyedek felosztása szerint Uránvárost három városrész alkotja: Uránváros, Kovácstelep és Szigeti-tanya. A kutatás során vizsgált terület az Uránvárosi városnegyedre koncentrál elsősorban, valamint a Szigeti külváros déli felére, ahol a hatos számú főút mentén magasabb épületek helyezkednek el. Hivatalosan a városnegyed északi határát a Siklós irányába futó hatos számú főút adja, kelet felől a Tüzér utca, délről pedig a vasút vonala határozza meg. Nyugati részén Uránváros területét az Esztergár Lajos utca egy alacsonyabb, családi házakkal beépített negyedről (Kovácstelepről) különíti el. Az uránvárosi lakónegyed 2011-ben közel 12 ezer ott lakót számlált, azóta viszont ez a szám csökkenő tendenciát mutat. A fogyó lakosságszám egyik oka az lehet, hogy az itt élő ideiglenes lakcímmel rendelkező lakók, akik ebben a felmérésben nem vettek részt, egyre többen vannak a megfizethető bérleti díjak miatt. Legelsősorban egyetemisták és fiatal családok költöznek ide a nyugodt és városközponthoz viszonylag közel fekvő, jó infrastruktúrával rendelkező városrészre. (Internet 2)



10.ábra: Uránváros paneltömbjeinek elhelyezkedése a terepmodellen (rózsaszínnel kiemelve) (forrás: saját szerkesztés)

4.4 Mérőállomások története

Pécsett (szakaszosan) már a XIX. században is folytattak meteorológiai megfigyeléseket a város különböző pontjain, melyek adatsorai (papír alapon) mind máig fennmaradtak. A mérések helyszínei többek között az Apáca utca 14. (1898-1916), a Fertőtlenítő Intézet (1916-1918), az Erzsébet Egyetem (1921-1922), a Notre Dame zárda (1922-1924), a Pedagógiai Főiskola (1924-től 1943-ig, bár a háború miatt csak szakaszosan tudtak mérni) és nem utolsósorban a Mecsekaljai reptér (1946-1957) volt⁴. Sok esetben az akkor használt mérőműszerek és módszerek nem voltak egységesek, így ezek az adatok nem tekinthetők teljes mértékben megbízhatónak és összehasonlításra alkalmasnak a mai eredményekkel. Az első pontosabb méréssorozat elindítása dr. Simor Ferenc (1901-1978) geográfus és pécsi egyetemi tanár nevéhez köthető, aki a korábbi és az akkor folyamatosan működő állomások adataiból Pécs és a Mecsek éghajlatára vonatkozóan több művet is publikált. Mindeközben 1956-ban a mérőállomást a Pécs-pogányi repülőtérre telepítették át, amely a város központjától délre körülbelül 10 km-re helyezkedik el, és a korábbi mérési helyszínekhez viszonyítva vidéki jelleget ölt. A 2000-es években pedig az egyetem területére is telepítettek egy mérőberendezést, majd ezt követően városszerte több mérőállomást is létesítettek melyeknek pontosabb paramétereit a következő fejezetben taglalom.

5.1 Eszközök és módszerek

5.1 Mérőeszközök leírása

A kutatás során öt különböző mérőállomás adatait használtam fel (1. táblázat), amelyek mindegyike, a Pécs-pogányi állomás kivételével, a város határain belül helyezkedik el, városias, beépített környezetben. Az egyetlen külső helyszín a Pogányi repülőtér mérőállomása, amely Pécs déli külvárosától körülbelül 4 km-re helyezkedik el. A pogányi és a BTK-TTK campus területén elhelyezett műszerek az OMSZ mérőhálózatának részét képezik, így e két eszköz adatait tekinthetjük referenciának (megbízható, hosszú távú adatsorok). E két állomáson a szélsébség mérése 0,1-50 m/s intervallumban történik. A szélirányt 2,5°-os pontossággal mérik. A Jegenyés utcai és Erzsébettelepi állomások eltérő elven működő mérőműszerei lettek a legfrissebben telepítve. Míg a többi állomáson forgókanalas szélmérővel mérik a szél erősségét és szélirányát, itt a mérések alapja a doppler-effektus.

⁴ https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/eghajlati_adatsorok/Pecs/leirasok/tortenet/

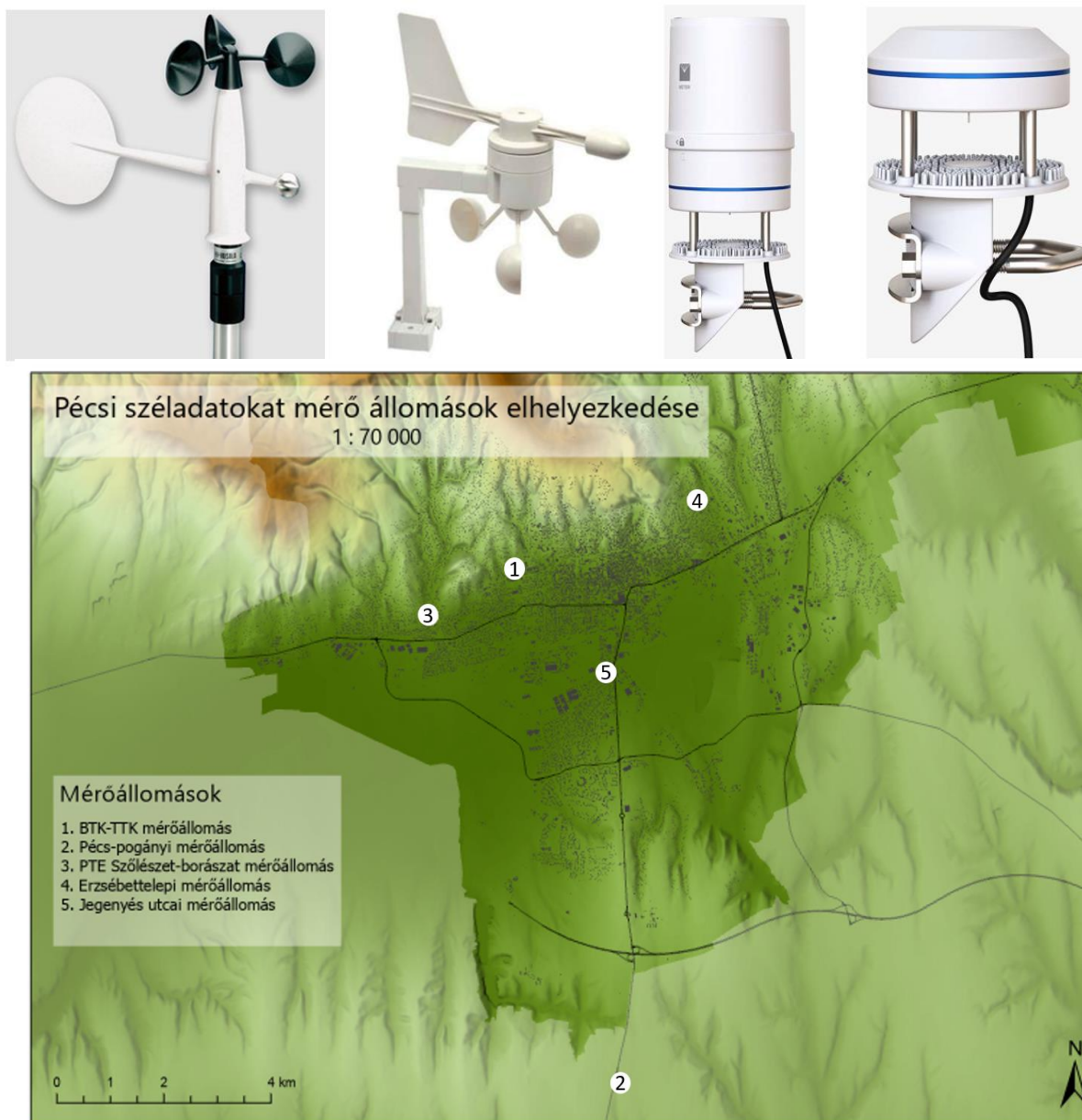
Az állomások részletesebb leírását a következő táblázatban foglaltam össze.

Megnevezés	Koordináták	Széladatok mérésének kezdete	Mérőműszer típusa	Mérések intervalluma	Mérőállomás környezete
BTK-TTK egyetemi mérőállomás (OMSZ)	é.sz. 46.0778 k.h. 18.2072 tengersz. f. mag.: 174 m	2010.02.01	Vaisala kúpos kialakítású kanalas szélkerék	1p / 10p / 1h / naponta	Magas épületekkel beépített, nyitott.
PTE Szőlészet-borászat mérőállomása (Időkép)	é.sz. 46.0688 k.h. 18.1856 tengersz. f. mag.: 143 m	2019.01.16	TX-20 kanalas szélmérő	napi átlagok (1435 mérésből)	Alacsony, családi házakkal beépített terület.
Pécs-pogányi mérőállomás (OMSZ)	é.sz. 45.9950 k.h. 18.2350 tengersz. f. mag.: 199 m	2004.03.31	Vaisala kúpos kialakítású kanalas szélkerék	10p / 1h / naponta	Nyitott, vidéki jelleg.
Jegenyész utcai mérőállomás	é.sz. 46,0595 k.h. 18,2278 tengersz. f. mag.: 120 m	2021.07.01	ATMOS 22 Ultrasonic Anemometer (Metergroup)	10 percenként	Alacsony, családi házakkal beépített, enyhén zárt.
Erzsébettelepi mérőállomás	é.sz. 46,0889 k.h. 18,2505 tengersz. f. mag.: 175 m	2021.07.01	ATMOS 41 All-in-one Weather Station (Metergroup)	10 percenként	Alacsony, családi házakkal beépített, enyhén zárt.

1. táblázat: Mérőállomások tulajdonságait összegző táblázat (saját szerkesztés)

A fentiekben részletesen jellemzett mérőműszerek képeit a 11. ábrán láthatjuk, majd azt a térképet, amely a különböző mérőállomások elhelyezkedését mutatja Pécsen (12. ábra).

11. ábra: A különböző mérőműszerek, balról jobbra haladva: VAISALA, TX-20, ATMOS 22, ATMOS 41 ⁵



12. ábra: A mérőműszerek elhelyezkedését bemutató térkép (forrás: saját szerkesztés)

Az OMSZ hálózathoz tartozó állomások adatsorait a nyilvános meteorológiai adattár archívumából töltöttem le⁶. Az Időkép által kihelyezett állomás adataihoz a Szőlészeti és borászati Intézet által jutottam hozzá, az adatletöltést az üzemeltető profilján keresztül tudtam

⁵<https://www.vaisala.com/en/products/weather-environmental-sensors/wind-sensor-wm30>;
<https://tasmota.github.io/docs/TX2x/> ; <https://www.metergroup.com/en/meter-environment/products/atmos-22-ultrasonic-anemometer> ; <https://www.metergroup.com/en/meter-environment/products/atmos-41-weather-station>
⁶ <https://odp.met.hu>

véghez vinni. Az Erzsébettelepi és Jegenyés utcai mérőállomások adatait pedig a mérőállomásokat kihelyező magánszemélyek beleegyezésével dolgoztam fel.

5.2 Informatikai eszközök leírása és módszertana

5.2.1 Adatfeldolgozás és térképkészítés

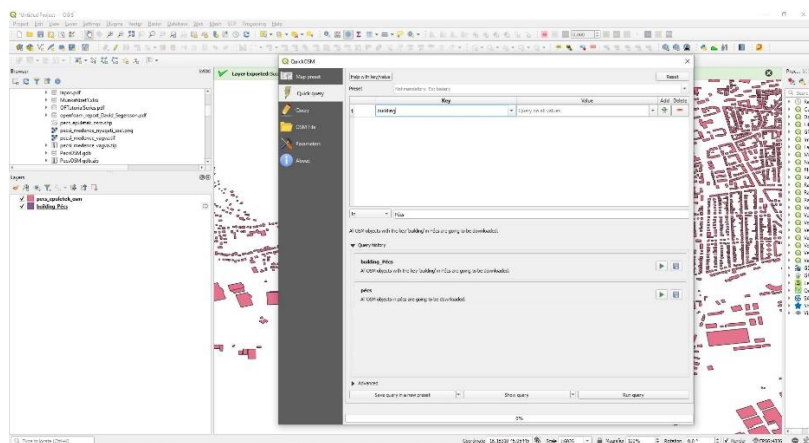
A meteorológiai adatok forrását a korábbi fejezetben már említettem, amelyek feldolgozását az MS Excel segítségével hajtottam végre. Az állomások adatait itt szélirány, átlagos szélerősség és maximális szélhőkés kategóriákra bontva külön kezeltem. A szélirány adatokat minden esetben szélrózsa diagramon ábrázoltam, míg a másik két paraméter eredményeit oszlopdiagramok segítségével szemléltettem. A különböző tendenciák megfigyelése végett az adatokat évszakos bontásban is kiértékeltem. Az egyes mérőműszerek adatsorait nem a legkorábbi adatig visszamenőleg használtam fel, hanem kiválasztottam azt a teljes évet, amelyben minden állomás rendelkezik adattal. Mivel a két 'legfiatalabb' helyszíneken (Jegenyés utca és Erzsébettelepi állomások) csak 2021 nyarán kezdődtek meg a mérések, így ott a teljes évet 2021 júliusától 2022 júliusig vettem, a többi mérőállomás esetén pedig 2021 januárjától a teljes naptári évet használtam fel. Ennek oka az volt, hogy az országos hálózathoz az adatok minden év márciusában kerülnek nyilvánosságra, így a 2022-es első félévi értékekkel még nem tudtam dolgozni. Néhány esetben figyelembe vettem hosszabb időintervallumokat is, melyek során az összes mért adatot felhasználtam különböző grafikonok elkészítéséhez, ilyen volt például a Pécs-Pogányi sokéves átlagos szélerősség változásának kimutatására készült diagram vagy a BTK-TTK egyetemi mérőállomás sokéves adataiból készített hasonló grafikon. A kutatás során történelmi adatsorokat is felhasználtam melyeket a Simor Ferenc által 1938-ban publikált „*Mecsek éghajlata*” és az 1974-ben, Kéri Menyhért közreműködésével megírt „*A Mecsek hegység éghajlata*” című könyvek adataira alapoztam. A történelmi adatsorok egy részének digitalizálását is Excelben végeztem, majd összehasonlító grafikonokat készítettem a napjainkban mért adatokkal.

Az állomásokat szemléltető térkép és 3D látványkép elkészítéséhez GIS szoftvereket és a Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság, valamint az OSM és a Copernicus program által közölt adatokat használtam fel. Egyrészt QGIS-ben dolgoztam, ahol a mérőállomások koordinátái alapján létrehoztam egy pontokat tartalmazó réteget. Ezen túlmenően az Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóságtól kapott Pécsi épület-állománynak 2D-s alaprajzait és a hozzájuk tartozó magasság-értékeket is ennek a szoftvernek a segítségével, zonal statistics modullal végeztem

el. A magassági adatokat a Copernicus 2012-es 'Building height' adatsorára alapoztam, amely nyílt forrású és online letölthető⁷. A kutatás során használt másik eszköz az egyetemi licenc alatt lévő ArcGIS PRO volt, amelynek segítségével 2D-ben és 3D-ben is szemléltettem a Pécsi mérőműszerek elhelyezkedését. Alapul a Dél-Dunántúli Vízügyi Igazgatóság HydroDEM domborzati modelljét 1,5-szörös magassági torzítással használtam fel.

5.2.2 Szélcsatornák modellezése

Az elemzéshez szükség volt Uránváros épületeinek alaprajzára és magasságára. Első lépésben az alaprajzokat gyűjtöttem le az OpenStreetMap térbeli adatbázisából. Ehhez a QGIS 3.22 szoftver QuickOSM plugin-ját használtam. A modul a célterület (Pécs) megjelölése és az objektumtípus (building) beállítása után automatikusan legyűjti az összes pécsi, adatbázisban szereplő épületet (13. ábra). A rétegről manuálisan eltávolítottam a nem uránvárosi épületeket. Az alaprajzokat a geoinformatikai szoftverekben elterjedt shape (.shp) formárumban elmentettem.

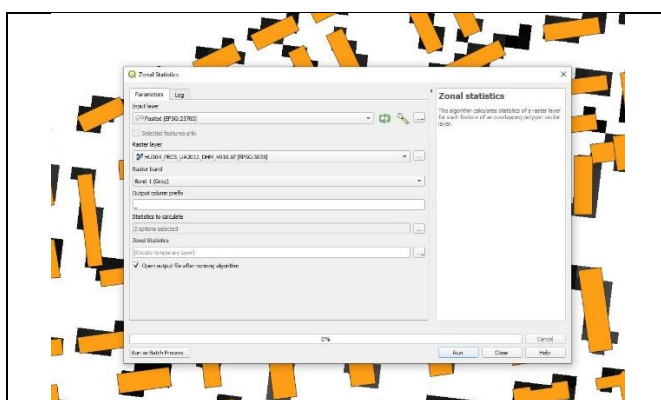


13. ábra: A pécsi épületalaprajzok letöltése a QGIS QuickOSM moduljával (forrás: saját szerkesztés)

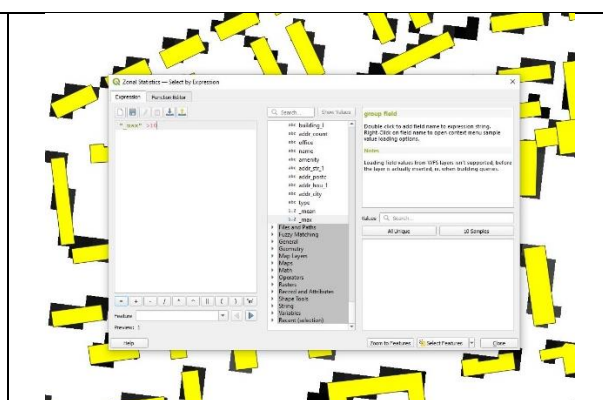
Második lépésben kiválogattam azokat az épületeket, amelyek 10 méternél magasabbak. Erre azért volt szükség, mert a 10 méter alatti magasságban rengeteg olyan objektum van, amit nem tudtam figyelembe venni a modellezésnél. Ilyen objektumok a gépkocsik, szobrok, fák, bokrok, buszmegállók, kioszkok stb. Ezen objektumok figyelmen kívül hagyását az áramlási modellek korlátozott térbeli felbontása is indokolja. Az elemzés tehát egy idealizált környezetben zajlott, ahol csak a 10 méternél (nagyjából három emeletnél) magasabb épületeket vettem figyelembe. Meg kell jegyezni, hogy a területen vannak 10 méternél magasabb fák, amiket nem vettem figyelembe modellezésnél.

⁷ <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/building-height-2012>

A pécsi épületek magasságát mutató raszteres geoinformatikai réteget az European Environment Agency (EEA) Copernicus honlapjáról⁸ töltöttem le. Az épületek vektoros poligonként megjelenített alaprajzát „ráfektettem” az épületmagasságot mutató pixeles rétegre és a QGIS Zonal Statistics moduljával olvastam ki a maximális magassági értéket a poligonok alól (14. ábra). Ezek az értékek beleíródtak a poligon réteg attribútum táblájába. Az Select by Expression modul segítségével kiválogattam a 10 méternél magasabb épületeket (15. ábra). Az épületek magasságát ellenőriztem, és volt olyan épület, ahol az azonos típusú szomszéd épületek alapján módosítottam. Az épületalaprajz réteget HD72/EOV vetületi rendszerbe konvertáltam.

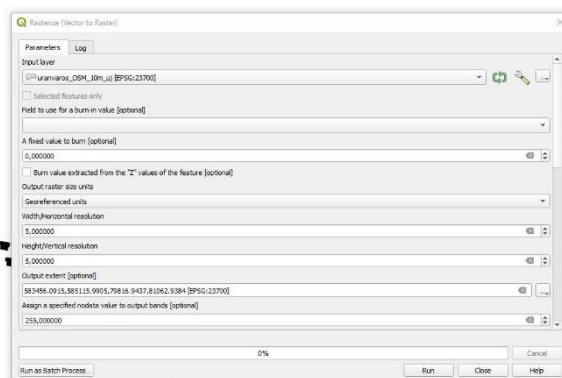


14. ábra: Zonal Statistics modul beállításai az épületmagasságok kiolvasásához (forrás: saját szerkesztés)



15. ábra: A 10 méternél magasabb épületek kiválogatása Select by Expression modullal (forrás: saját szerkesztés)

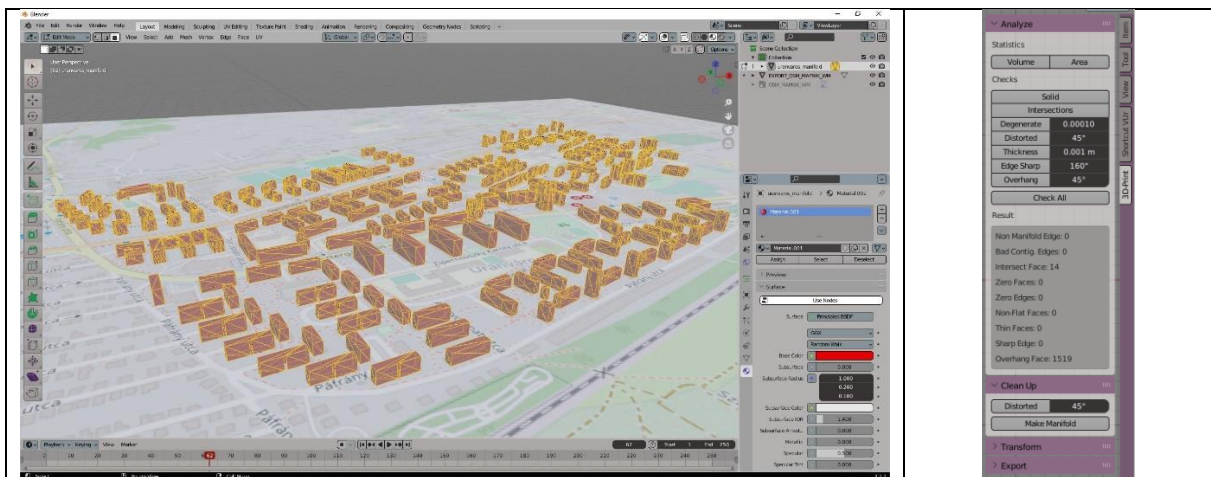
Az így kapott épületalaprajz réteget használtam fel kétdimenziós (2D) és háromdimenziós (3D) szélsőbesség modellezéshez. A 2D modellezéshez a poligonokat raszterizáltam (16. ábra). A pixelek pixelek mérete 5×5 méter lett. Az épületek területe 0, a köztes területek 255 értékű pixelekkal lettek jelölve. Ezt a réteget használtam később a Fowsquare4.0 szoftverben való 2D áramlási modellezéshez.



⁸ <https://land.copernicus.eu/local/urban-atlas/building-height-2012>

16. ábra: Az épületek alaprajzának raszterizálása QGIS szoftverben

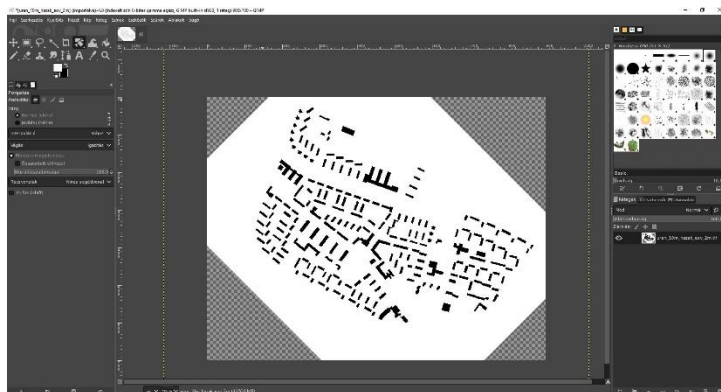
A 3D szélsébség modellezéshez az épületeket az X és Y kiterjedés mellett Z érzékkel (magassággal) is el kellett látni és azokat háromdimenzióssá alakítani. Ehhez a Blender nevű 3D vizualizációs és modellező szoftver BlenderGIS⁹ modulját használtam. A BlenderGIS lehetővé teszi földrajzi koordinátákhoz kötött raszteres és vektoros rétegek méretarányos importálását a szoftverbe. Az épületek Z irányú kiterjedését (extrudálását) a QGIS-ben kiolvasott magassági értékek adták. A térbeli alakzatok (mesh-ek) alapértelmezésben nem zárt alakzatok (nincsen aljuk), ami problémát jelent a modellezésénél. Ezért az épületeket manifold objektummá kellett alakítani a 3D-Print modul (add-on) segítségével. A Manifold objektumok minden oldalról megfelelően zártak, lényegében olyan testet eredményeznek, amiből egy képzeletbeli feltöltés esetén nem tudna kifolyni a víz. A zárt objektumok már teljesen alkalmasak a SimFlow4.0 szoftverben való modellezésre. A 3D épületeket **.stl** (Standard Triangle Language) formátumba exportáltam a Blenderből, amit aztán a SimFlow4.0-be importáltam.



17. ábra: Magassági értékekkel ellátott és Manifoddá alakított épületek a Blender szoftverben (forrás: saját szerkesztés)

A szélsébség modellezések során a négyszögletes modelltér egyik oldala felől fúj a megadott sebességű szél. A modellezés során az volt a legegyszerűbb megoldás, ha a Uránvárost forgatjuk és a modelltér széliránya marad változatlan (mindig fentről, vagy jobbról fúj a szél). Uránváros szélviszonyait mind a 2D, mind a 3D modellezés esetén mind a nyolc fő- és melléktáj irányából megvizsgáltam. Ehhez a 3D mesh épületeket Blender szoftverben, ezzel szemben a 2D raszteres épületalaprajzokat GIMP szoftverben (18. ábra) forgattam körbe 45 fokenként, majd mentettem el külön fájlokba.

⁹ blender.org és <https://github.com/domlysz/BlenderGIS>



18. ábra: Raszteres épületalaprajz réteg forgatása GIMP szoftverben (forrás: saját szerkesztés)

A városi szélcsatornák modellezésére ún. Computational Fluid Dynamics (CFD) szoftvereket használtam, amelyek a Flowsquare¹⁰ (2D) és SimFlow¹¹ (3D) szoftverek voltak. A CFD modellek lehetővé teszik a folyadékáramlás numerikus szimulációját. A CFD modellezés során a folyadék áramlásának vizsgálata a fizikai, esetleg kémiai tulajdonságainak megfelelően történik, mint például a sebesség, nyomás, hőmérséklet, sűrűség, viszkozitás vagy kémiai reakciók. A CFD szoftverek nem csak hagyományos értelemben vett folyadékokban, hanem a gázokban tapasztalható jelenségek, így légköri áramlások modellezésére is alkalmasak. Az elemzés elvégzéséhez a modellteret több altartományra osztja felhasználó, amelyeket celláknak neveznek. Ezeknek a celláknak a kombinációját a számítási struktúrában meshnek (hálónak) nevezik. A megoldandó változók viselkedése az egyes cellákon belül lineárisnak tekinthető, ezért finomabb meshre van szükség azokon a területeken, ahol a fizikai tulajdonságok feltételezhetően hirtelen változnak. A szimuláció során a közegben történő változásokat egymás utáni lépések sorozatával számolja ki a szoftver, az iterációk számát a felhasználó állítja be.¹²

A 2D modellezést a Yuki Minamoto és Manuel Fermin Fonseca által fejlesztett Fowsquare4.0 szoftverrel végeztem (flowsquare.com). A Flowsquare4.0 egy kétdimenziós folyadékdinamika számítási (CFD = Computational Fluid Dynamics) szoftver. Nem csak folyadék-, hanem légmozgásokat is tud szimulálni. Célja, hogy szoftveres környezetet biztosítson oktatási és/vagy tudományos áramlási szimulációk készítéséhez. A Flowsquare ingyenes, nem igényel mély programozási, CAD, mesh készítési és feldolgozási ismereteket (19. ábra). A felhasználás

¹⁰ <http://flowsquare.com/#download>

¹¹ <https://sim-flow.com/download/cfd-simulation-software/>

¹² <https://www.simscale.com/docs/simwiki/cfd-computational-fluid-dynamics/what-is-cfd-computational-fluid-dynamics/>

során egy szöveges fájlba kell megadni a légköri és számítási paramétereket, továbbá a modellteret kell megrajzolni egy 2D grafikai szoftverrel.



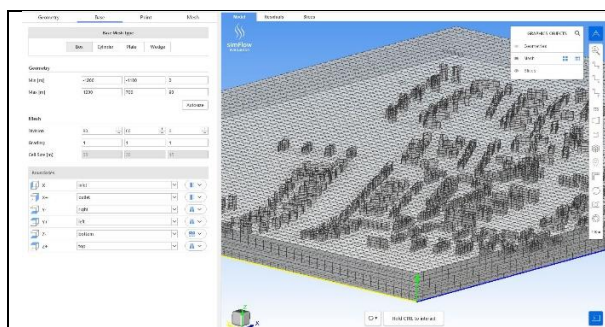
19. ábra: A Flowsquare4.0 a projekt nevének megadása után a megadott modellterben (bc.bmp, középen) a megadott légköri és számítási paraméterek szerint (grid.txt, jobbra) lefuttatja a 2D szimulációt (forrás: saját szerkesztés)

A QGIS-ben raszterizált épületalaprajz réteget .bmp formátumba mentettem GIMP szoftverben. A modellter méretére 500×500 pixelt adtam meg, mert ha túl kevés szabad helyet hagytam a városrész mellett, akkor a szimuláció nem működött. A számítási egységet jelentő pixelek mérete 5×5 méter volt. A Fowsquare4.0 szoftver használati útmutatójában olvasható módon a szél számára átjárhatatlan épületek fekete, az áramlások számára átjárható területek fehér színt kaptak. Kék szín jelöli a kép azon oldalát, ahonnan a szél fúj (inflow). További módosító színek alkalmazására is van lehetőség, de azokra nekem nem volt szükségem. A nyolc darab, fő- és melléktájkának megfelelően elforgatott raszteres fájlt minden esetben bc.bmp (bc = Boundary Condition) néven kellett elmenteni a flowsquare.exe fájljal azonos könyvtárba. A légköri és számítási paramétereket a grid.txt fájlba kellett beírni. Ezekről később lesz szó.

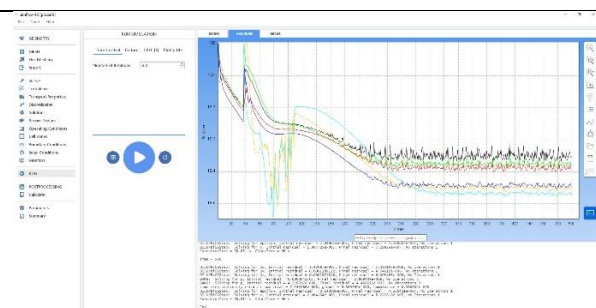
A 3D modellezést a SimFlow4.0 szoftver¹³ demo verziójával készítettem. A SimFlow4.0 egy olyan grafikus felület, amely a csak Linux operációs rendszer alatt futó és kizárólag parancssoros módban működő OpenFoam CFD szoftvernek biztosít Windows alatt is működő grafikus felületet. A korlátozásmentes SimFlow Professional éves bérleti díja 7500 USD, ezért én csak a demo verziót használtam. Ebben a verzióban is elérhető minden funkció, de a 3D mesh háló (modellter) képpontjainak (nodes) száma le van korlátozva 200.000-re és a számítások maximum 2 processzor magon történhetnek. Ez azt jelenti, hogy a modellter térbeli felbontása korlátozott. A modellezésekhez X és Y (horizontális) irányban kb. 30 méter felbontású, Z (vertikális) irányban pedig 15 méter 3D mesh hálót hoztam létre, amely tartalmazta az épületek körvonalát is. Az épületek közvetlen környékén a 3D mesh hálót dupla sűrűségűre állítottam (15×15×7,5 m). Tehát a korlátozás miatt a 3D modellek térbeli felbontása

¹³ sim-flow.com

elmaradt a 2D modelleké mögött. A következő lépésben megadtam a modelltér oldalainak tulajdonságait, pl.: ahonnan a szél fúj, az az inlet, a modelltér alja és az épületek pedig átjárhatatlan falak (20. ábra). A harmadik lépésben megadtam a légköri és számítási paramétereket, majd lefuttattam 500 iterációt (21. ábra).

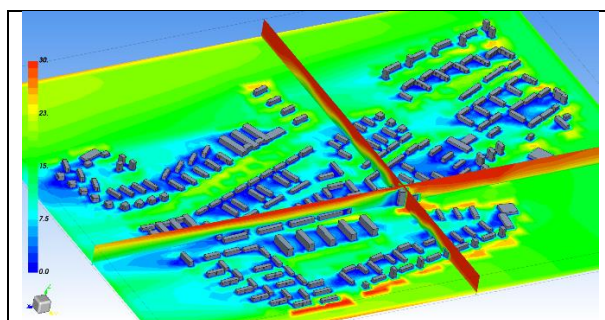


20. ábra: A 3D mesh háló paraméterezése (forrás: saját szerkesztés)

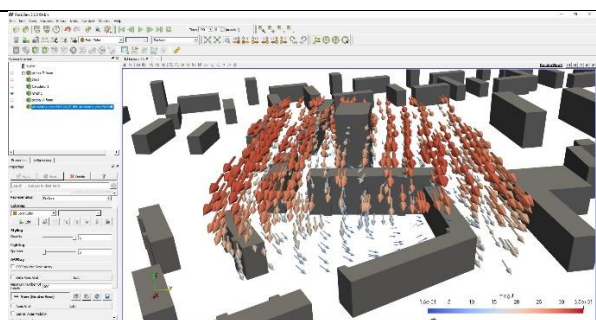


21. ábra: 500 iteráció futtatása (forrás: saját szerkesztés)

A beállítások során megadhatunk több, különböző irányú metszet síkot is. Én minden esetben kértem egy vízszintes metszetet 10 méter magasban, valamint kettő függőleges metszetet, melyek Úránváros legmagasabb, 17 emeletes házánál metszik egymást. A SimFlow ezeket a metszeteket színezi szélsősebesség (m/s) függvényében (22. ábra). A SimFlow egyéb térbeli megjelenítésre önmagában nem képes, azonban a szabadon felhasználható ParaView¹⁴ tudományos vizualizációs szoftver igen. Ebben a szoftverben jelenítettem meg 3D-ben, színes nyilakkal a 3D modellezés eredményeit (23. ábra). Azonban, ha a ParaViewban megjelenítettem az összes mesh cellát jelképező nyilat, akkor az ábra követhetlenné vált az egymásra rakódó rétegek miatt. Ezért csak a felszín felett kb. 10 méter magasságban lévő légáramlás irányát és sebességét mutató nyilakat ábrázoltam az eredmények bemutatásánál.



22. ábra: A SimFlow szoftver által készített térbeli metszetek (forrás: saját szerkesztés)



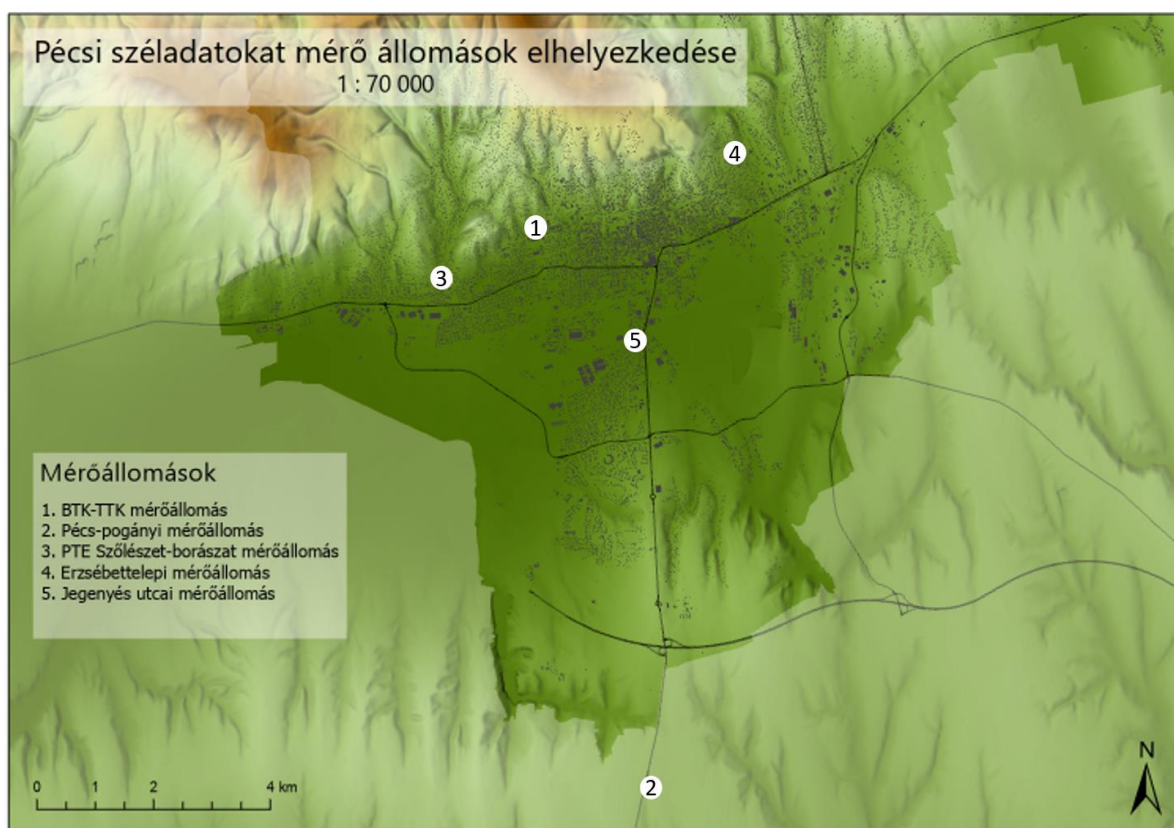
23. ábra: A ParaView szoftver által 3D-ben megjelenített szélirányok Úránvárosban (forrás: saját szerkesztés)

¹⁴ paraview.org

A szélesség modellezés után a kiértékelést QGIS szoftverben végeztem. A cél egy minősítő térkép készítése volt, amely a Flowsquare 4.0 szoftverben elkészített, 5 méter felbontású, nyolc égtáj felőli modellen alapult. A raszteres rétegeket georeferáltam, majd súlyoztam. A súlyozás részben a szélesség, részben a szélirány-gyakoriság szerint történt. Végeredményként egy relatív területminősítő térképet kaptam, aminek a segítségével levontam a szélcsatornákra vonatkozó következtetéseket.

5. Eredmények

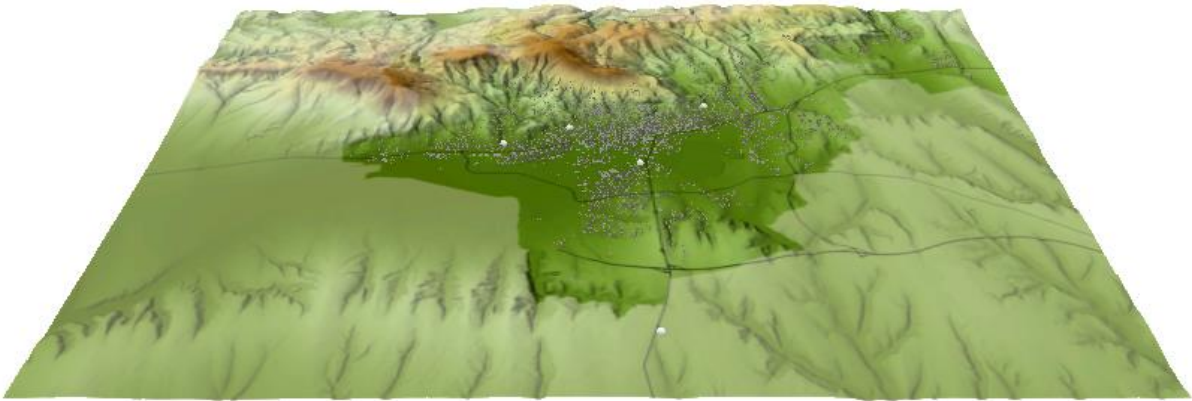
6.1 Térkép és domborzatmodellek



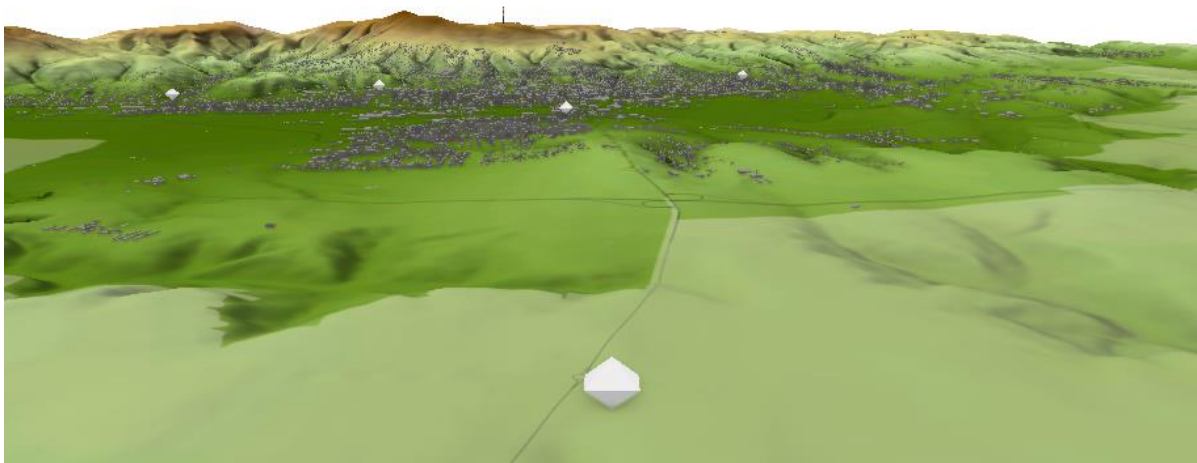
24. ábra: A mérőállomásokról szerkesztett térkép. (forrás: saját szerkesztés)

A (13. – 18.) ábrák a Pécs területén meghatározó domborzati viszonyokat és a vizsgálat során használt mérőállomások elhelyezkedését szemléltetik. Mint láthatjuk, a város legsűrűbben beépített területe a Pécsi-medencében helyezkedik el, és leköveti a K-Ny-i csapásirányt. A mérőállomások elhelyezkedését tekintve szerencsésnek tekinthetjük azt, hogy van köztük városi és vidéki környezetben elhelyezett is.

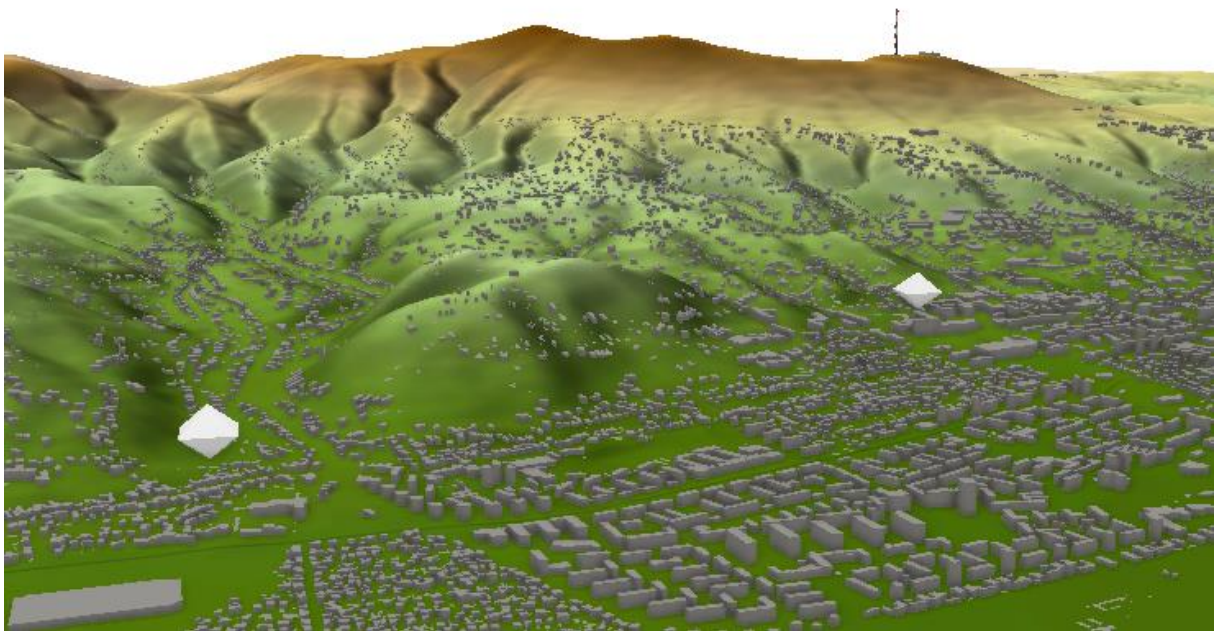
ÁBRA



25. ábra: A mérőállomásokról szerkesztett terepmodell. (forrás: saját szerkesztés)

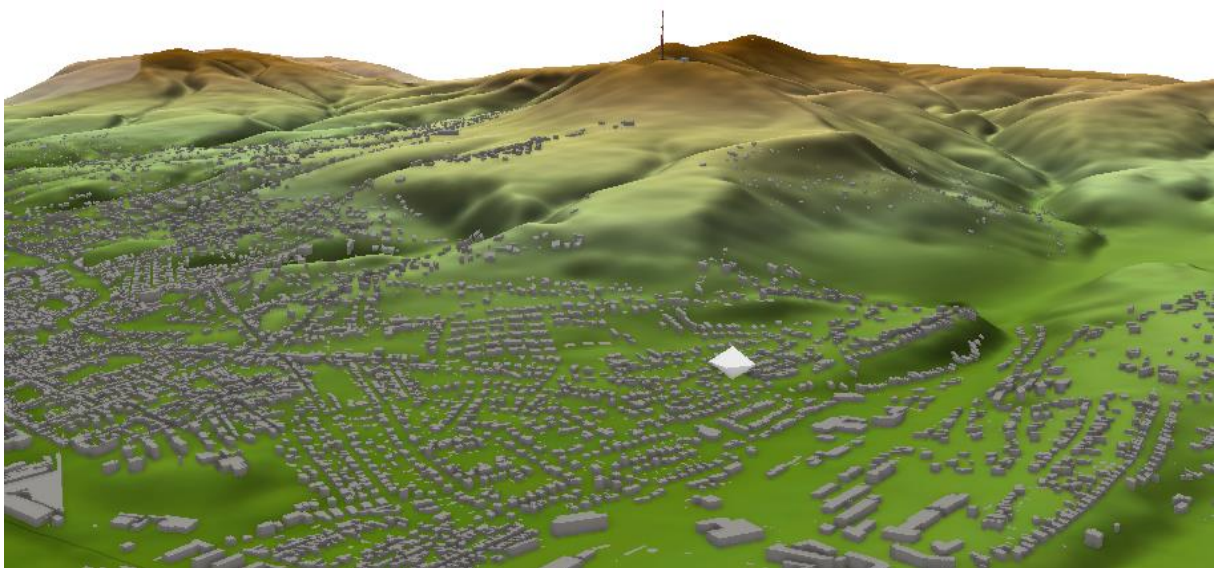


26. ábra: Látkép a Pécs-pogányi reptér mérőállomásáról É-i irányba. (Forrás: saját szerkesztés)

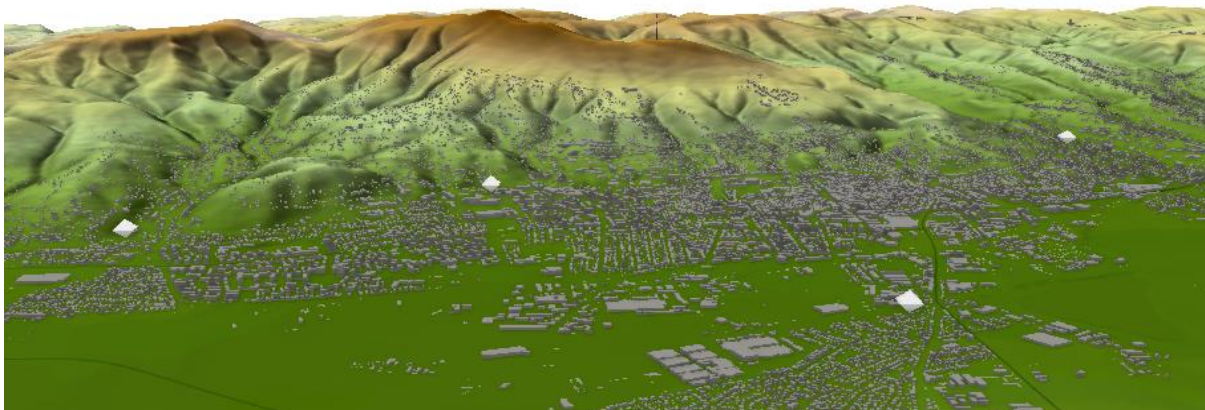


27. ábra: A Szőlészeti és borászati intézet (balra) és a BTK-TTK mérőállomások elhelyezkedése (Forrás: saját szerkesztés)

A felvételeken (ábra sorszáma) szépen kirajzolódnak a Mecsek hegyvonulatairól leérkező völgyek, amelyek sok esetben alacsony és laza beépítésüknek köszönhetően, sok zöld felülettel alkalmas ventillációs folyosóknak tűnnek. Továbbá fontos, hogy ezekre a területekre a későbbiekben se telepítsenek olyan gyárakat vagy légszennyezést növelő ipari létesítményeket, amelyekkel nagy mennyiségű szennyezőanyagot engednének a város sűrűn lakott medenceterületére.



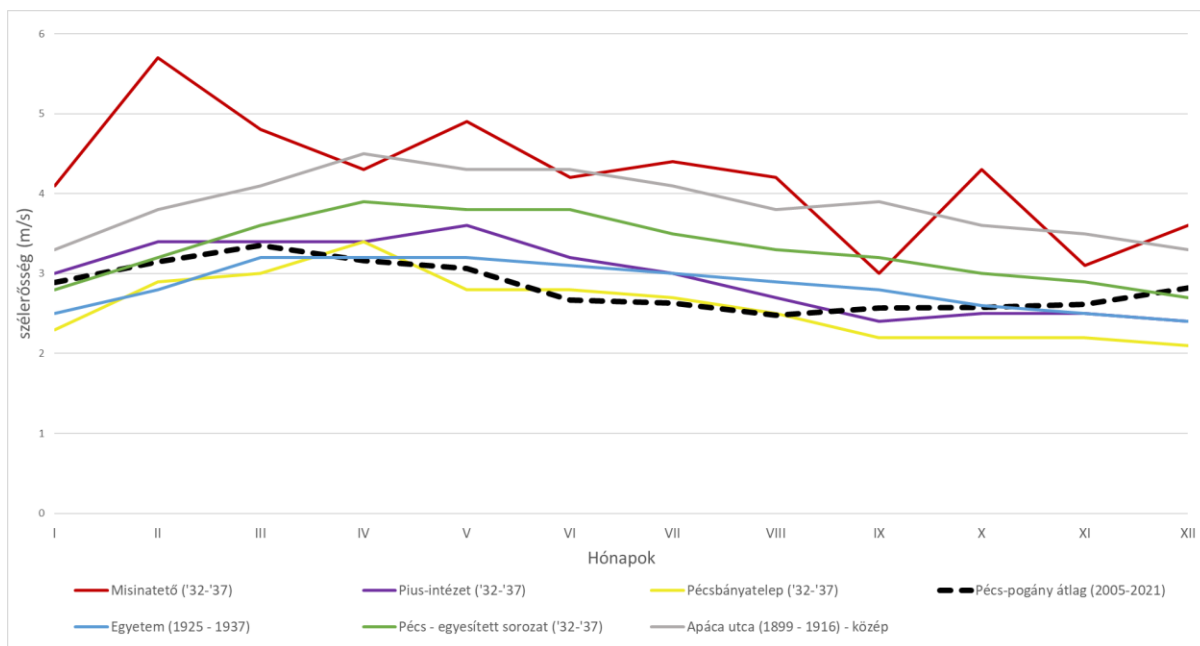
28. ábra: Az Erzsébettelepi mérőállomás DK-i irányból szemlélve. (Forrás: saját szerkesztés)



29. ábra: A Pécs belterületén található mérőállomások elhelyezkedései, D-i irányból szemlélve. (Forrás: saját szerkesztés)

6.2 Mérőállomások adatsorainak elemzése

6.2.1 Történelmi adatsorokkal való egyezés



30. ábra: Történelmi adatsorok összevetése a Pécs-pogányi (2005-2021-es) átlaggal (Forrás: saját szerkesztés, Simor Ferenc által gyűjtött adatok alapján)

A 19. ábra a napjainkban mért átlagos szélérősséget hasonlítja össze történelmi időszakokra vonatkozó átlagos szélérősségekkel, havi bontásban. A Misinatetőn mért kiugró értékek nem meglepőek, mivel a Mecsek 535 méter magas csúcsa jobban kitett, mint a többi, medencehelyzetben vagy szélvédett, lankás hegyoldalban elhelyezett mérőállomása. A többi, átlagosan magasabb városi értékekbe fontos belekalkulálni a korszerűtlen eszközöket és mérési pontatlanságot is. A történelmi adatsorok alapján készült leírásokat átolvasva a következő

megállapításokra letem: „Az év minden szakaszában és a gyengébb szelek kivételével minden szélerősségi csoportban az É-i, ÉNy-i szelek a leggyakoribbak.” (SIMOR, F.,1938). Továbbá, Simor arról is beszámol, hogy gyengébb szelek kategóriájában egyértelműen nagy súlya van a délies iránynak, amelyből a hegy-völgyi szél meglétére következtethetünk. A fentebb idézett megállapítások a jelenlegi mérések adatsoraival összhangban állnak. Mindezek mellett befolyásoló tényezőként megemlítendő a Pécsi-medence K-Ny-i csapásiránya és a Mecsek vonulatairól leereszkedő völgyek, és szélkapuk, amelyek az északi szelek útját vezetik (SIMOR, F., 1938).

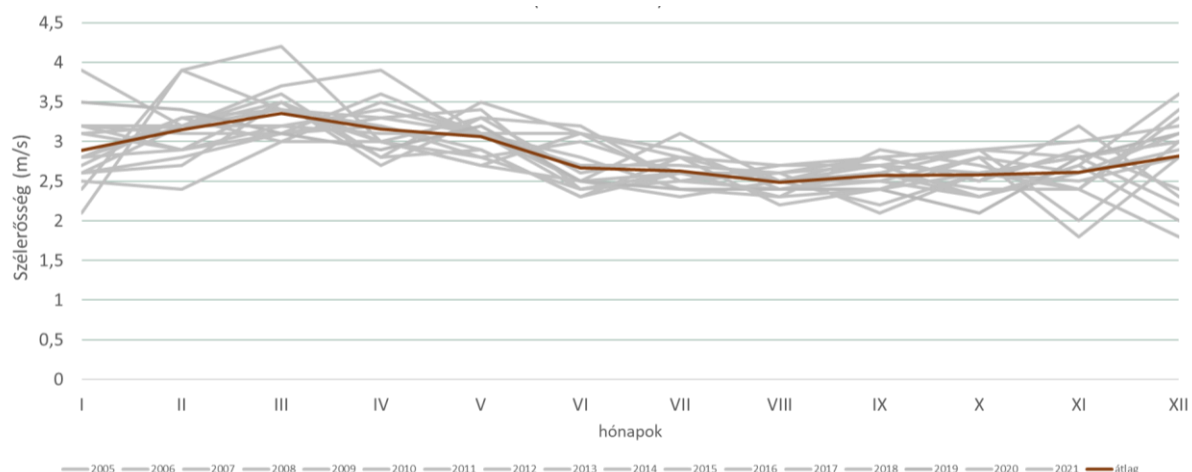
6.2.2 Napjainkban mért értékek elemzése

Először, a több évre visszamenő adatsorok tendenciáit fogom bemutatni, majd, a már említett egy éves, évszakokra bontott állomások közti hasonlóságokat és különbségeket. A diagramokon szereplő m/s értékek értelmezésében a 2.táblázat segít. A Beaufort-skálát, amelyet Francis Beaufort fejlesztett ki 1805-ben, elsődlegesen a tengeri szél megfigyelésére alkalmazták. Ma már széles körben elterjedt, és a szárazföldi szélerősséget is ez alapján kategorizálják.

Beaufort-fokozat	Szélesebesség (m/s)	Meghatározás	Viharjelzés	Hatása a szárazföldön
0	0 – 0,3	Szélcsend	A L A P F O K	A füst egyenesen száll felfelé.
1	0,4 – 1,7	Gyenge szellő, fuvalat		A felszálló füst gyengén ingadozik, a szél alig érezhető.
2	1,8 – 3,1	Enyhe szél		A fák levelei zizegnek, az arcon érezhető a légmozgás.
3	3,2 – 5,3	Gyenge szél		A szél a fák leveleit, vékony hajtásait mozgatja.
4	5,4 – 8,1	Mérsékelt szél		A szél a fák gallyait, kisebb ágait állandóan mozgatja.
5	8,2 – 10,9	Élénk szél		A nagyobb faágak is mozognak, a levegő mozgása jól hallható.
6	11 – 13,7	Erős szél	ELSŐFOK	Már a legvastagabb ágakat is mozgatja, a drótkötelek, villanyvezetékek zúgnak.
7	13,8 – 16,9	Viharos szél		A kisebb fák törzsei erősen hajladoznak, vékonyabb gallyak letörnek. A széllal szemben nehéz a gyaloglás
8	17 – 20	Élénk viharos szél, vihar	M Á S O D O K	A szél a fákról ágakat tör le, a nagyobb fák törzsei is erősen hajladoznak.
9	20,1 – 23,7	Heves vihar		A vihar a gyengébb fákat kidönti, a vastagabb ágakat letöri. Kisebb épületek megrongálódnak, a tetőcserepek lesodródnak.
10	23,8 – 27,9	Dühöngő vihar, szélvész		A vihar gyökereitől forgatja ki a fákat, az épületekben jelentős károk keletkeznek
11	28,0 – 31,9	Heves szélvész		Súlyos anyagi károk, a téglalapítású házak is megsérülnek.
12	32,0 – 33,3	Orkán		A szél épületeket, tetőket rombol, súlyos pusztítást végez.

2. táblázat: Beaufort-skála (Forrás: <https://met.hu/ismertetok/Beaufort-skala.pdf>)

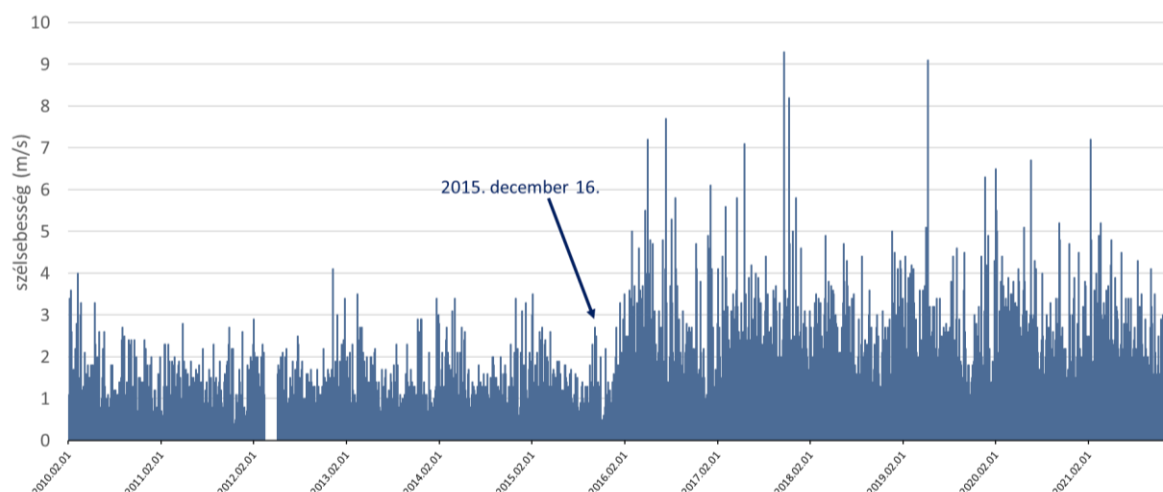
Szélerősség értékek havi bontásban:



31. ábra: A Pécs-pogányi reptér átlagos szélerősség értékei havi bontásban, napi adatok alapján (2005-2021) (Forrás: saját szerkesztés)

A 31. ábráról leolvashatóak a vizsgált időszak (2005-2021) átlagos szélerősség értékek tendenciái az év különböző hónapjaiban. Megállapíthatjuk, hogy az értékek zöme 2 és 4 m/s közé tehető, amelyek maximuma átlagosan a téli-kora tavaszi időszakra tehető. Az átlagos szélerősség értékek minimuma egyértelműen a nyári, illetve kora őszi hónapokban fordul elő. Fontos azonban megjegyezni, hogy ha az egyes éveket külön-külön vizsgáljuk (az ábrán szürke vonallal jelölve), akkor az is látható, hogy a szélesebségek havi átlagai a legnagyobb változékonyságot éppen a téli-kora tavaszi időszakban mutatják.

Az átlagos szélerősség értékek változása áthelyezés hatására:

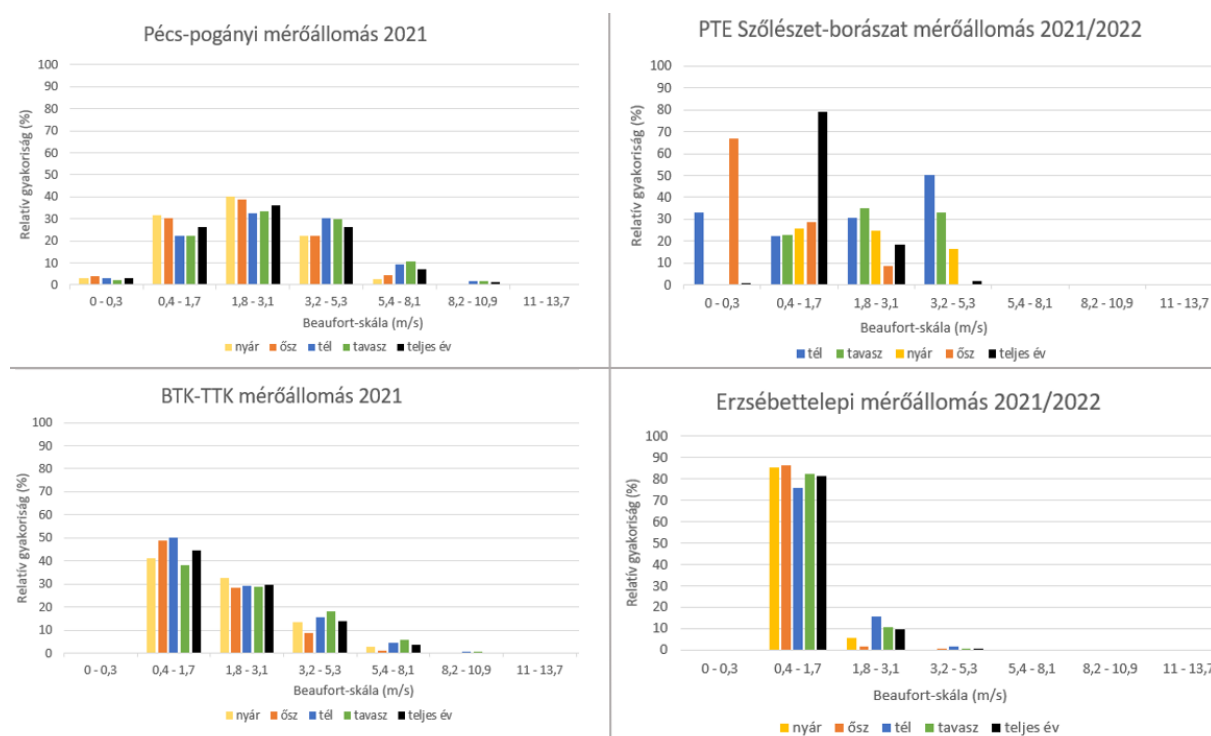


32. ábra: BTK-TTK mérőállomás átlagos szélesebségének változása, napi adatok alapján (2010.02.01.-2021.12.27.) (Forrás: saját szerkesztés)

A 32. ábra a napi átlagos szélesebség értékeket mutatja a BTK-TTK állomásra vonatkozóan. A diagram érdekessége, hogy az egyetem területén lévő állomást 2015 december 16-án

áttelepítették. Az addigi helyszín a botanikus kert és a sportpálya találkozásánál lévő facsoport (szél) árnyékában volt megtalálható. Így a lehelyezett mérőműszer sokkal kisebb értékeket mutatott, mint az áthelyezését követően, mivel annak új helyszíne az egyik egyetemi épület („D”) teteje lett, ahol a szél útja nem akadályozott semmilyen természetes vagy mesterséges tereptárgy által. (A műszer ma körülbelül 20 m magasan van kihelyezve.)

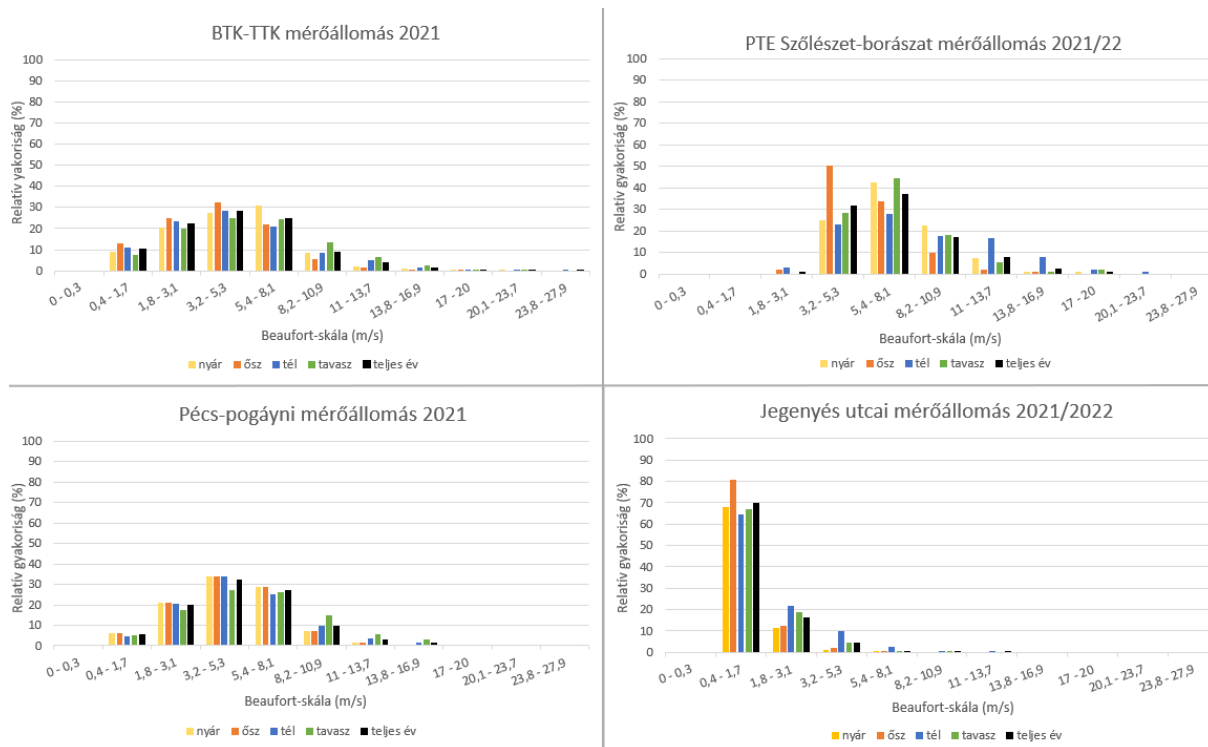
Átlagos szélesebesség évszakos bontásban a különböző mérőállomásokon:



33. ábra: Szélesebesség értékek relatív gyakorisága egy éves mintán/perióduson? (forrás: saját szerkesztés a meteorológiai adatok alapján)

Az 33.ábrán látható négy ábra négy különböző mérőállomás átlagos szélesebesség értékeinek relatív gyakoriságát mutatja egy éven belül évszakonkénti bontásban. Az első két helyszín, mint már korábban is említettem a legmegbízhatóbb, legkevésbé befolyásolt a környezete által. Az Erzsébettelepi mérőállomás kimondottan jó referenciaként szolgál, mivel általa láthatjuk, hogy a házak közé lehelyezett mérőműszer mennyivel nagyobb esetszámot mutat az alacsonyabb szélerősségű kategóriákban. Leggyakoribb átlagos szélerősségnek a 0,4-1,7-ig terjedő 2-es kategóriát (gyenge szellő, fuvallat), az 1,8-3,1-ig terjedő 3-as számú kategóriát (enyhe szél) és a 3,2-5,3 m/s értékekig terjedő 4-es kategóriát (gyenge szél) tekinthetjük. Későbbiekben, a modellezés során is felhasznált adatok a Pécs-pogányi mérőállomás 2005-2021-es napi adatainak összesített szélerősség értékeiből kerültek ki, melyek maximális szélerősség értékei 10 m/s-ot is elérték vagy meghaladták.

Szellőkések erőssége évszakos bontásban a különböző mérőállomásokon:



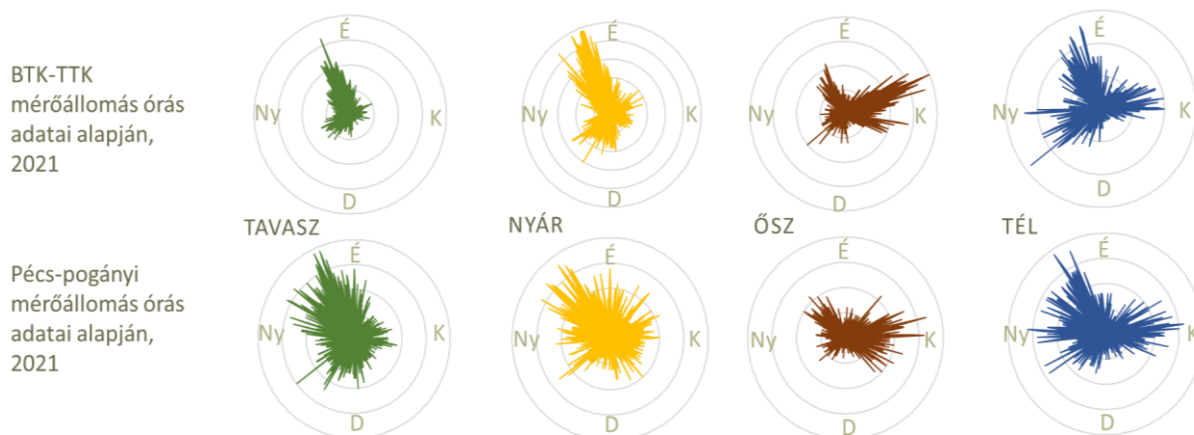
34. ábra: Szállókész értékek négy különböző mérőállomásról (forrás: saját szerkesztés a meteorológiai adatok alapján)

A 34.ábrán látható négy ábra első ránézésre is jól mutatja, hogy az egy évben mért maximális szállókész értékeinek relatív gyakorisága mely kategóriákban volt a legjellemzőbb. Hasonlóan az átlagos szélerősség értékekhez, itt is megjelenítettem egy, lakóépületek között mért értéket (Jegenyés utcai állomás), amely jól mutatja a szélárnyékban lévő mérőműszer alacsonyabb szélerősség kategóriájú szállókész értékek dominanciáját. Míg az átlagos szélsébség értékeknél nem volt feltűnő különbség a PTE Szőlészeti- és Borászati Intézetének mérőállomása és a két OMSZ-os hálózatba tartozó között, addig itt jól megmutatkozik. Ennek oka nem feltétlen a különböző kitettséggel magyarázható, hanem inkább az adatok feldolgozásában keresendő. Mivel a PTE SZBI volt az egyetlen helyszín, amelynek adatait egy napra átlagolva (körülbelül 1400 mérésből) lehetett letölteni. Ez azt jelenti, hogy minden nap maximális szállókészének értékét abból a körülbelül 1400 mérésből választja ki, így természetesen alacsony értékeket kisebb eséllyel kaphatunk. A többi állomáson óras adatokkal dolgoztam, így abba belekerültek olyan szélsébségszebb időszakok maximális szállókész értékei, amelyek az alacsonyabb kategóriákat erősítik.

Szélirányok évszakos bontásban:

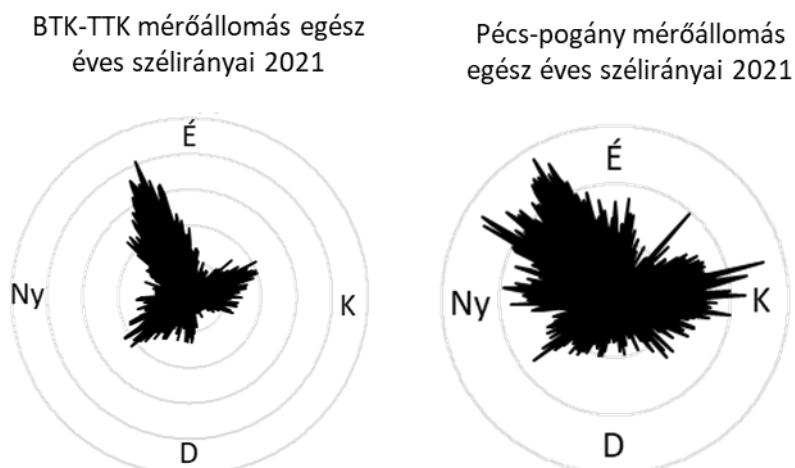
Először is, a BTK-TTK és a Pécs-pogányi mérőállomások adatairól láthatunk egy összefoglaló képet (35. ábra), amely alapján megállapíthatjuk, hogy a tavaszi és a nyári évszakokban meghatározó szélirány észak-északnyugati túlsúlyt mutat. Az év másik felében ősszel és télen

pedig megjelenik egy erős keleties irány (téli Ny-DNy is), néhol esetszámban megelőzve az északias-északnyugatias szeleket.



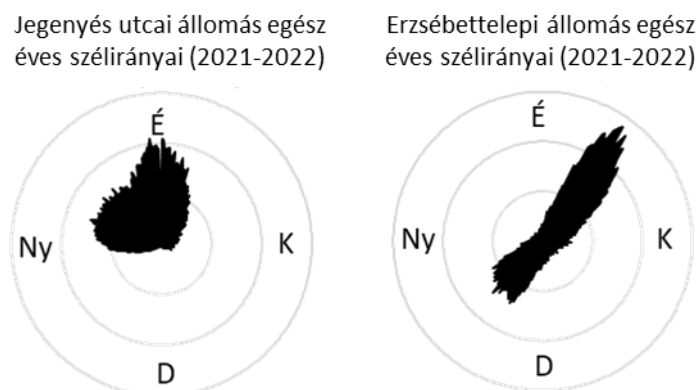
35. ábra: A különböző évszakok jellemző szélirányai a BTK-TTK és a Pécs-pogányi reptéren (forrás: saját szerkesztés a mérési adatok alapján)

Szélirányok éves eloszlása:



36. ábra: BTK-TTK és Pécs-pogányi állomás éves jellemző szélirányai (forrás: saját szerkesztés)

A következő ábrán (36. ábra) azt láthatjuk, hogy a tereptárgyak árnyékoló hatása nélkül milyen szélrózsákat kaptunk a két OMSZ mérési ponton. Így megállapíthatjuk, hogy a leginkább kiemelendő szélirányok az észak-északnyugati irányúak, valamint a kelet-északkeletiek. A BTK-TTK mérőállomásán a K-ÉK irány mellett hasonló súllyal szerepelnek a Ny-DNy-i szélirányok is.



37. ábra: Egész éves szélrózsák a Jegenyész utcai és az Erzsébettelepi mérőállomásról (2021 nyár- 2022nyár) (forrás: sajátm szerkesztés a mérőállomások adatai alapján)

A következő ábrán (37. ábra) pedig a két, lakóházak között elhelyezkedő mérőállomás éves értékeit láthatjuk. Ezek a szélrózsák jól mutatják, milyen az, ha a környezet bizonyos irányokból szélárnyékot képez. Míg a Jegenyész utcai állomás esetén Ny-ÉNy-É-i irányok szerepelnek egyedül, addig az Erzsébettelepi állomás esetén ezek az irányok teljesen hiányoznak.

6.3 Kétdimenziós szélesebbesség modellezés és annak eredményei

A kétdimenziós szélesebbesség, szélcsatorna modellezéseket a Fowsquare 4.0 szoftverrel végeztem. A szoftver honlapján¹⁵ részletes információk olvashatók a számítások fizikai háttéréről és több előre elkészített példa (tutorial) is látható. Ezek alapján töltöttem ki a légköri és számítási paramétereket a **grid.txt** fájlban, amelyet a szimuláció során a szoftver beolvas.

A modellezés során beállított pontos paraméterekkel (1. sz. függelék) nyolc szimulációt végeztem a nyolc égtájnak (fő- és mellék) megfelelően. A **grid.txt** beállítási változatlanok voltak, de a **bc.bmp** képfájlban Úránváros fekete pixelekkkel jelölt épületeit minden alkalommal 45 fokkal elforgattam így a légköri beáramlás iránya minden esetben fentről lefelé történt. A z eredmény eléréséhez a városban mért legmagasabb szélesebbességet, azaz 10 m/s-ot állítottam be.

A kapott eredmények alapján úgy láttam, hogy a szimuláció a 250. lépés után abba az irányba megy el, hogy a légáramlás egyszerűen kikerüli az egész városrészt a mellette meghagyott üres területeken, ezért releváns eredményként minden esetben a 250-es képkockát fogadtuk el.

¹⁵ http://flowsquare.com/Download4/Users_Guide.pdf

Modellezéshez használt paraméterek:

1. a modelltér (domain) adatai:

- $cmode = 0$, azaz olyan szimulációs módot használtam, ahol a léggör nem lép reakcióba semmivel (Non-reacting flow simulation),
- az n_x és az $n_y = 500$, azaz modelltér mérete X és Y irányban is 500 pixel,
- az l_x és $l_y = 5$, azaz a pixelek X és Y irányú kiterjedése 5 méter.

2. A modelltér celláiban (fehér pixelek) érvényesülő fizikai paraméterek:

- $perikey = 0$, azaz nem alkalmaztam periodikus határfeltételt,
- $pres0 = 1,0E+05$, azaz standard tengerszinti légnyomás értéket használtam (101325 Pa)
- $uin0 = 0$, azaz horizontális irányban nincsen kezdeti légáramlás,
- $vin0 = -10,0$, azaz vertikális irányban van egy kezdeti 10 m/s sebességű leáramlás minden cellában,
- $\rho_0 = 1,2$, azaz a fehér cellákat kitöltő levegő átlagos sűrűsége $1,2 \text{ kg/m}^3$.

3. A beáramlási (inflow) oldal (kék pixelek) fizikai paraméterei:

- $uin1 = 0$, azaz horizontális irányban nincsen kezdeti légáramlás,
- $vin1 = -10,0$, azaz vertikális irányban van egy kezdeti 10 m/s sebességű leáramlás minden cellában,
- $\rho_1 = 1,2$, azaz a kék cellákat kitöltő levegő átlagos sűrűsége $1,2 \text{ kg/m}^3$.

4. A szimuláció lépésszáma:

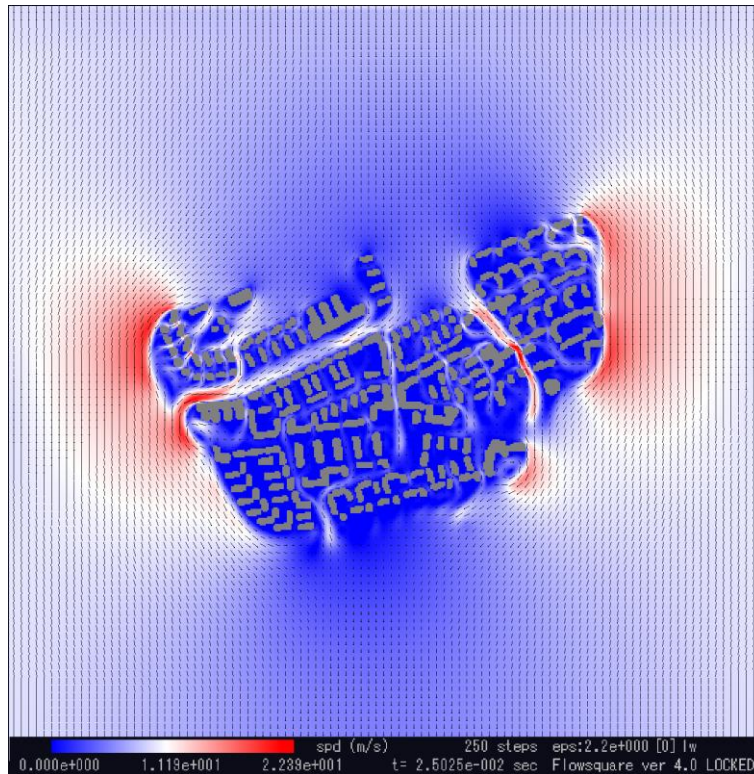
- $sts = 0$, azaz a szimuláció a 0. lépéstől kezdődik,
- $latts = 1500$, azaz a szimuláció az 1500. lépésnél fejeződik be,
- $cflfac = 10$, azaz az időfaktor növekedési sebessége a szimuláció során (ajánlott 10 és 20 között).

5. A légáramlás modellezéséhez a szoftver útmutatója által javasolt beállításokat használtam:

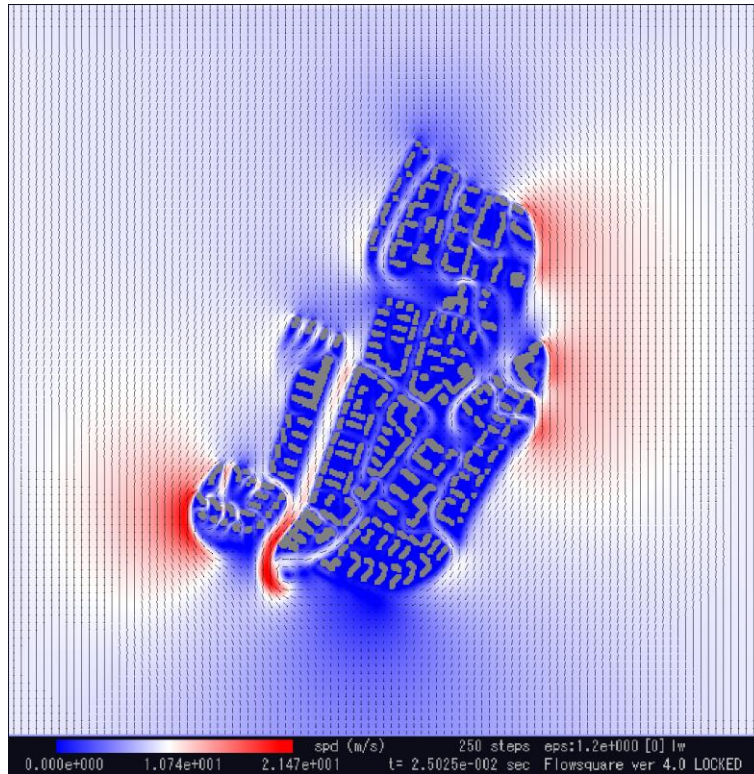
- $iorder = 2:2nd+LW$, azaz a paraméter számításhoz másodrendű differenciálegyenletet és másodrendű Lax-Wendroff formulát használ a szoftver,
- $nfil = 1$, azaz minden időbeli lépést elvégez a szoftver,
- $wfil = 0,1$, azaz a számítások stabilizálásához szükséges szűrő minimális méretre van állítva,
- $\omega = 1,8$, ami a Poisson-egyenlet ajánlott relaxációs paraméter beállítása,
- $peps = 1.0E-1$ a Poisson-egyenlet ajánlott konvergencia toleranciája Tolerance of convergence for Poisson's equation
- $loopmax = 200$, ami az iterációk maximális száma a Poisson-egyenlethez,
- $wdrho = 1$ (ajánlott érték)
- $\mu = 1,8$, mivel a levegő dinamikus viszkozitása $1.8E-5 \text{ (kg/m/s)}$.

6. A szimuláció eredményeképpen kapott képfájlok beállítása:

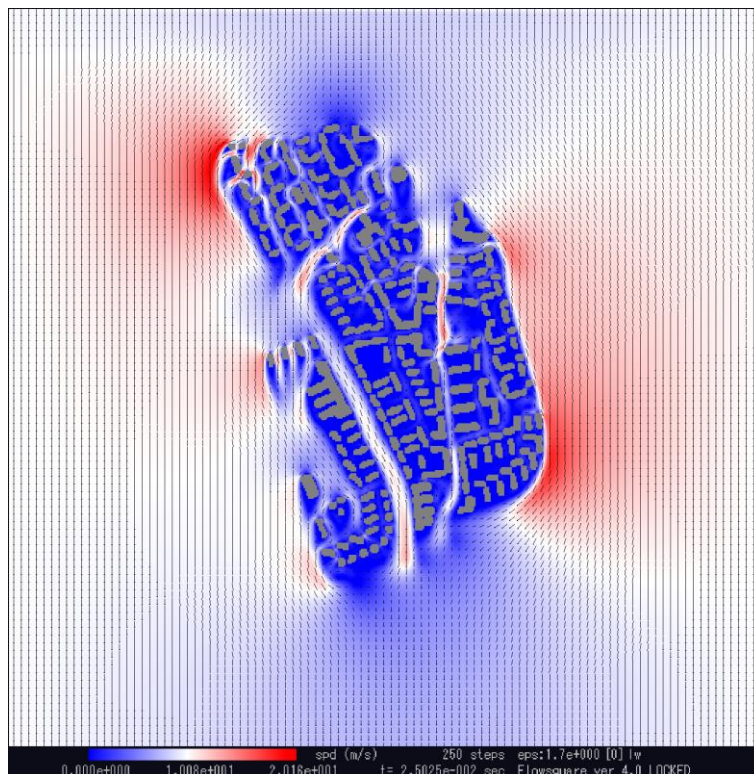
- box = 3, azaz a megjelenített BMP képeken egy szimulációs cella 3×3 pixel nagyságú, tehát az eredetileg 500×500 pixeles modelltér az output ábrákon kb. 1500×1500 pixel méretben jelent meg,
- nfig = 10, azaz minden 10. lépés eredményét menti ki képfájlba,
- nfile = 500, azaz minden 500. lépést menti ki dump fájlba,
- bcdisp = 1, azaz a BMP fájlban van kerete,
- idisp = 4, azaz a BMP kép a levegő sebessége szerint van színezve,
- icolor = 2, azaz a színezéshez a Nishiki nevű (kék-fehér-piros) színátment skálát használtam,
- ivec = 1, azaz fekete színű vektor nyilakat használtam az áramlás irányának jelölésére,
- ndiv = 5, ami a megjelenített vektor nyilak közötti (nem jelölt) grid pontok számát mutatja,
- vecsize = 2, ami a vektor nyíl méretét jelöli pixelben.



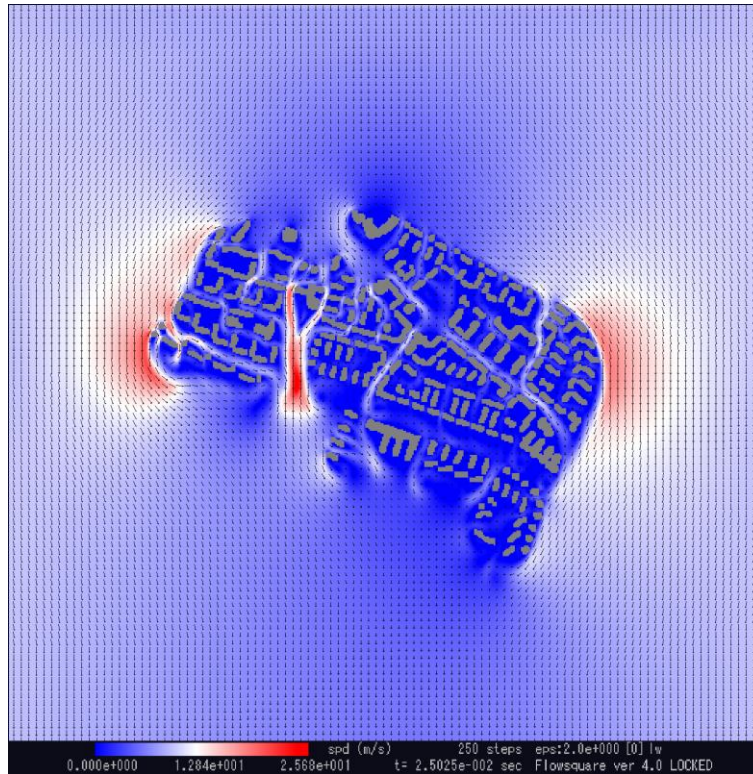
38. ábra: Modellezett szélesebesség Uránvárosban és környékén északi szél esetén (a képen észak van fent)



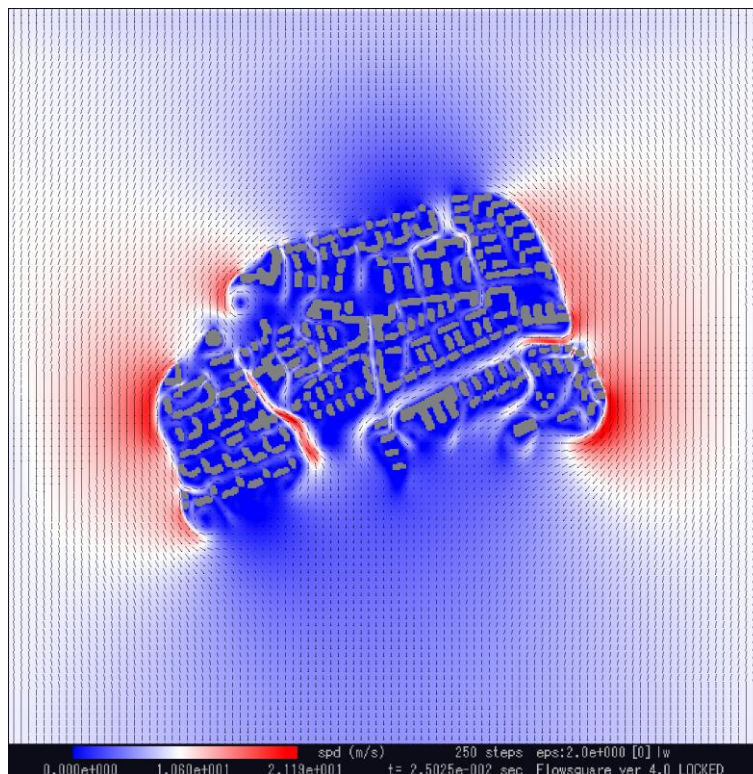
39. ábra: Modellezett szélsébség Úránvárosban és környékén északkeleti szél esetén (a képen északkelet van fent)



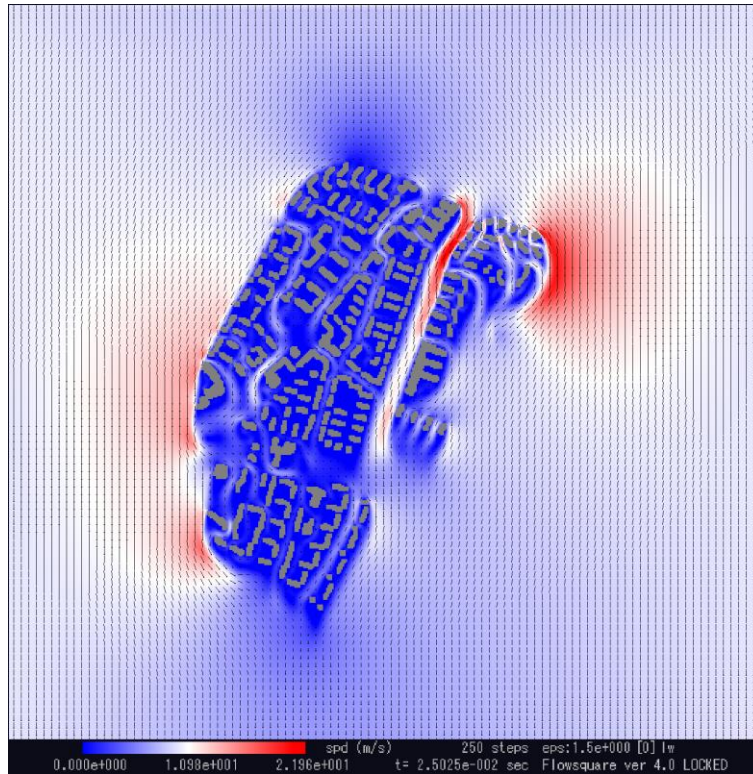
40. ábra: Modellezett szélsébség Úránvárosban és környékén keleti szél esetén (a képen kelet van fent)



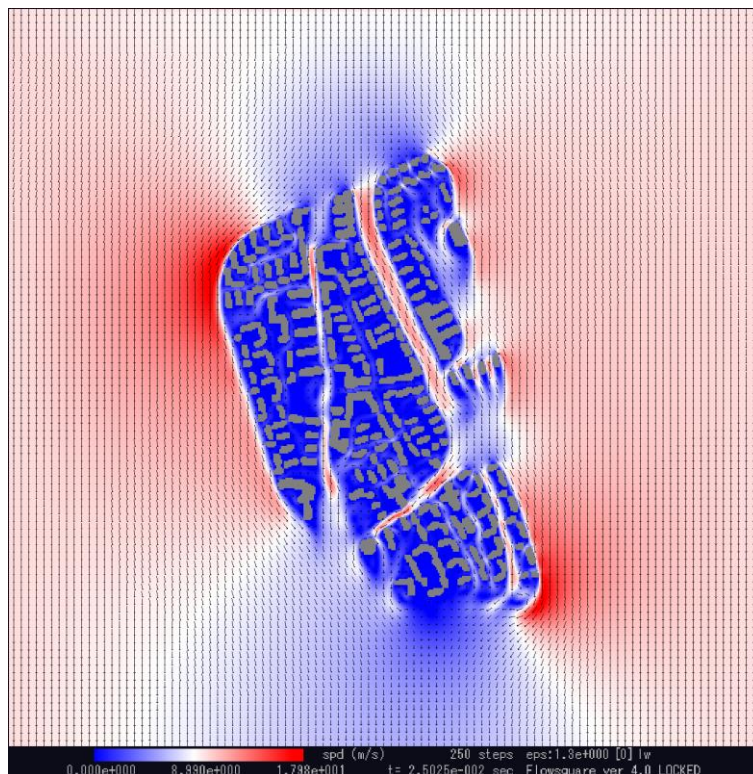
41. ábra: Modellezett szélsébség Uránvárosban és környékén délkeleti szél esetén (a képen délkelet van fent)



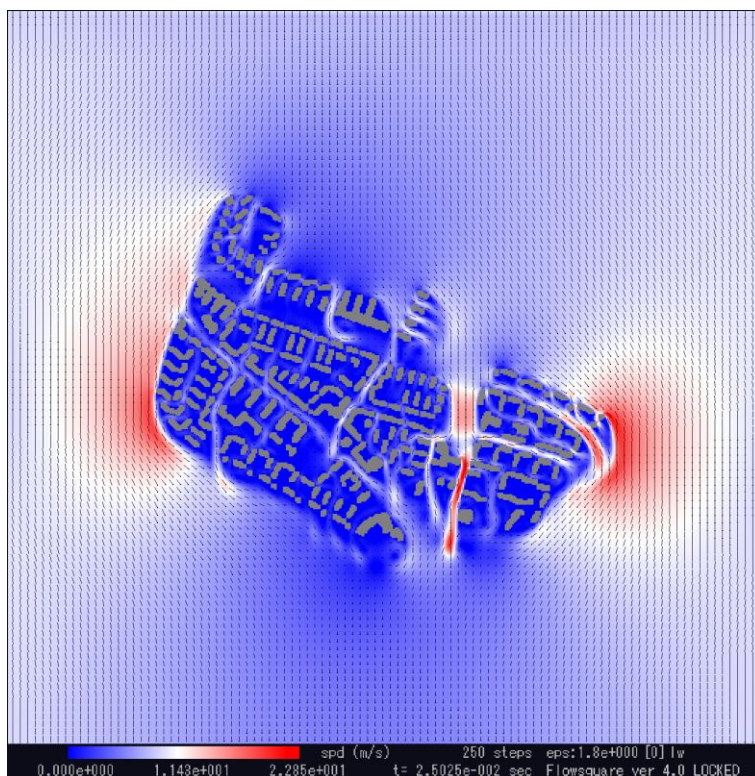
42. ábra: Modellezett szélsébség Uránvárosban és környékén déli szél esetén (a képen dél van fent)



43. ábra: Modellezett szélsébség Uránvárosban és környékén délnyugati szél esetén (a képen délnyugat van fent)



44. ábra: Modellezett szélsébség Uránvárosban és környékén nyugati szél esetén (a képen nyugat van fent)



45. ábra: Modellezett szélesség Uránvárosban és környékén északnyugati szél esetén (a képen északnyugat van fent)

6.4 Háromdimenziós modellezés

A háromdimenziós szélesség modellezést a SimFlow 4.0 szoftverrel végeztem.

A modellezés lépései a következők voltak:

1. A Geometry (Geometria) főmenüben megnyitottam a Blenderből exportált *.stl fájlt, ami az épületek 3D modelljét tartalmazza.
2. A Hex Mesxing főmenüben van lehetőség előállítani a 3D mesh hálót (modellteret). Ez a modul nem csak szabályos téglatest, hanem szabálytalan alakú cellák előállítására is képes.
 - A Geometry (Geometria) almenü Meshong Properties ablakában beállítottam a mesh finomságát. Az épületek környékén engedélyeztem, hogy a mesh háló kétszer sűrűbb legyen, mint az épületektől távolabb.
 - A Base (Alapbeállítások) almenüben a mesh típusát Box-ra állítottam, majd minden esetben olyan X és Y határokat állítottam be, hogy azok kb. 200 méterrel terjedjenek Uránváros határain túl. Z irányban a magasságot 90 méterre állítottam. A Division (felosztás) ablakban állítottam be, hogy a 3D mesh háló felbontása horizontálisan kb. 30 méter, vertikálisan 15 méter legyen. A Boundaries ablakban beállítottam, hogy 3D mesh melyik oldala legyen a beáramlási felület (inlet), melyik a kiáramlási (outlet), valamint az oldalfalakat és az alsó és felső határoló oldalt, valamint ezek típusait.

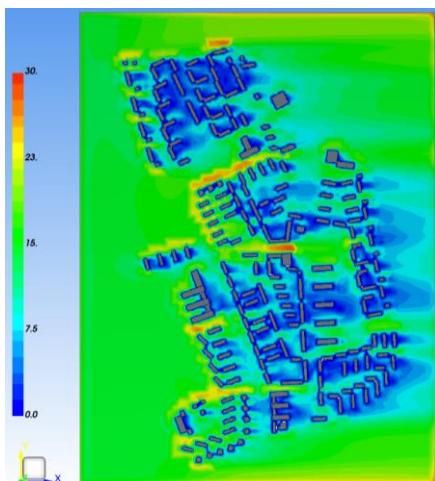
- A Point (Pont) almenüben megadtam egy pontot, ami az épületeken kívül, de a 3D mesh-en belül helyezkedik el. Ez segít a szoftvernek a felosztandó térrész beazonosításában.
 - A Mesh almenüben pedig elindítottam a 3D mesh háló generálását. Ez több esetben sikertelen volt, mert meghaladta a 200.000 node-ot. Más esetben azért kellett újra generálni, mert a szerkezetében volt hiba és a később ismertetett modell futtatás után a folyamat hibajelzést adott.
3. A Setup (Beállítás) főmenüben az időben Steady State (állandó) értéket állítottam be. Ez azt jelenti, hogy a megoldás során a rendszer változói az idővel lineárisan változnak az erőhatással együtt. Szemben a Transient szimulációval, amikor is az időben változó erőhatás miatt a rendszer változói nemlineárisan módosulnak. Az áramló gázt pedig a összenyomhatatlannak (Incompressible) vettem. Végül a SIMPLE megoldó eszközt választottam, amely többek között figyelembe veszi a turbulenciát.
 4. A Turbulence (Turbulencia) főmenüben lehetőség van lamináris (kis szélességek esetén ajánlott, lamináris áramlás modellezésére), RANS (Reynolds-Averaged Navier Stokes, optimális számítási kapacitási és pontosság), valamint LES (Large Eddy Simulation, jelentős számítási kapacitást igényel) opciók közül választani. A számítások során a RANS turbulencia modellt, azon belül a RNG k- ϵ verziót választottam a szakirodalomra támaszkodva. A turbulencia k-epsilon (k: turbulens kinetikus energia\epsilon: turbulens kinetikus energia disszipációjának sebessége) modellje a legelterjedtebb a turbulens áramlási feltételek átlagos áramlási jellemzőinek szimulálására.
 5. A Boundary conditions (határfeltételek/peremfeltételek beállítása) főmenüben a beáramlási (inlet) felület típusát Atmospheric Inletre (Légköri áramlásra) állítottam. Továbbá beállítottam az áramlás irányát (a határra merőleges áramlás, ami jelen esetben jobbról-balra való áramlási irányt jelent), valamint az áramlás kezdő sebességét (U_{ref}) 2D modellezéshez hasonlóan 10 m/s-nak vettem a referencia magasságban ($Z_{ref} = 1$ m). Idealizált modellünkben nem szerepelnek bokrok, fák és más tereptárgyak, maximum füves terület, így az Aerodynamic roughness length (érdességi magasság) Z_0 értékét 0,1 m-re állítottam, azaz feltételeztem, hogy a szélesség ebben a magasságban, illetve ez alatt válik nullává.
 6. A Monitors főmenü Sampling (Mintázás) almenüjében állítottam be minden esetben egy felszín felett 10 méter magasban húzott vízszintes és kettő függőleges, egymásra merőleges metszet sík helyzetét, ami később megtekinthetővé vált a SimFlow megjelenítő ablakában. Itt tudtam beállítani, hogy a különböző számítható jellemzők közül én csak a szélességre (U) vagyok kíváncsi.

7. A Run (Futtatás) főmenü Time Control almenüjében minden esetben beállítottam az iterációk számát 500-ra. Az Output almenüben beállítottam, hogy minden 10. iteráció eredményét mentse el. A Run parancs kiadása után a modellszámítás elindult és ha minden előkészítés jó volt, akkor rendben le is futott.
8. A kapott szélesség eredményeket, pontosabban annak három metszetét megjelenítette a SimFlow 4.0, amit minden esetben képfájlba mentettem.

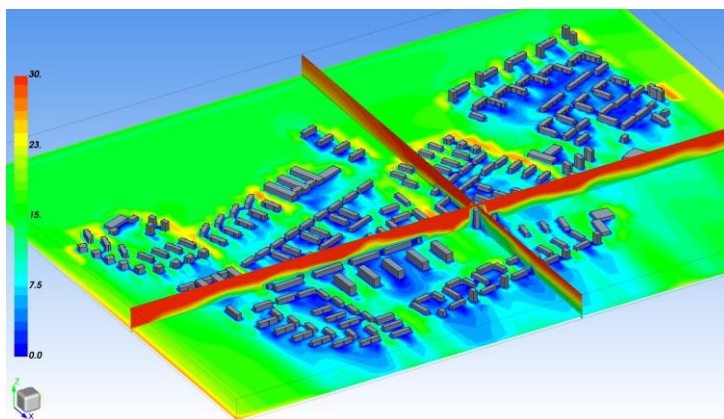
A SimFlow 4.0 megjelenítési lehetőségei korlátozottak, ezért a SimFlow-al együtt feltelepülő ParaView vizualizációs szoftvert használtam a légáramlatok szemléletesebb megjelenítésére.

1. Első lépésben megnyitottam az aktuális *.foam fájlt. Ez tartalmazza a 3D mesh háló minden cellájában a számított adatokat.
2. A Clip (Vágás) menüben meghatároztam egy olyan box (téglatest) típusú térrészt, ami belül megjelentek a 3D adatok, azon kívül nem. Ez 10 méter átlagos magasságban, plusz-mínusz a 3D mesh 5%-ig terjedt. Erre azért volt szükség, mert ha minden mesh cellához rendelt szélirányt és sebességet megjeleníték nyíl formájában, akkor a felső, házak feletti szint szimbólumai eltakarják az alsó, házak közötti áramlási szimbólumokat.
3. A következő lépésben a Calculator, majd a Glyph (Karakter szimbólumok) menük használatával létrehoztam a 3D mesh cellákhoz kötődő nyíl szimbólumokat, amelyek nagysága és színe a szélesség függvényében változik, az irányuk pedig az adott cellában modellezett szélirányt mutatja.
4. A végső lépésben sematikus színekkel hozzá adtam a talajszintet és az épületeket. Ezek így kiemelik a nyilakat és azok jobban következővé válnak. A végeredményt elmentettem képfájlba.

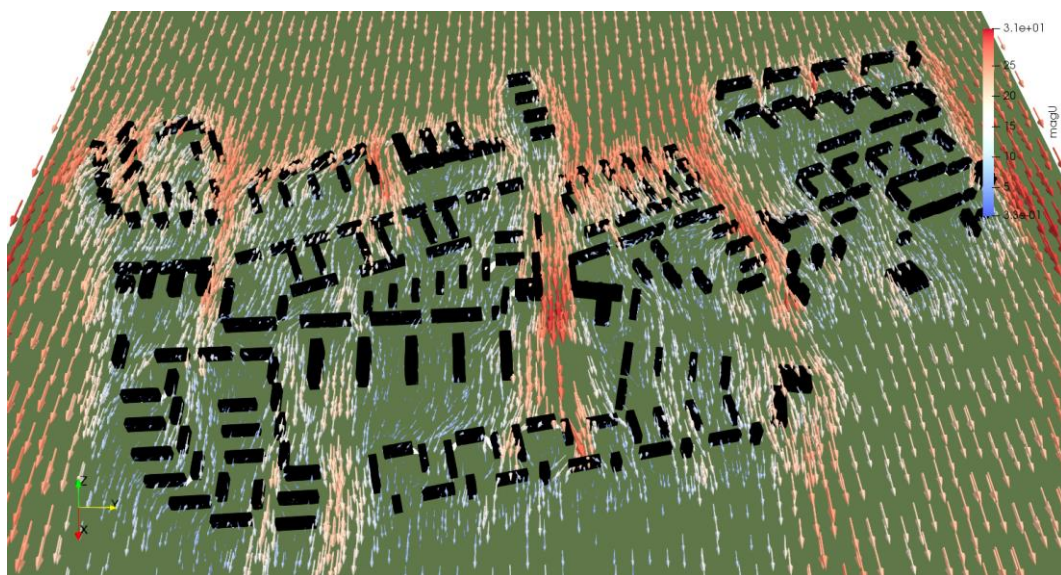
A 3D szimulációt is elkészítettem mind a nyolc fő- és mellékégtájra. Meg kell említeni, hogy bár az így kapott eredmények látványosabbak, mint a 2D modellezés felülnézeti „térképei”, de a 3D mesh háló térbeli felbontása rosszabb (15-30 méter), mint a 2D modellé (5 méter).



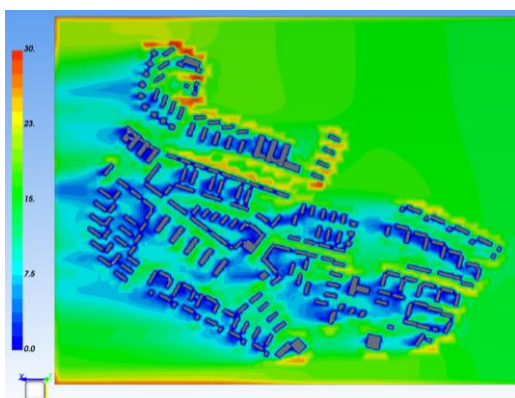
50.A. ábra: Szélességek ábrázolása SimFlow horizontális metszetén, északi szél esetén (észak jobbra)



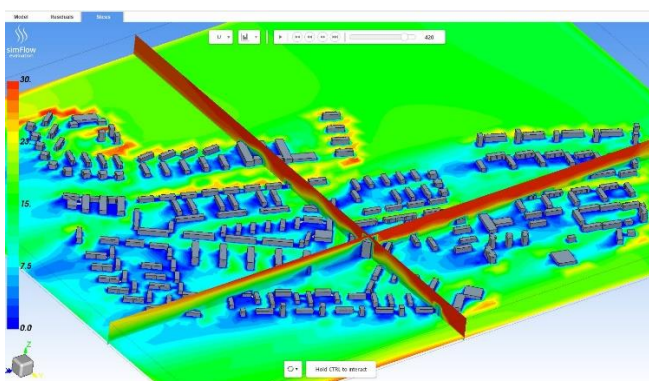
50.B. ábra: Szélességek ábrázolása SimFlow horizontális és vertikális metszetein, északi szél esetén



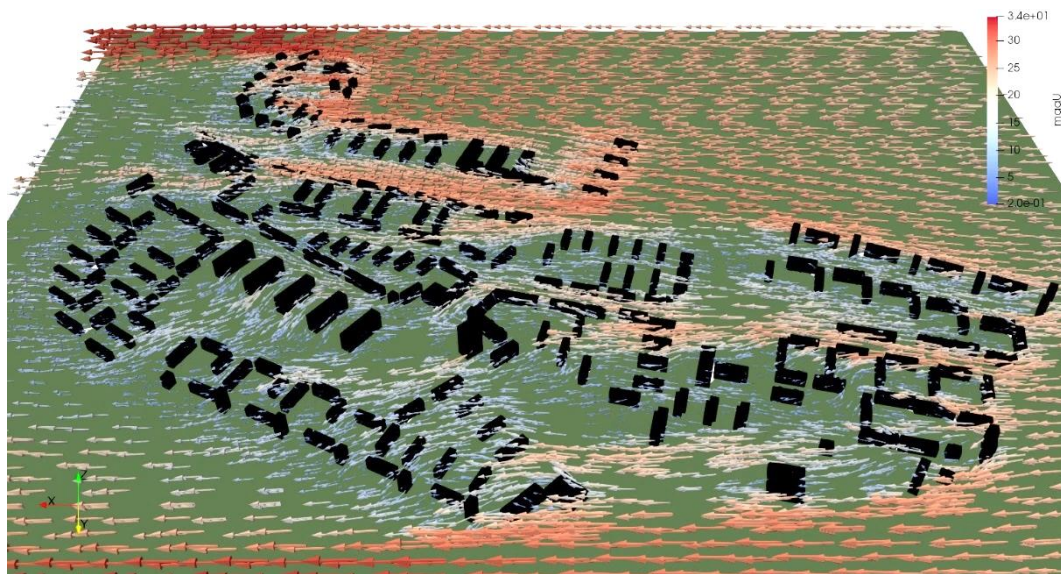
50.C. ábra: Szélességek ábrázolása ParaView szoftverben, északi szél esetén



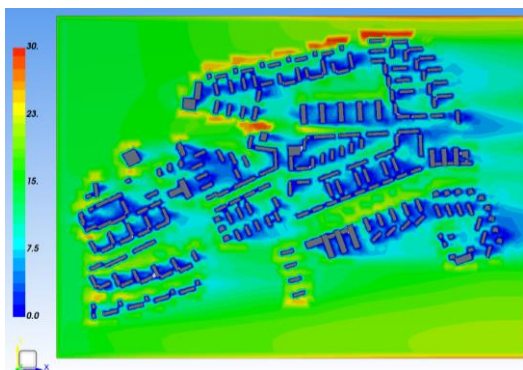
51.A. ábra: Szélességek ábrázolása SimFlow horizontális metszetén, északkeleti szél esetén (északkelet jobbra)



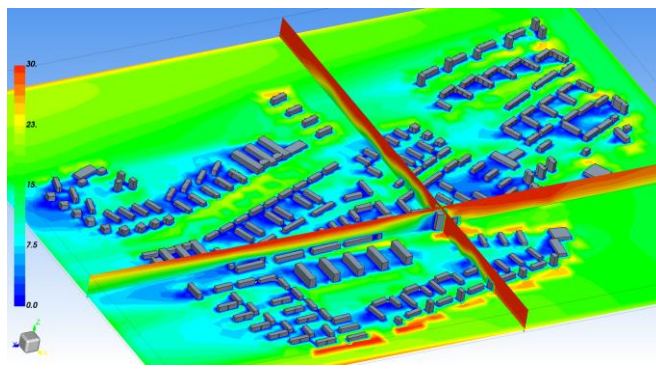
51.B. ábra: Szélességek ábrázolása SimFlow horizontális és vertikális metszetein, északkeleti szél esetén



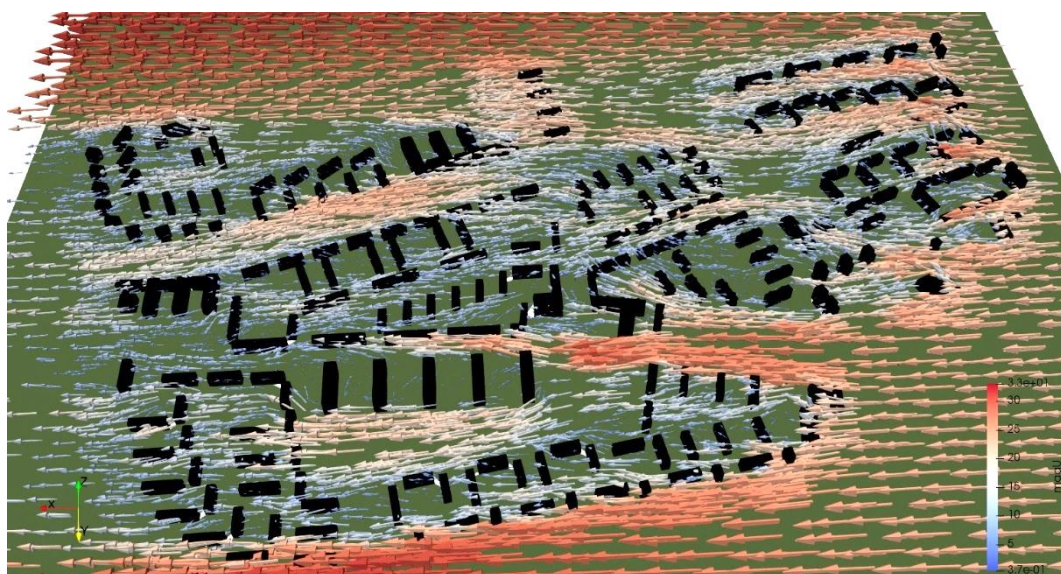
51.C. ábra: Szélsébségek ábrázolása ParaView szoftverben, északkeleti szél esetén



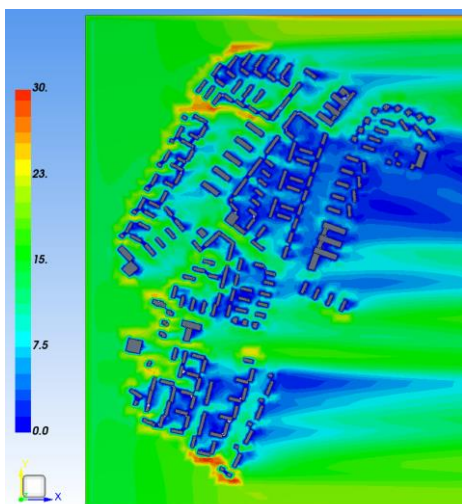
52.A. ábra: Szélsébségek ábrázolása SimFlow horizontális metszetén, keleti szél esetén (kelet jobbra)



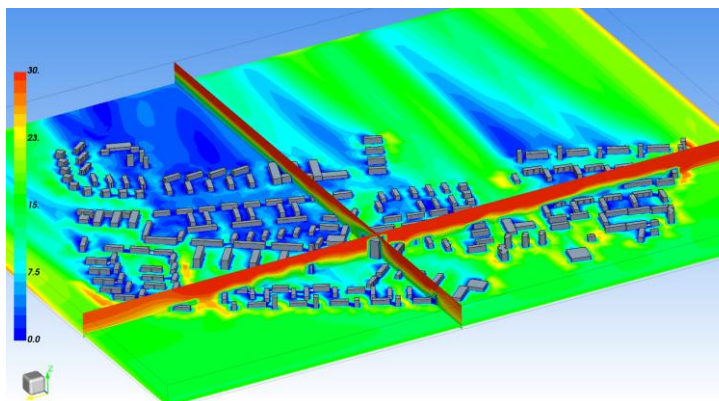
52.B. ábra: Szélsébségek ábrázolása SimFlow horizontális és vertikális metszetein, keleti szél esetén



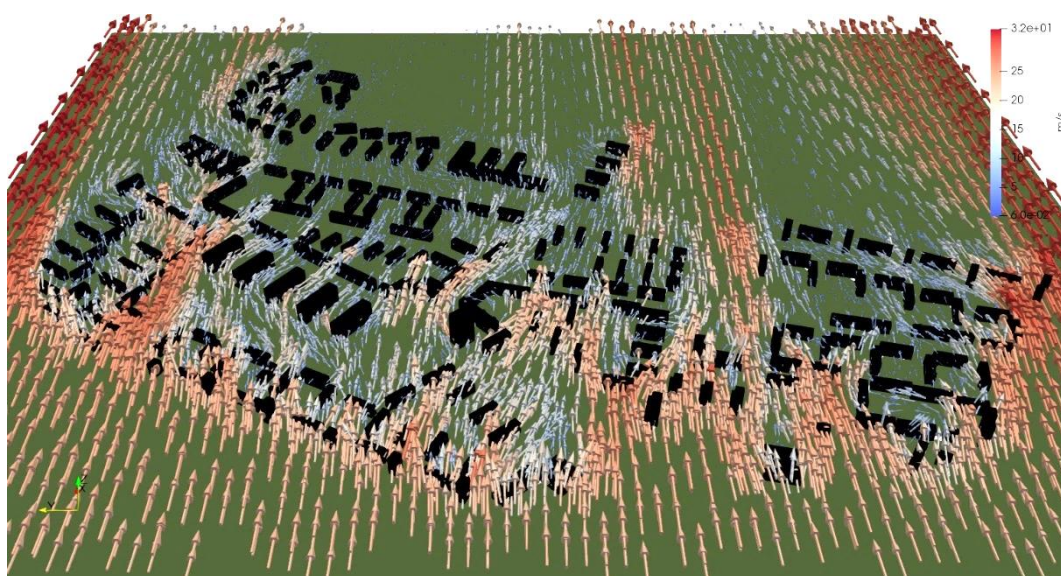
52.C. ábra: Szélsébségek ábrázolása ParaView szoftverben, keleti szél esetén



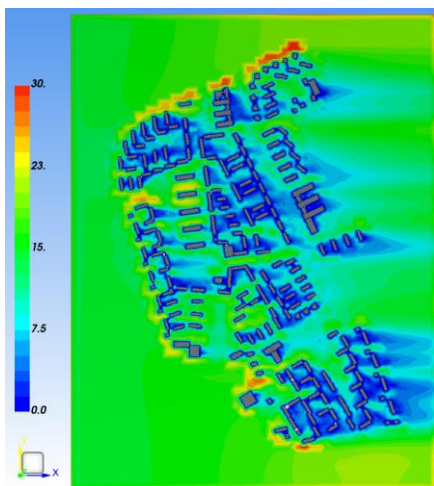
53.A. ábra: Szélsebességek ábrázolása SimFlow horizontális metszetén, délkeleti szél esetén (délkelet jobbra)



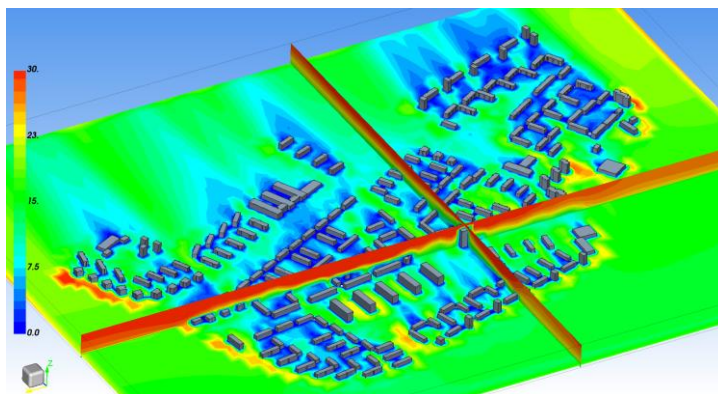
53.B. ábra: Szélsebességek ábrázolása SimFlow horizontális és vertikális metszetein, délkeleti szél esetén



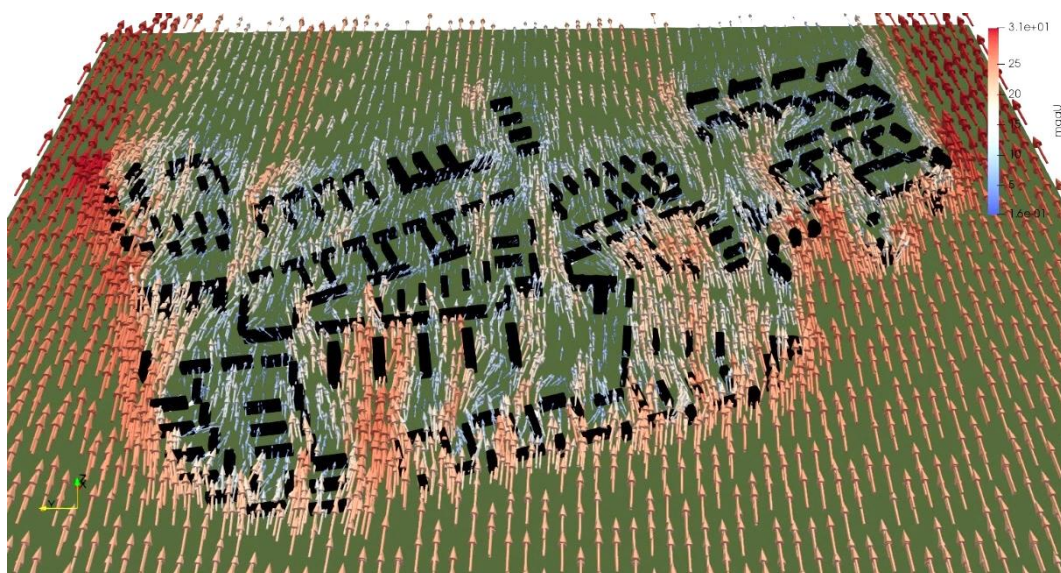
53.C. ábra: Szélsebességek ábrázolása ParaView szoftverben, délkeleti szél esetén



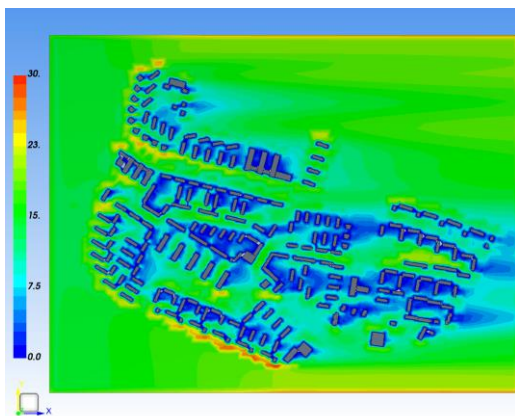
54.A. ábra: Szélességek ábrázolása SimFlow horizontális metszeten, déli szél esetén (dél jobbra)



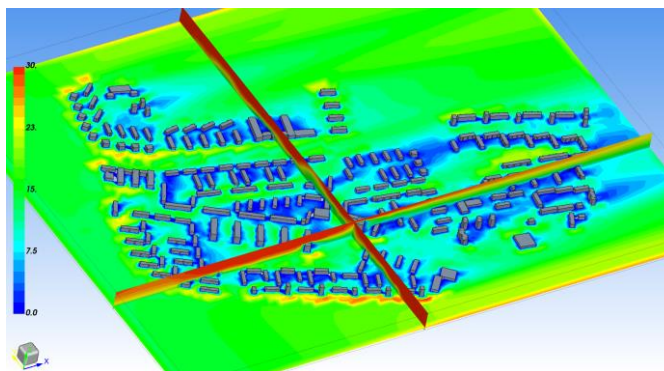
54.B. ábra: Szélességek ábrázolása SimFlow horizontális és vertikális metszetein, déli szél esetén



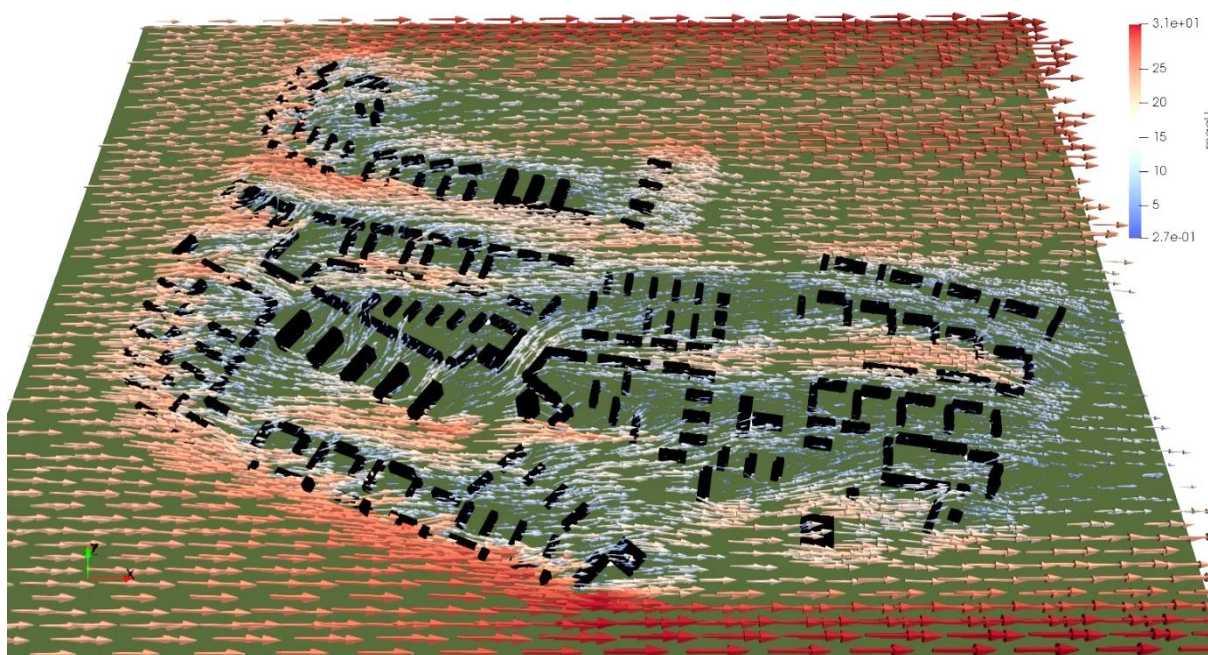
54.C. ábra: Szélességek ábrázolása ParaView szoftverben, déli szél esetén



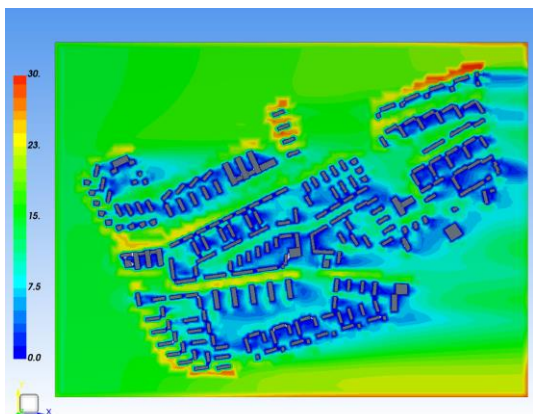
55.A. ábra: Szélsébségek ábrázolása SimFlow horizontális metszetén, délnyugati szél esetén (délnyugat jobbra)



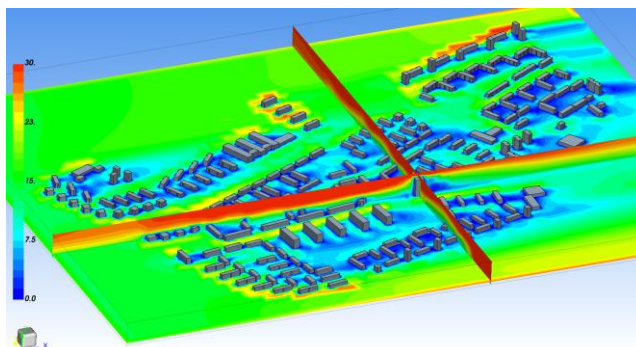
55.B. ábra: Szélsébségek ábrázolása SimFlow horizontális és vertikális metszetein, délnyugati szél esetén



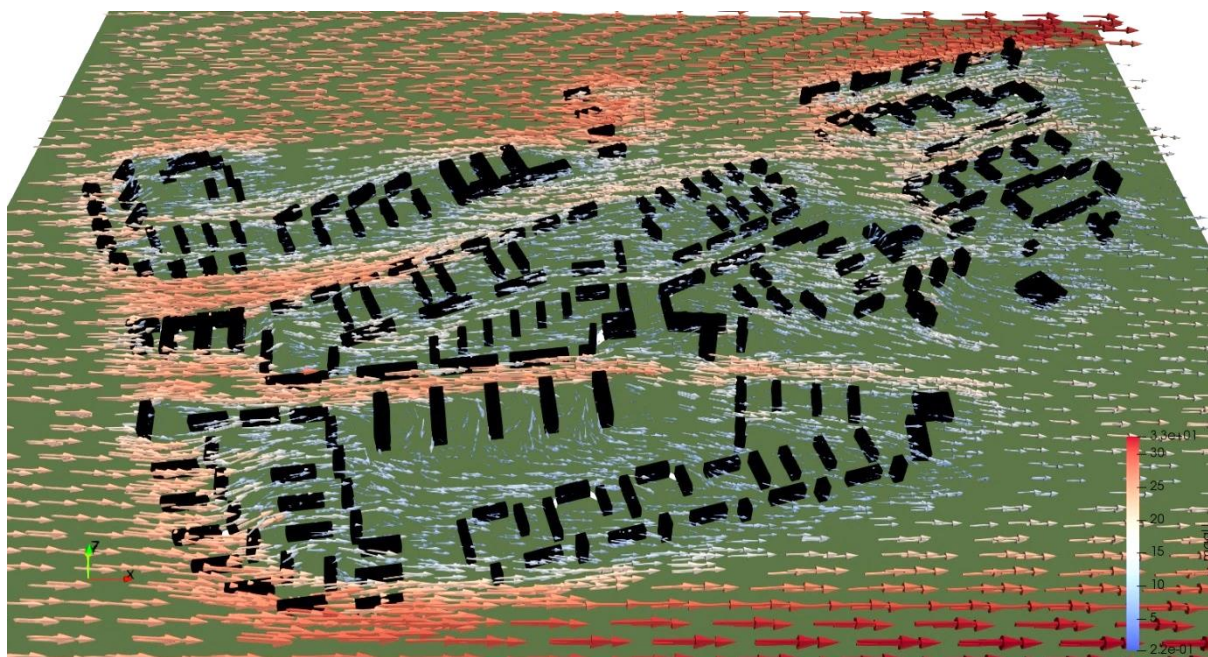
55.C. ábra: Szélsébségek ábrázolása ParaView szoftverben, délnyugati szél esetén



56.A. ábra: Szélsebességek ábrázolása SimFlow horizontális metszetén, nyugati szél esetén (nyugat jobbra)



56.B. ábra: Szélsebességek ábrázolása SimFlow horizontális és vertikális metszetein, nyugati szél esetén



56.C. ábra: Szélsebességek ábrázolása ParaView szoftverben, nyugati szél esetén

6.5 Modellezés eredményinek kiértékelése

A szélcsatorna szimulációk során kapott térképek már alapállapotban alkalmasak arra, hogy következtetéseket vonjunk le róluk. Azonban a pontosabb eredmények érdekében ezeket egyetlen területminősítő rendszerbe integráltam. A rendszerben csak azokat a területeket vettem szélcsatornának, ahol a szél sebessége Uránvárosban elérte, vagy meghaladta a 10 m/s-ot, azaz a modellezés során beállított alapértéket. Ezen kívül azt is figyelembe vettem, hogy a nyolc fő- és mellékégtáj irányából milyen gyakorisággal fúj a szél. Ugyanis az a szélcsatorna jelentősebb hatású, amely gyakoribb szélirány idején alakul ki.

Első lépésben Flowsquare 4.0 képeit szürkeárnyalatossá alakítottam. Ezeken a térképeken a fekete szín a 0 m/s, a fehér pedig az éppen aktuális maximális szélesebességet jelöli, de a *.bmp fájlban a pixelekhez egy színkód és nem szélesebesség érték van eltárolva. Először a színeket kellett átváltani szélesebességre. A képek jelmagyarázatából leolvastam minden égtáj esetén a modell szerinti maximális szélesebességet. A képek széleit és jelmagyarázatát ezután levágtam, majd a QGIS szoftverben az OpenStreetMap alaptérképet használva földrajzi koordinátákhoz georeferáltam. Ehhez az Freehand Raszer Georeferencing modult használtam. A Layer Properties ablak Symbology menüjében kiolvastam minden képről, hogy mi a legvilágosabb, azaz legmagasabb szélesebességet jelölő pixel érték a képen. Ez nem minden esetben érte el a maximális 255-ös értéket, valamikor kevesebb volt. A maximális szélesebesség és a maximális pixel világosság ismeretében kiszámoltam egy korrekciós tényezőt, amivel elosztva a kép pixel színértékeit a szélesebességet tartalmazó réteget kaptam (3. táblázat). Ezzel a nyolc rászteres réteg adatai összehasonlíthatóvá váltak egymással.

3. táblázat: A Flowsquare 4.0-el kapott színes képek pixelintenzitásának szélesebességre való átváltását segítő korrekciós tényezők égtájanként

Égtájak	Maximális szélesebesség	Maximális szín pixelérték (0-255)	Korrekciós tényező
É	22,39	231	10,31711
ÉK	21,47	255	11,87704
K	20,16	249	12,35119
DK	25,68	255	9,929907
D	21,19	238	11,23171
DNy	21,96	198	9,016393
Ny	17,98	227	12,62514
ÉNy	22,85	218	9,540481

A szélcsatornákat a szélirány gyakoriságok alapján is súlyoztam. Ehhez a korábban kigyűjtött szélirány adatokat használtam fel (4. táblázat). Legalacsonyabb gyakorisággal a déli szelek

fújnak Pécssett, így az lett a viszonyítási alap. Ehhez képest pl. északkelet felől kétszer gyakrabban, északnyugatról majdnem négyszer gyakrabban fúj a szél.

4. Táblázat: A fő- és melléktájakhoz rendelt gyakorisági szorzó

Égtájak	Gyakoriság (db)	%	Gyakorisági szorzó (Dél=1)
D	353	5,4	1,0
DK	569	8,8	1,6
DNy	573	8,8	1,6
ÉK	712	11,0	2,0
Ny	824	12,7	2,3
É	858	13,2	2,4
K	1222	18,9	3,5
ÉNy	1371	21,2	3,9
Össz.:	6482 db	100 %	

A georeferált raszteres rétegek súlyozott pontszámait a Raster Calculator eszközzel adtam meg. Például így számoltam ki az északi szél modellrétegén a pixelek szélesebségét, szűrtem ki a 10 m/s-nál nagyobb sebességű pixeleket és szoroztam meg őket a gyakorisági szorzóval és adtam 0 értéket a 10 m/s alatti pixeleleknek:

```
((("É_szurke_maszkolva@1"/10.31710585)<10 )*0) +  
((("É_szurke_maszkolva@1"/10.31710585) >=  
10)*(("É_szurke_maszkolva@1"/10.31710585)*2.4))
```

A nyolc raszteres réteget ezek után szintén a Raster Calculatorban adtam össze (a minimális pixelérték 0, a maximális 308,6 lett). A réteg pixelértékei már nem rendelkeznek mértékegységgel, de egyfajta relatív összehasonlításra alkalmasak. Ezért ezeket a pixeleket hét csoportba soroltuk a QGIS Reclassify by table eszközével. Az épületeket (fekete) és a 10 m/s alatti pixeleket nem tekintettük szélcsatorna képző területnek (szürke). A 10 és 308,6 közötti, potenciális szélcsatorna pixeleket hat csoportba soroltam 50-es lépésközzel (1 = 10-60, 2 = 60-110 stb.). Az egyre magasabb érzékű pixeleket egyre sötétebb zöld szín jelöli (57. ábra). A képelemek színe megmutatja, hogy mely területeken várható kisebb vagy nagyobb gyakorisággal olyan erős szél kialakulása, ami segít a fáradt, szennyezett, túlmelegedett városi levegő mozgatásában, cseréjében.



57. ábra: Úránváros szélsatorna kialakulási szempontú relatív minősítő térképe (forrás: saját ábra)(számok magyarázata a szövegben olvasható)

A relatív minősítő térképen látható szélsatornákat három kategóriába soroltam.

Elsőrendű szélsatornának tekintetem azokat, amelyek maximális szélessége meghaladja az 50 métert hossza pedig eléri az 500 métert. Továbbá tartalmaz olyan a pixeleket, melyek a legmagasabb, azaz 4 – 6-os kategóriákba esnek. Ide sorolható a Nendtvich Andor út (1) (6-os főút), valamint a Radnóti óvoda - Jedlik Ányos utca – Ércbányász park (2) vonala. Megjegyzem, hogy az utóbbi szélsatorna kialakulását a valóságban magas fák és kisebb épületek akadályozhatják meg.



58, 59. ábra: Jedlik Ányos utca és Ércbányász park (forrás: saját képek)

Másodrendű szélcsatorna-kategóriába soroltam azon területeket, amelyek hossza ugyan több száz métert is elérhet viszont szélessége jellemzően 20 méter körüli és pixel értékei alacsonyabb maximálisan a 3-as kategóriát érik el. Ebbe a kategóriába tartozik Esztergár Lajos (3) utca, az Építők útjának keleti szakasza (4) és a Stadion utca és az Acsádi Ignác (5) utca vonala.

A harmadrendű szélcsatornák jellemzően az előző két kategóriához kapcsolódó keskenyebb és rövidebb képződmények. A minősítő térképen a megjelenésük szakadozottabb. Ide tartozik a Radnóti Miklós utca (6) (Jedlik Ányos utcai szélcsatorna mellékágának tekinthető), a Szántó Kovács János utca, Ybl Miklós utca vonala (7), valamint a Bánki Donát – Aranycsapat utca (8).

A relatív minősítő modellben látható szélcsatornák igen jelentős szerepet töltenek be városökológiai szempontból, mivel segítenek a pozitív városklíma, az élhetőbb környezet kialakításában. Ezért a jövőben a várostervezési munkák során figyelni kell majd arra, hogy ezek folytonossága ne szakadjon meg. Például ne építsenek sokemeletes épületeket az Ércbányász parkba, vagy a Jedlik utca északi részére. Az elmúlt évtizedekhez hasonlóan a jövőben is az várható, hogy Úránváros legjelentősebb szélcsatornája a 6-os főút vonala marad.

7. A dolgozat eredményeinek összefoglalása

A dolgozatomban a városökológia egyik fontos részterületével a városi szelek vizsgálatával foglalkoztam Pécsen és azon belül Uránvárosban.

Öt meteorológia állomás adatait vizsgáltam, melyek eredményeit két esetben nagy mértben befolyásolta a helyi mikrokörnyezet (épületek, fák, egyéb tereptárgyak). Ezek a Jegenyés utcai és Erzsébettelepi mérőállomások voltak, melyek adatait a részletesebb vizsgálatokhoz nem tudtam felhasználni.

A Pécs-pogányi és BTK-TTK meteorológiai állomások adatai alapján megállapítottam, hogy a tavaszi és a nyári évszakokban meghatározó szélirány észak-északnyugati túlsúlyt mutat. Az év másik felében ősszel és télen pedig megjelenik egy erős keleties irány (télen Ny-DNy is), néhol esetszámban megelőzve az északias-északnyugatias szeleket.

Leggyakoribb átlagos szél erősségnek a 0,4-1,7-ig terjedő 2-es Beaufort kategóriát (gyenge szellő, fuvallat), az 1,8-3,1-ig terjedő 3-as számú Beaufort kategóriát (enyhe szél) és a 3,2-5,3 m/s értékekig terjedő 4-es kategóriát (gyenge szél) tekinthetjük. Későbbiekben, a modellezés során is felhasznált adatok a Pécs-pogányi mérőállomás 2005-2021-es napi adatainak összesített szél erősség értékeiből kerültek ki, melyek maximális szél erősség értékei 10 m/s-ot is elérték vagy meghaladták.

A szél folyosó modellezést QGIS, Blender, Fowsquare4.0 és SimFlow4.0 szoftverekkel végeztem Uránváros területére. Mind a nyolc fő- és mellékútgát irányából elkészíttem egy-egy áramlási szimulációt. A Fowsquare4.0 jobb térbeli felbontású kétdimenziós modelljeit, térképeit QGIS szoftverben relatív minősítő térképpé egyesítettem, melyen első, másod és harmadrendű potenciális szélcsatorna területeket különítettem el.

Elsőrendű szélcsatornának a Nendtvich Andor út (6-os főút), valamint a Radnóti óvoda - Jedlik Ányos utca – Ércbányász park vonalát tekintetem. Másodrendű szélcsatorna-kategória: Esztergár Lajos utca, az Építők útjának keleti szakasza és a Stadion utca és az Acsádi Ignác utca vonala.

A harmadrendű szélcsatornának a Radnóti Miklós utca (Jedlik Ányos utcai szélcsatorna mellékágának tekinthető), a Szántó Kovács János utca, Ybl Miklós utca vonala, valamint a Bánki Donát – Aranycsapat utca.

A relatív minősítő modellben látható szélcsatornák igen jelentős szerepet töltenek be városökológiai szempontból, mivel segítenek a pozitív városklíma, az élhetőbb környezet kialakításában. A jövőben ezen területeket a városfejlesztés során kiemelten kell kezelni.

Irodalomjegyzék

- Allegrini, J., Dorer, V., & Carmeliet, J. (2015). Influence of morphologies on the microclimate in urban neighbourhoods. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 144, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.03.024>
- Géczi R. (1999). *A városökológiai kutatások néhány időszerű kérdése Kolozsváron.*
- Geresdi István. (2022). *Légkörfizika* (pp. 1–161).
- Gyenzse Péter. (2009). *Geoinformatikai vizsgálatok Pécsett.*
- Kaposi Zoltán, Kovács Zoltán, Glied Viktor, Pankász Balázs, & Borsós Zsófia. (2019). *Pécs - III. Uránváros - Közösségi tevékenységek történeti feltárása.*
- Kerényi Attila. (1995). *Általános környezetvédelem.* Mozaik Oktatási Stúdió.
- Lichtenberger, E. (1993). *Stadtökologie und Socialgeographie.*
- Lóczy Dénes, & Gyenzse Péter. (2013). *Pécs természeti környezete.*
- Masatoshi Yoshino. (1975). *Climate in a Small Area: An Introduction to Local Meteorology.* University of Tokyo Press.
- Mayer, H. (1999). Air pollution in cities. *Atmospheric Environment*, 33(24–25), 4029–4037. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(99\)00144-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00144-2)
- Mezősi Gábor, Mucsi László, Rakonczai János, & Géczi Róbert. (2007). *A városökológia fogalma, néhány elméleti kérdése.*
- Nagy I. (2012). *A városökológia elméleti megközelítése .*
- Oke, T. R. (1976). The distinction between canopy and boundary-layer urban heat islands. *Atmosphere*, 14(4), 268–277. <https://doi.org/10.1080/00046973.1976.9648422>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates.* Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Péczy Gy. (1981). *Éghajlattan.*
- Piracha, A., & Chaudhary, M. T. (2022). Urban Air Pollution, Urban Heat Island and Human Health: A Review of the Literature. *Sustainability (Switzerland)*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/su14159234>
- Salvadori, L., Badas, M. G., di Bernardino, A., Querzoli, G., & Ferrari, S. (2021). A street graph-based morphometric characterization of two large urban areas. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1–22. <https://doi.org/10.3390/su13031025>
- Shen, J., Gao, Z., Ding, W., & Yu, Y. (2017). An investigation on the effect of street morphology to ambient air quality using six real-world cases. *Atmospheric Environment*, 164, 85–101. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.047>
- Simor Ferenc. (1938). *Pécs éghajlata: Vol. II.*
- Stathopoulos, T., Alrawashdeh, H., Al-Quraan, A., Blocken, B., Dilimulati, A., Paraschivoiu, M., & Pilay, P. (2018). Urban wind energy: Some views on potential and challenges.

- Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 179, 146–157.
<https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.05.018>
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12), 1879–1900.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>
- Su, N., Zhou, D., & Jiang, X. (2016). Study on the Application of Ventilation Corridor Planning in Urban New Area --A Case Study of Xixian New Area. *Procedia Engineering*, 169, 340–349. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.10.042>
- Szász I. (1999). A természeti és az épített környezet kölcsönhatásának néhány eleme a pécsi belvárosban. *Tanulmányok Pécs Történetéből* 5-6, 23–30.
- Tóth Z. (1976). Beszélgetés Pécs városépítéséről. *Városépítés*, 13(3), 18–19.
- Unger János, & Gál Tamás. (2017). *Városklíma*. SZTE TTIK Földrajzi és Földtudományi Intézet.
- Unger János, Sümeghy Zoltán, Kántor Noémi, & Gulyás Ágnes. (2012). *Kisléptékű környezeti klimatológia*.
- United Nations, D. of E. and S. A. P. D. (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*.
- von Moos, A. D., & World Meteorological Organization. (1996). *Climate and urban development*. World Meteorological Organization.