

Épület aerodinamikai modellkísérletek méréses igazolása

Energiamegtakarító passzív szellőzés és hűtés épületszerkezetekkel

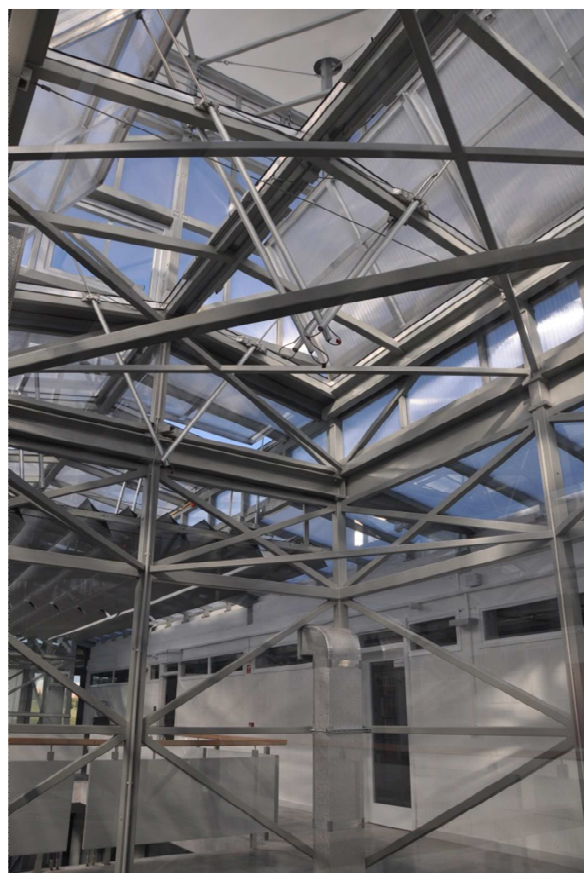
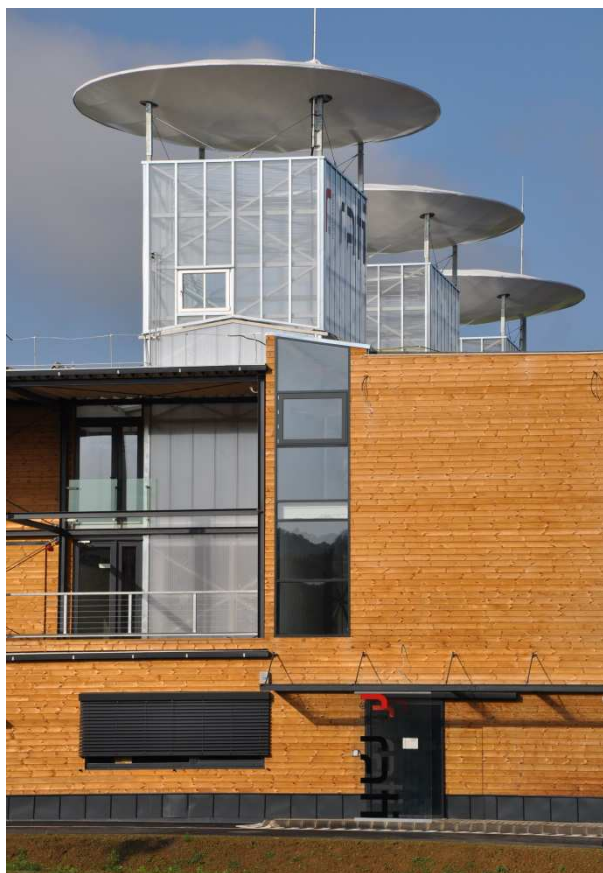
OTDK dolgozat

Műszaki Tudományok Szekció – Építés-, és Épületszerkezettani Tagozat

Szerző: Katona Ádám László, építész osztatlan hallgató

Konzulensek: Prof. Dr. habil ifj. Kistelegdi István
Háber István Ervin tanársegéd

2015.01.06.



Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
1. Bevezetés, előzmények, a témaválasztás indoklása	4
2. A szakmagyakorlat és tudományos élet mai állása	7
2.1 Szakpublikációk kutatási eredményei	7
2.1.1 Áttekintő tanulmányok épületek passzív szellőző rendszereiről	7
2.2 A szakmagyakorlat megvalósult eredményei	13
2.3 A szakirodalom összegzése	25
3. A kutatás célja	27
4. A kutatás módszerei	29
4.1 A kísérleti épület aerodinamikai tervezése	29
4.1.1 A projekt speciális tervezési módszere	29
4.1.2 A kísérleti épület szellőzési koncepcióterve	29
4.1.3 A szélcsatorna modellkísérlet technológiája	33
4.2 A megvalósult kísérleti épület bemutatása	35
4.2.1 A megvalósult prototípus épület összrendszere	35
4.2.2 A megvalósult passzív szellőzőrendszer	36
4.2.3 A kivitelezett kísérleti épület BMS felügyeleti és MMS monitoring rendszere	41
4.2.4 Anemométerek: hődrótos áramlásmérés	43
5. A kutatás eredményeinek bemutatása.....	48
5.1 A helyi mikroklimatikus szélviszonyok: uralkodó szélirányok és szélsébségek	48
5.2 A szellőzőtoronyok működése, szellőztető képessége	51
5.2.1 A torony éves kihasználtsága	51
5.2.2 Torony üzemmódok	54
5.2.2.1 Toronyszellőzés zárt homlokzati csarnok kapuk esetében	55
5.2.2.2 Toronyszellőzés nyitott homlokzati csarnok kapuk esetében	58
5.2.2.3 Toronyszellőzés működésének összegzése	62
5.3 Szélcsatorna mérések validálása	64
5.3.1 Összehasonlító analízis a szélcsatorna szélsébségének korrekciójával	64
5.3.2 Összehasonlító analízis a kísérleti épület szélsébségeinek korrekciójával	68

6. Következtetések	73
6.1. A kísérleti épület szellőzőrendszerének minősítése	73
6.1.1 A kapuk működése	73
6.1.2 Tornyok működése zárt kapuk mellett	73
6.1.3 Tornyok működése nyitott kapuk mellett.....	76
6.2 A modellísérlet validációja	78
6.3 Általánosított ismeretanyag hasonló csarnokjellegű épületekre.....	79
7. Összegzés	81
7.1. A kutatás előzménye és módszere: prototípus pluszenergia potenciállal rendelkező épület innovatív passzív szellőzőrendszerrel.....	81
7.2. A kutatás célkitűzése.....	82
7.3. Eredmények értékelése, következtetések és a felmerült problémák	83
7.4. Általánosítások.....	85
7.5. A kutatás jövője.....	86
8. Kitekintés	87
8.1 CFD modellvalidáció	87
8.2 Komplex szellőzési rendszer tervezési módszerének kidolgozása.....	87
8.3 Komplex szellőzési rendszer moduláris épületszerkezeti rendszerének kidolgozása	88
8.4 Felesleges légtérfogat áramok kezelése, hasznosítása	89
8.5 Földalatti utánáramlási rendszerek kifejlesztése	89
8.6 Passzív szellőzés technika hűtőhatásának meghatározása és tervezése.....	90
8.7 Légsebesség komfortmérések a termelőcsarnokban	90
9. Szakirodalmi hivatkozások.....	91

1. Bevezetés, előzmények, a témaválasztás indoklása

Tekintettel a világ energiafogyasztásának mennyiségére és minőségére, a társadalom nagy problémák és kihívások előtt áll. A véges mennyiségű fosszilis energiaforrások intenzív kiaknázása olyan nagymennyiségű üvegházhatást okozó gázkibocsátást eredményez, mely hatására a negatív globális klímaváltozás egyre kritikusabb állapotba kerül. A magas energiafogyasztás nagyrészt az épített környezetnek köszönhető, az energiafogyasztás mintegy 50%-a az épületekkel kapcsolatos számos tevékenységből ered (szerkezetek előállítása, építés, üzemeltetés, bontás illetve felújítás). További aktuális jelenség India, Ázsia, Oroszország, az arab országok és Dél-Amerika területein a gazdaság növekedésével arányos építési tevékenység magas intenzitása, - néhány év alatt olyan méretű építészeti és urbanisztikai fejlődés megy végbe, mely Európában évtizedek, illetve évszázadok alatt alakult ki.

A 21. századot döntően jellemző klimatikai és demográfiai változásokra az épített környezet területén kizárólag egy fenntartható, energia hatékony és környezettudatos építészettel lehetséges megfelelő eredményességgel válaszolni [1]. Az energia- és klímatudat az építészetben és kapcsolódó tudományágakon belül egy folyamatos fejlődést indított el, a 70-es évektől kezdve a megújuló energiaforrások használatával kísérletezve, illetve az 50-es évek végétől az épületklimatika megjelenésével [2]. Míg kezdetben az épületfizika hő- és páratechnikai aspektusaira és a szoláris sugárzás hasznosítására koncentrált a szakma, addig napjainkig – főként Németországból kiindulva, többek között Thomas Herzog, Gerhard Hausladen, Manfred Hegger és Klaus Daniels munkásságával - egy olyan új tervezői áramlat jött létre, mely holisztikus, rendszerelméletet alkalmazó átfogó teljességre törekszik a fenntartható épületek és kapcsolódó műszaki rendszerek tervezésben, széleskörű fénytechnikai, termikus és áramlástan vizsgálatokkal, tradicionális és modern építéstechnológiák ötvöztetésével.

A Pécsi Tudományegyetem, Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar, Építészmérnöki Intézet, Energiadesign Tanszékén működő kutatócsoport létrehozott egy ebből a filozófiai háttérből kiinduló tervezési módszert, mely ENERGIA DESIGN® néven pluszenergia mérleggel rendelkező épületek tervezését szolgálja [3]. A tervezési módszer sajátossága, hogy az építészeti tervezést épületfizikai modellező eljárással párosítja, és tervezői döntéstámogatásként az ökoépítészeti koncepciókat számszerűsített adatokkal minősíti. A tervezési folyamatban mind komfort és higiénia, mind energiahatékonyság szempontjából lényeges elem a belső terek szellőzésének megfelelő kialakítása, különös tekintettel a természetes (passzív) szellőzés lehetőségére. A passzív szellőzés amellet, hogy kellemes belső klímaviszonyokat képes ki-

alakítani, nagymennyiségű üzemeltetési energiát is megtakarít a mesterséges szellőztető gépészet, ventilátor villamos energiafogyasztásának és a belső terek hűtési energiafogyasztásának területein.

Az ENERGIA DESIGN® módszer az épületek szellőzésének tervezésekor is alkalmazza a 'vernakuláris', helyi építéstechnológiai tradíciókat, illetve kombinálja ezeket olyan high-tech építészeti-műszaki megoldásokkal, melyek a fenntarthatóságot, az energiahatékonyságot és a környezetkímélést szolgálják. Ez a tervezéstechnika az épületek passzív szellőzését az épület aerodinamika törvényszerűségeinek alkalmazásával vizsgálja és fejleszti, a szél épületekre gyakorolt hatásmechanizmusainak, illetve a termikus okokból kialakuló belső légáramlatok figyelembevételével, az áramlási rendszerekhez igazodó irányított tervezéssel. A tervezésben az elméleti számításokat szélcsatorna modellkísérletekkel és numerikus áramlástan szimulációkkal (computational fluid dynamics, CFD) lehetséges megtámogatni, annak érdekében, hogy minél pontosabb számszerűsített visszajelzést kapjunk a szellőzési koncepciókról.

A természetes szellőzés tervezésének kérdésköre elsősorban nagyobb légtérrel rendelkező, csarnok jellegű épületeknél, illetve összetett, komplex belső geometriával rendelkező (lég)tereknél vizsgálándó, - ellentétben az általában egyszerű, kisméretű lakóépületekhez és szellőzőrendszerükhöz képest. Főként a középületek esetében fontos kritérium a funkcióból eredő igény, a munkahelyek automatikus higiéniai légminőségének és termikus komfortszintjének a biztosítása. A passzív szellőzéssel a magas belső komfortszint tartása mellett a gépi szellőzés éves szinten minél hosszabb időszakú kiváltása, valamint a költséges épülethűtés tehermentesítése a cél, mely nemzetközi szinten is fiatal, innovatív kutatási szektort képez. Bár számos tudományos tanulmány foglalkozik ezzel a témával elméleti, numerikus módszerek alkalmazásával, az ismeretanyag a passzív szellőző rendszerekről és ezek épületszerkezeiteiről még hiányos, a rendszerek komplexitásából és valós mérési eredmények hiányából adódóan [4]. Hasonló okokból – nemzetközi szinten is - ritkán található megvalósult épületpélda komoly természetes szellőzőapparátus rendszerrel kialakítva. A PTE Energiadesign tanszékén kifejlesztett tervezési módszerrel viszont megvalósult Komlón egy passzív szellőzéssel is működő, pluszenergia potenciállal rendelkező ipari és irodaépület (1.1 ábra), mely energiamérlege az eredetileg tervezett méretre bővített napelemes rendszerrel el képes érni a pluszenergia szintet, tehát több energiát tud termelni, mint fogyasztani. Ehhez a pozitív energiamérleghez intenzíven hozzájárul a prototípus épület komplex természetes szellőzőrendszere, mely leglényegesebb részében, a passzív szellőzőtornyokkal működő központi termelőcsarnokban áramlástan mérések elvégzésére is lehetőség nyílt. Egy kutatási együttműködés keretében a tulajdonos és üzemeltető RATI Kft. és a PTE között, az egyetem egy komplex

épületmonitoring rendszert épített ki a kísérleti épületben, mely a csarnok szellőzőrendszeréről és további energetikai épületrendszerekről is mérésadatgyűjtést tesz lehetővé. Ezúton lehetséges a szellőzőtornyokkal kialakított rendszer működőképességének és hatékonyságának kimutatása, továbbá az ENERGIA DESIGN® tervező módszer épület aerodinamikai tervezési fázisának az ellenőrzése, igazolása, igény esetén fejlesztési javaslatok tétele. Az eredmények kiértékelésével lehetőség szerint általánosítható következtetések is megfogalmazandók releváns nagyléptékű terek, épületek természetes szellőzésére és hűtésére vonatkozólag.



1.1. ábra: Kísérleti épület, a RATI Kft. ipari és irodaépülete passzív szellőzőtornyokkal

2. A szakmagyakorlat és tudományos élet mai állása

2.1 Szakpublikációk kutatási eredményei

2.1.1 Áttekintő tanulmányok épületek passzív szellőző rendszereiről

A tudományos kutatás területén főként nemzetközi publikációk számolnak be az épületek természetes szellőzésének rendszereiről, ezek hatékonyságáról, műszaki kérdéseiről.

Ken Yeang [5] nemzetközi jelentőségű építész és ökológus mélyreható elméleti kutatást végzett az ökológiai aspektusokat figyelembe vevő holisztikus épített környezet tervezésének területén, mely szerves részeként taglalja a passzív szellőzés elméleti tervezési aspektusait.

Az 1986-ban megrendezett karlsruhei [6] Klíma-Építés-Lakás (Climate-Building-Housing) nemzetközi tudományos konferencián még ventilátorral fűjt méretarányosan kicsinyített modelleken homok és selomina (mű-hó por) eróziós technika segítségével állapították meg a különböző légáramlási rendszerek hatásait a településekben.

Újabb áttekintő tanulmányok összegzik az épületekben alkalmazható passzív szellőző rendszereket a szélhatás, a légcseré biztosítása és a szellőzésből eredő hűtőhatás szempontjaiból. N. Khan el al. [7] rendszerezi az épületek szélenergia hasznosító szellőző megoldásait különböző szélindukációs kategóriákba sorolva:

- Passzív rendszerek
 - o Természetes szellőzés, kürtőhatás, szélhatás
 - o Átriumok, csarnokok
 - o Falgátak
 - o Kürtő fedőszerkezetek
- Széltorony rendszerek
 - o Klímahomlokzatok kürtőtérrel
 - o Szélfogók
 - o Szél emeletek, szélnyílások
- Irányított passzív szélindukált szellőzési rendszerek
 - o Szélhasznosító tető felépítmények
 - o Szárnyszerkezetek

- Aktív (gépészettel kiegészített) szélindukált szellőző rendszerek
 - o Turbinák, ventilátorok
 - o Forgó függőleges és vízszintes tengelyű kürtő felépítmények.

Az egyes rendszerek alkalmazási területeinek ismertetése mellett a tipikus légátöblítés mértékét is megadja, bár hiányosan, mivel megfelelő, főként valós méréseken alapuló adatmennyiség beszerzése – nem kizárólag ebben az esetben – jellemzően nehéz és problematikus.

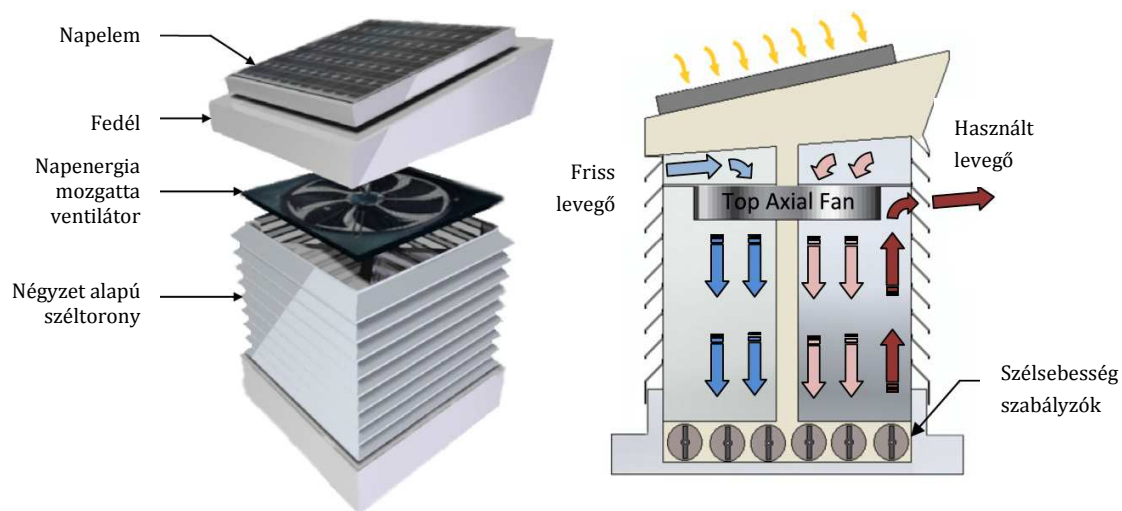
Tekintettel arra, hogy a felvázolt, rendkívül széles szellőzői rendszerpaletta elemzése eme TDK kutatás kereteit lényegesen meghaladná, továbbá figyelembe véve jelen dolgozat témáját, mely egy konkrét kísérleti épület szellőzőtornyokkal ellátott csarnokának passzív szellőzésével foglalkozik, a szakirodalmi szintézis a következőkben a szűk spektrum felé haladás elve szerint a széltornyokkal kapcsolatos tudományos eredményekre fókuszál.

Ben Richard Hughes et al. [4] a belső terek természetes szellőzését biztosító széltornyok fejlődéstörténetét és rendszereit mutatja be, elemzi a működési elveket, majd minősíti őket a tulajdonságok, alkalmazási területek, a teljesítmények határai és a tipikus szellőzői légcsereszempontjaiból:

- Tradicionális passzív szellőző rendszerek
 - o Szél szelep, kiszellőző nyílás
 - o Malkaf (egyirányú széltorony)
 - o Badgir (többirányú széltorony)
- Modern passzív szellőző rendszerek
 - o Szolár-szél kürtő
 - o Szél szelep, kiszellőző nyílás
 - o Szoláris ventilátorral támogatott szél szelep, kiszellőző nyílás

Az egyes rendszerek légmennyiségei, illetve térfogat áram értékei irodalomból és esettanulmányokból származnak. A legerősebb légcseré, 650 l/s az ipari szél szelep, kiszellőző nyílás (standard lamellás tetőfelépítmény – széltorony) esetében lép fel 5 m/s szélesség mellett. Mivel a standard széltornyok hatékonysága teljes mértékben a szél irányától és sebességétől függ, ezért a napjaink légminőségének biztosítását nem mindig képesek ellátni. Modern passzív szellőző rendszerek, melyek a standard tornyot egy fotovillamos napelemes rendszerrel meghajtott ventilátorral bővítik, továbbá térfogat áram szabályzó szelepekkel rendelkeznek,

képesek a standard széltorony teljesítményét megnégyszerezni (2.1 ábra). Megfigyelhető továbbá, hogy a leggyengébb eredmény, a kizárólag hőmérséklet különbségen alapuló (szélcsend, $v_{szél} = 0 \text{ m/s}$) szolár kürtők esetében jelentkezik (105 l/s utánáramlás, 92 l/s kiáramlás). Összegezve megjegyezhető, hogy a tradicionális módszerek, korszerű technikákkal való párosítása eredményeként hatékony szellőztetőtorony megoldásokat lehetséges létrehozni.



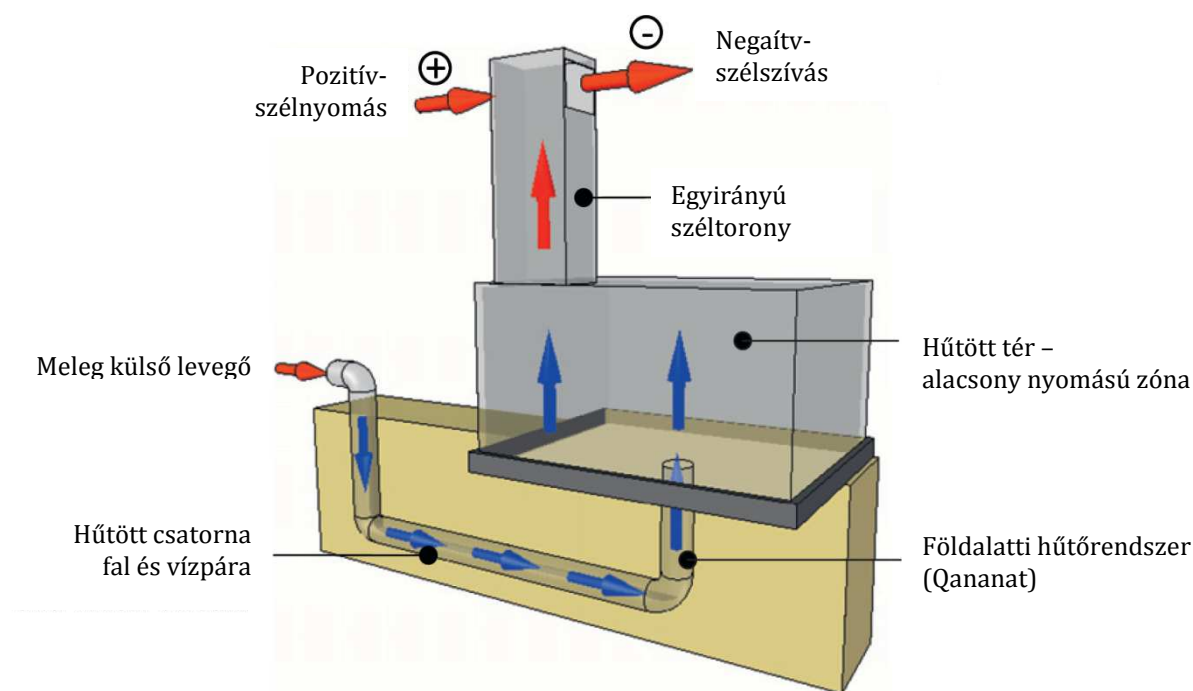
2.1. ábra: PV modul segítségével meghajtott ventilátor egy széltoronyban - sematikus felépítés [4]

Hasonlóan a szellőző légcseré szempontjaihoz, a tanulmány a széltornyok hűtő hatását is elemzi a következő felosztásban:

- Nedvesített szerkezetek (függönyszerű anyagok, vályog csövek) széltornyokban
- Nedvesített, párolgó felületek széltornyokban
- Qanat (földalatti hűtő csatornák)
- Szolár kürtők
- Toronyszerkezetek éjszakai szellőztetése
- Széltornyok és belső udvarok kombinációja
- Széltornyok és íves, boltozatos tetőszerkezetek kombinációja

A leghatékonyabb megoldást a nedvesített széltorony variációk képesek nyújtani, $\Delta T_{\text{levegő}} = 12-15 \text{ K}$ hűtőhatást létrehozva a belső tér lég hőmérsékletében, viszont negatívum, hogy ezekben az esetekben csökken a légátöblítés mértéke a tornyokban és magasabb tornyokra is szükség van a nagyobb hűtőhatású nedves levegő-kontakt felület kialakítása érdekében. 15 K hűtőhatást a belső a qanat földalatti légcsatorna rendszere (2.2. ábra) is biztosít a belépő levegő

hőmérséklete számára, - hátránya csupán a bekerülési és üzemeltetési, illetve karbantartási költségek magas mértéke. A legkisebb hűtési teljesítmény (3,5 K) a szolárkürtő esetében tapasztalható, mely további hátránya a limitált szabályozhatóság és a lassú termikus feltöltési/letöltési időintervallumok.



2.2. ábra: Széltorony rendszer integrált földalatti hűtőhatású csatornával (qanat) [4]

Hassam Nasarullah Chaudry et al. [8] a fenntartható épületszellőzési technológiák áttekintésével foglalkozik, mely keretében az éjszakai szellőzés és a széltoronyok megoldásai aktív gépészeti rendszerekkel, split-klíma berendezésekkel, légkezelőkkel, szorpciós hűtőrendszerekkel és abszorpciós hűtéssel lettek összehasonlítva. Mind a hatásfok, mind az üzemeltetési energiafogyasztás tekintetében a két passzív megoldás lényegesen előnyösebb mutatókkal rendelkezett. A rendelkezésre álló információkat esettanulmányok adatai szolgáltatták.

2.1.2 Számszerűsítési módszerek a szakpublikációkban

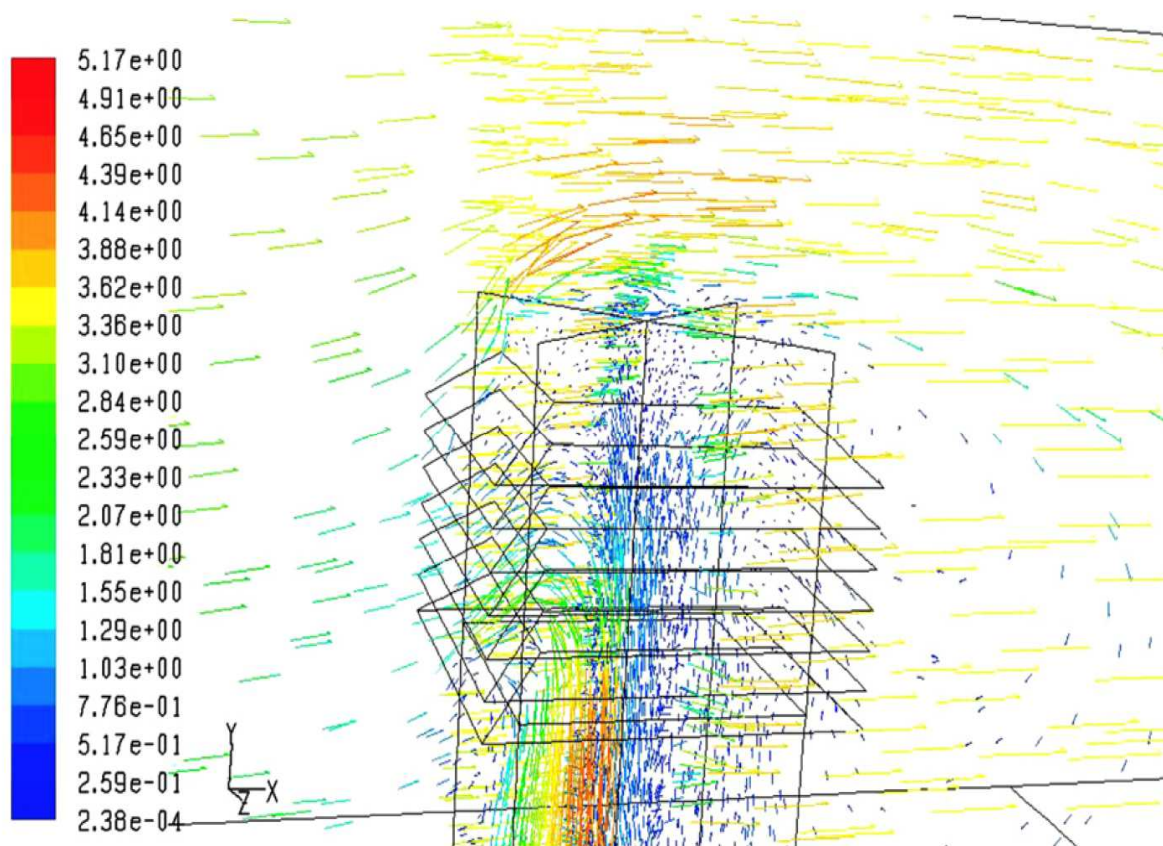
A szakirodalomban és tudományos publikációkban elméleti, numerikus, továbbá kísérleti vizsgálatok eredményeit találhatjuk az épületek természetes szellőzéséről, esetünkben különös tekintettel a szellőző toronyjellegű rendszerek megoldásaira. Klaus Daniels [9], az ETH Zürich egykori professzora meghatározó vezéregyénisége és szakembere az épületek természetes szellőzésével foglalkozó épület aerodinamika tudományterületének, aki szélcsatorna laborkí-

sérleteket, nyomásméréseket és füst segítségével történő vizualizációkat végzett az épületekben, illetve épületek körül létrejövő légáramlatok analízisének vagy különböző épület aerodinamikai tervezési koncepciók összehasonlításának céljából.

Ben Richard Hughes és Mak Cheuk-Ming [10] CFD (computational fluid dynamics) numerikus áramlástani szimulációkat alkalmaz annak érdekében, hogy szellőző széltornyokban a termikus felhajtóerő és a szél hatásait egymástól meg lehessen különböztetni, be lehessen azonosítani. A CFD szimulációk eredményeit aztán egy helységben elvégzett hődrótos termikus légsebesség méréssorozattal validálták. Az eredmények többek között 76%-al nagyobb szélindukciós helységszellőzés intenzitást mutattak ki, a gravitációs szellőzéshez képest.

Benjamin M. Jones et al. [11] egy egyszerűsített analitikus modellből fél-empirikus analitikus modellt hozott létre oly módon, hogy irodalomból adaptált mérési eredményeket, melyek segítségével gyors, de megbízható előrejelzést tudott adni egy szélfogó – torony áramlástani működéséről. A fél-empirikus modell eredményeit CFD szimulációs eredményekkel és mért adatokkal egyeztette össze. Montazeri et al. [12] egy kétoldalú széltornyot vizsgált szélcsatorna mérések, füst-vizualizációk valamint CFD és analitikus modellezés segítségével. Kiemelte, hogy nem csak mérésekkel célszerű az elméleti számításokat, modelleket igazolni, hanem fordítva is lehetséges az elméleti modellek segítségével a kísérleti mérések pontosságát és bizonytalansági tényezőit kiküszöbölni.

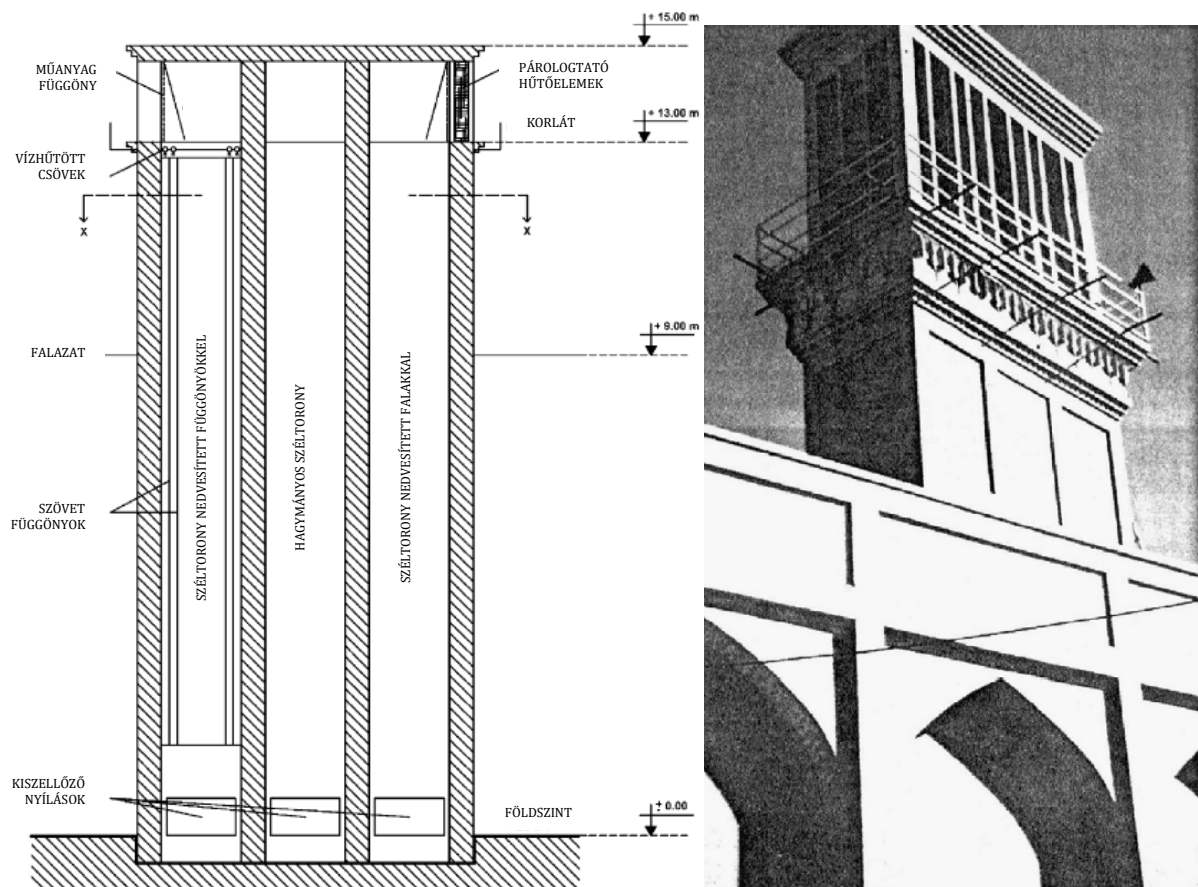
Shichao Liu et al. [13] analitikus modell illetve laborkísérletek helyett CFD szimulációkat alkalmazott szélfogó torony szerkezet lamellázatának kialakításához és szellőzési stratégiák teszteléséhez (2.3. ábra) véges-térfogat módszer, térhálózás és Navier-Stokes egyenletek (tömeg-, energia- és lendület megmaradási egyenletek) alkalmazásával.



2.3. ábra: Egy széltorony szerkezet CFD szimulációs eredménye, áramlási sebességek (m/s) [13]

M. N. Bahadori et al. [14] három különböző megoldású, de azonos méretű széltornyot hasonlítot össze: egy hagyományos széltorony mellett egy nedvesített függönyökkel ellátott tornyot, továbbá egy párolgási hűtőelemekkel nedvesített felületű tornyot vizsgált valós mérésadatgyűjtés segítségével (2.4. ábra). A két új nedvesített torony légátöblítése minimálisan csökkent, de lényegesen intenzívebben hűtöttek, mint a hagyományos toronyverzió ($\Delta T_{\text{levegő}} = 5\text{-}12\text{ K}$ -el nagyobb hűtési hatás a tornyokból kilépő levegő hőmérsékletre), valamint a függönyökkel hűtött torony magasabb, a nedvesített felületekkel rendelkező torony pedig lassabb szélsébségek mellett teljesített nagyobb légátöblítést. A technológia a mérések alapján képes kiváltani sok esetben a párolgási hűtőberendezéseket.

Annak ellenére, hogy számos tanulmány található a széltornyokkal kialakított természetes épületszellőzési rendszerekről, ezek egymással való összehasonlítása nehéz feladat, mert a kísérletek peremfeltételei általában különbözőek. Hangsúlyozandó emellett, hogy megfelelő minőségű, mérésadatgyűjtésből készített publikált adatállomány még nagyon kevés. Ehhez még hozzájárul, hogy a természetes légáramlási rendszerek komplexitása magas, így fenti okokból kifolyólag ezekről a rendszerekről a kialakított tudásbázis még nem komplett.

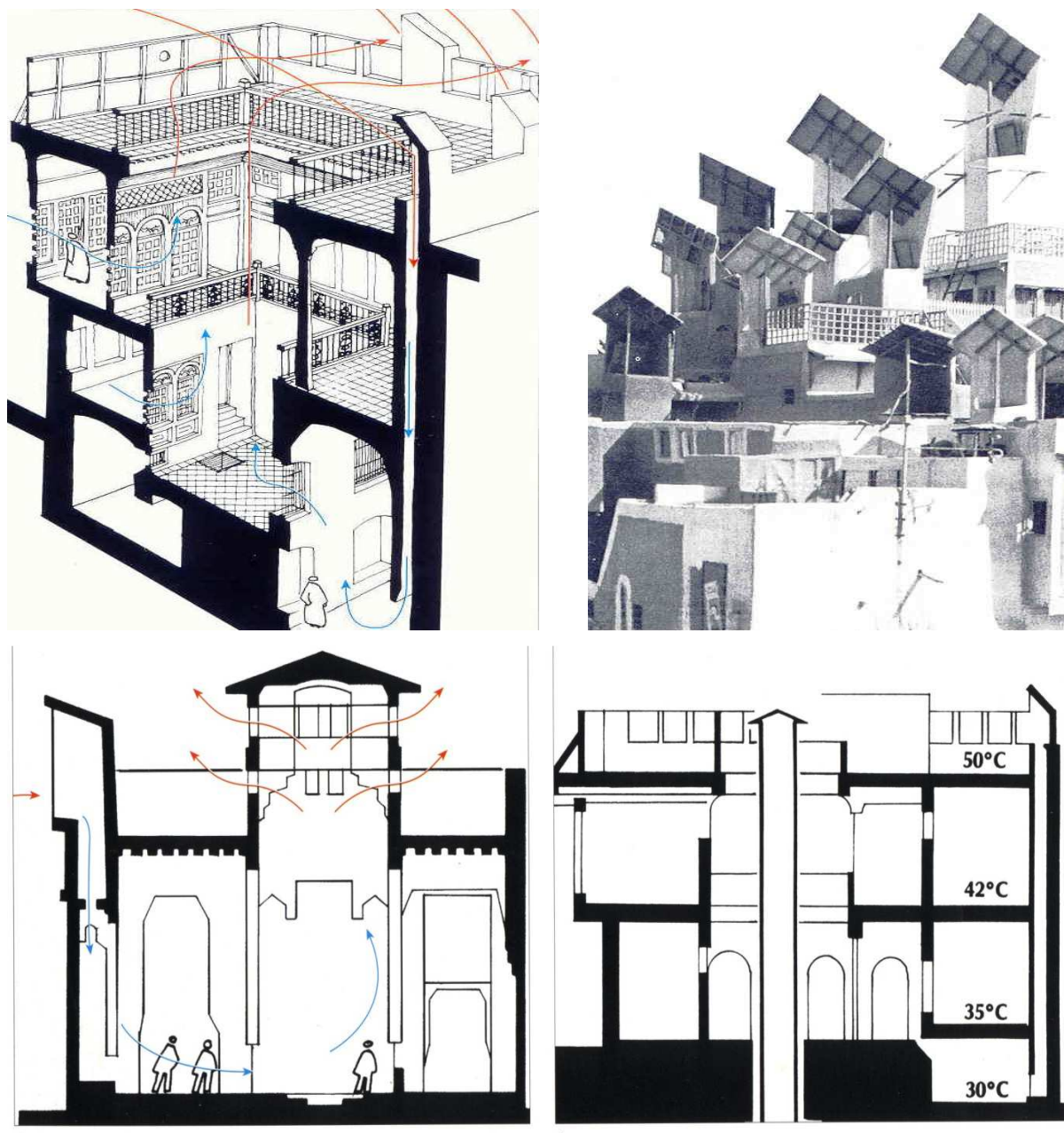


2.4. ábra: Három széltorony variáció vizsgálatai, Yazd Egyetem, Irán. Metszet (balra), fotó (jobbra). [14]

2.2 A szakmagyakorlat megvalósult eredményei

A tradicionális (vernakuláris) építészetben, főként a forró, száraz klímazónákban, a sivatagok szélén az épületek magukba fordulnak, „hátat fordítanak” a mostoha időjárásnak, mert árnyékot és hűs levegőt kell biztosítaniuk, illetve védelmet a homokviharakkal szemben. Magas hőtároló tömeggel rendelkező anyagokból, kőből, vályogból, földből készültek a vastag falú épületek, elviselhető belső klímát biztosítva. Az épületek napközben hővédelemet nyújtottak, eltárolták a nappali hőenergiát és többórás fáziskéséssel, éjszakai hidegben visszafűtötték ezzel a belső helységeket. Az uralkodó szélirányba néző „badgír” (2.5. ábra, felső képek) szélfogó tető felépítmények befogták a légáramlatokat, melyek párosodtak és lehűltek a hőtároló falak csatornáiban, majd beáramoltak az épületbelsőbe. A felmelegedő belső levegő gravitációs szellőzés, kürtőhatás elve alapján felfelé áramolva elhagyta az épületet a felül nyitott központi udvarok vagy szellőző széltornyokon keresztül (2.5. ábra, alsó képek). Így módon egy passzív légkondicionáló hatású, kellemesebb belső klímaviszonyokat kialakító építészeti,

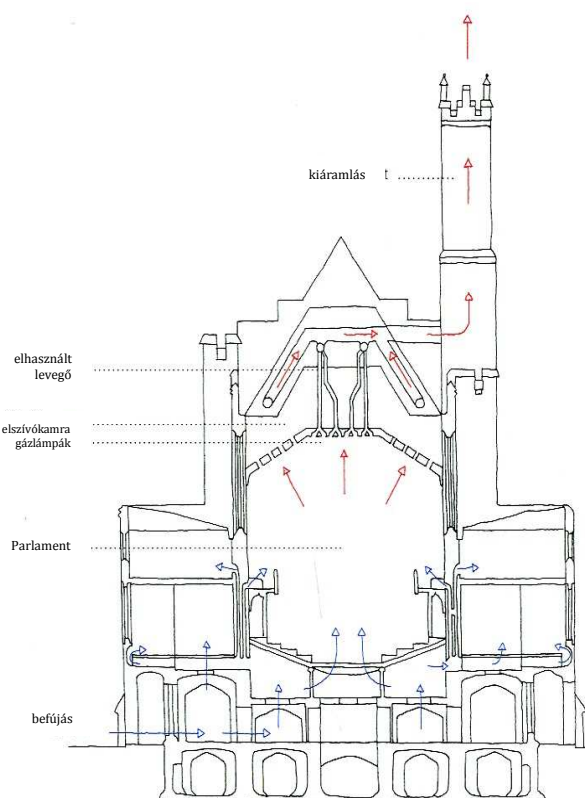
épületszerkezeti megoldás született. A hőmérsékletkülönbség a földszint és a tető között $\Delta T_{\text{levegő}} = 20 \text{ K}$ értéket is elérheti. [15]



2.5. ábra: Badgir szélfogó épületszerkezet működési elv (fent balra), Badgir szellőzőnyílások Haiderabad, Pakisztán (fent jobbra), Badgir szélfogó és Malkaf széltorony épületszerkezetek kombinációjának működési elve (lent balra), badgir és központi felül nyitott udvar kombinációjának működési elve (lent jobbra) [15]

Az ipari forradalom kialakulásával egyre nagyobb igény jelentkezett középületek létesítésére, színházak, kórházak, katonai laktanyák megvalósítására, mely épületfunkciók használata egyre jobban igényelt megfelelő, hatékony szellőzési technikákat. A 19. század elején találékony,

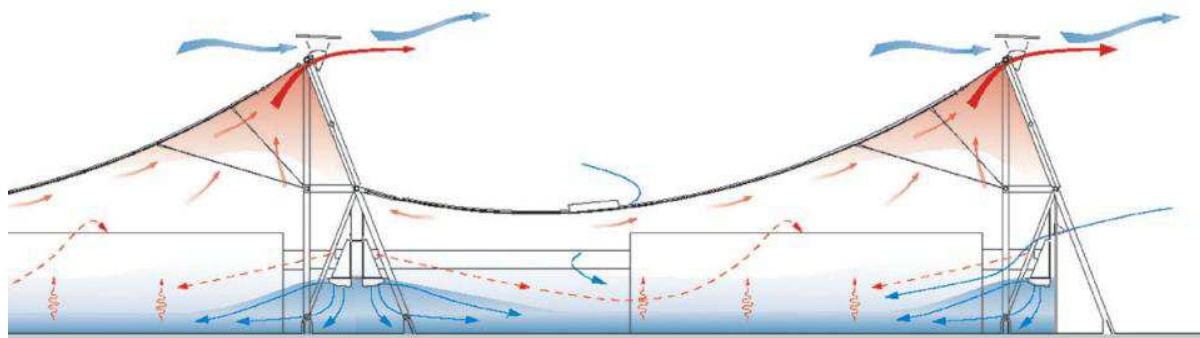
részleteiben kidolgozott természetes szellőzőkonceptiókat valósítottak meg épületekben: az igen jól dokumentált londoni parlament alsóházának projektjét 1835 – 1845 között David Red kémikus valósította meg természetes, elárasztásos szellőzőrendszerrel (2.6 ábra). A 64 db, működéséhez levegőt felhasználó gázlámpa kibocsátott gázainak nem volt szabad bejutni az országgyűlési képviselők tartózkodási terébe, az ülésterembe. [15.1, 15.2]



2.6 ábra: A londoni Parlament Alsóházának terme - működési elv (jobbra), fotó (balra)

Az ősi, illetve történeti energiahatékony szellőzősi, épület aerodinamikai technológiákat a modern építészet is kezdi újra felfedezni, és különböző, főként nagyobb léptékű középületekben alkalmazni. Thomas Herzog, nemzetközileg meghatározó egyéniség a fenntartható építészet területén egy speciális kiállítócsarnok épületet hozott létre 1996-ban (2.7. ábra), ötvözve a csarnok és a szellőző kürtő-torony karaktert egy épületen belül. A gravitációs szellőzés, a szél szívó hatása a tető magas pontjain, és a kombinált mesterséges légellátás üvegfolysókon keresztül egy hatékony rendszert képez, melynek köszönhetően fűtési üzemidőben kb. 25%, hűtési üzemidőben pedig kb. 40% energia megtakarítást lehet elérni egy kevert, mesterséges szellőzéssel rendelkező megoldáshoz képest. Fűtési üzemidőben, rendezvények idején nem szükséges fűteni az épületet, májustól novemberig természetes szellőzés (gépi befújás mel-

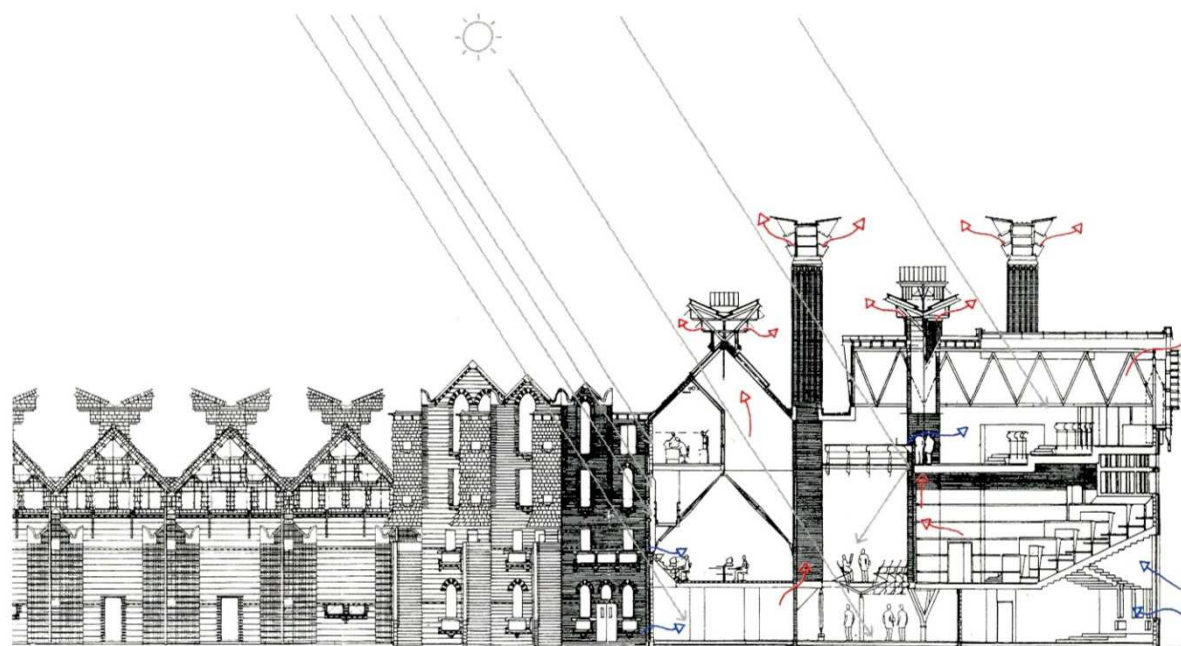
lett), egész évben pedig különböző időintervallumokban szabad (csak passzív) szellőzés üzemelhet. [16, 17]



2.7. ábra: Mesterséges és természetes szellőzői rendszer a Halle 26 rendezvénycsarnokban, a 2000-ben rendezett hannoveri Expo területén. Szellőzői koncepció (fent), fotó (lent) [16]

Short Ford Associates tervei alapján 1993-ban megvalósult a De Monfort Egyetem az angol Leicesterben (2.8 ábra). Bár nagyon különböző funkcionális terek alkotják az épület együttest (laborok, auditóriumok, design stúdiók), sikerült megoldani, hogy majdnem a teljes komplexumban passzív szellőzést lehet üzemeltetni. A legtöbb helységet ablakszellőzéssel, a gépházakat és nagyelőadókat pedig „termoszifon” effektus elvén, a tornyok kürtőhatásával, gravitá-

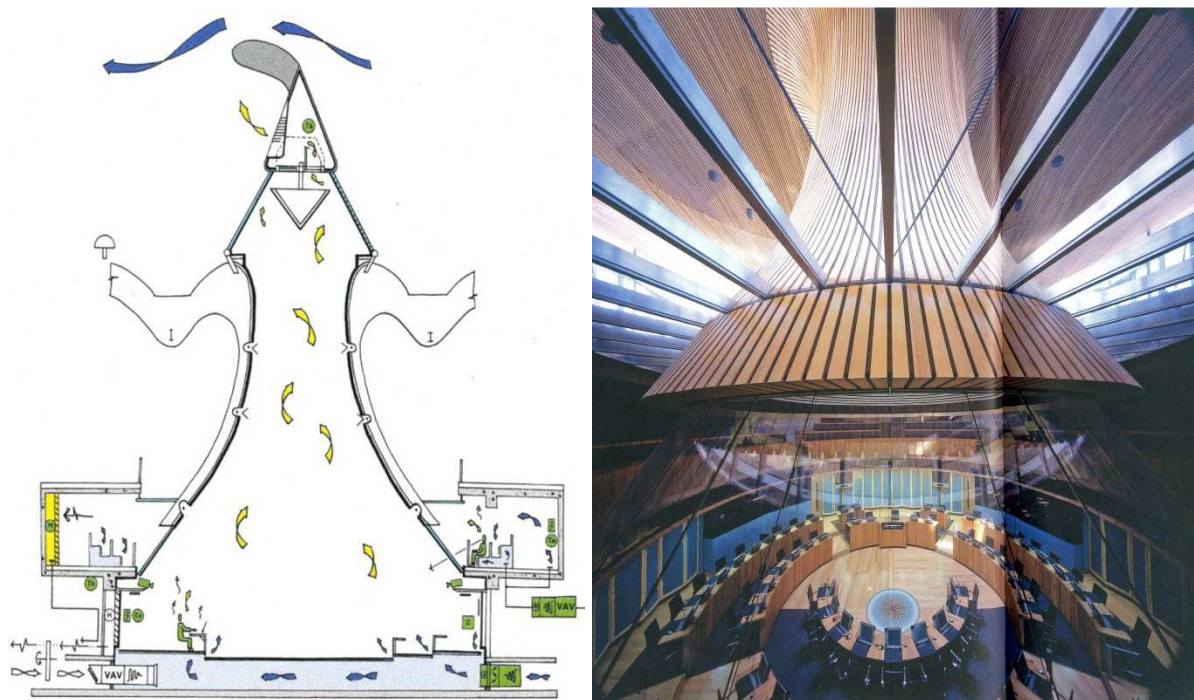
ciós konvekciós szellőzéssel szellőztetik ki, frisslevegő pedig az alsó szinten tud utánáramlani homlokzati nyílásokon keresztül [18].



2.8. ábra: De Monfort Egyetem, Leicester, természetes szellőző és megvilágítási koncepció (fent), fotó (lent)[18]

Richard Rogers terve alapján 2005-ben megvalósult Cardiff-ban Wales Parlamenti épülete (National Assembly for Wales), mely kürtőformájú tanácskozó terme (és nagyrészt az egész

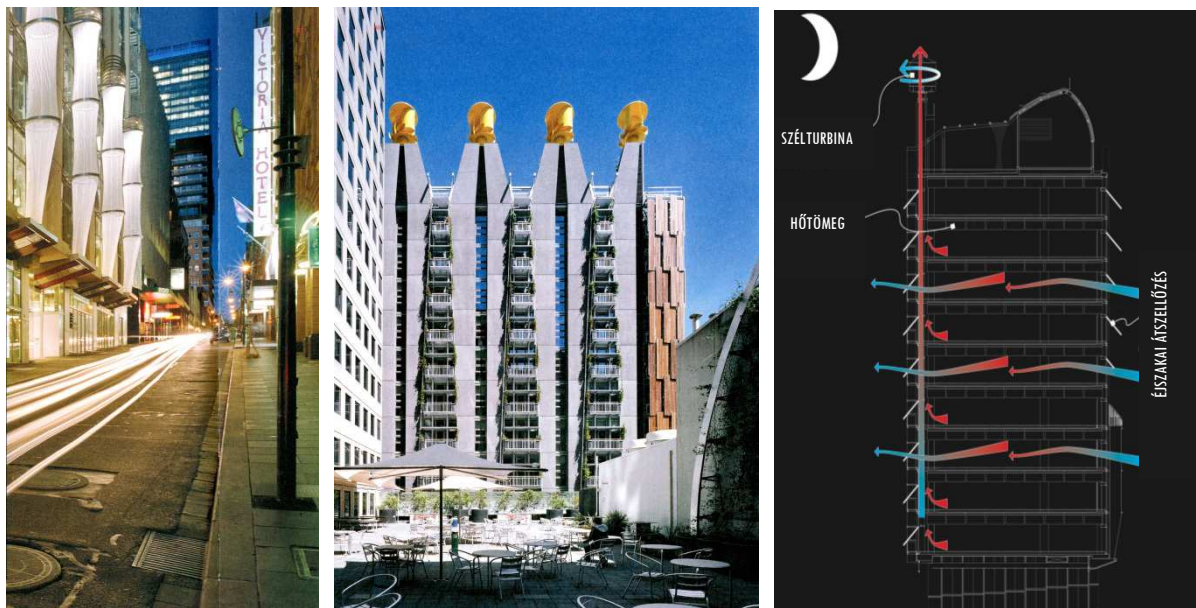
épület) természetes szellőzéssel működik; kizárólag extra igény esetén kapcsolják be a mesterséges kondicionálást. A tanácssterem tetején egy forgó, mindig az aktuális szélirányba beállító kiszellőztető szerkezet helyezkedik el, mely szélárnyékolt oldalán lamellázott szellőzőnyílások találhatók – itt hagyja el az épületet a felszálló meleg használt levegő, a kialakult alacsony nyomású terület szívóhatása miatt. [19, 20] (2.9 ábra)



2.9 ábra: A walesi Parlament tanácssterme, - a kürtötér tetején szélirányba forgó kiszellőztető csúcsszerkezet

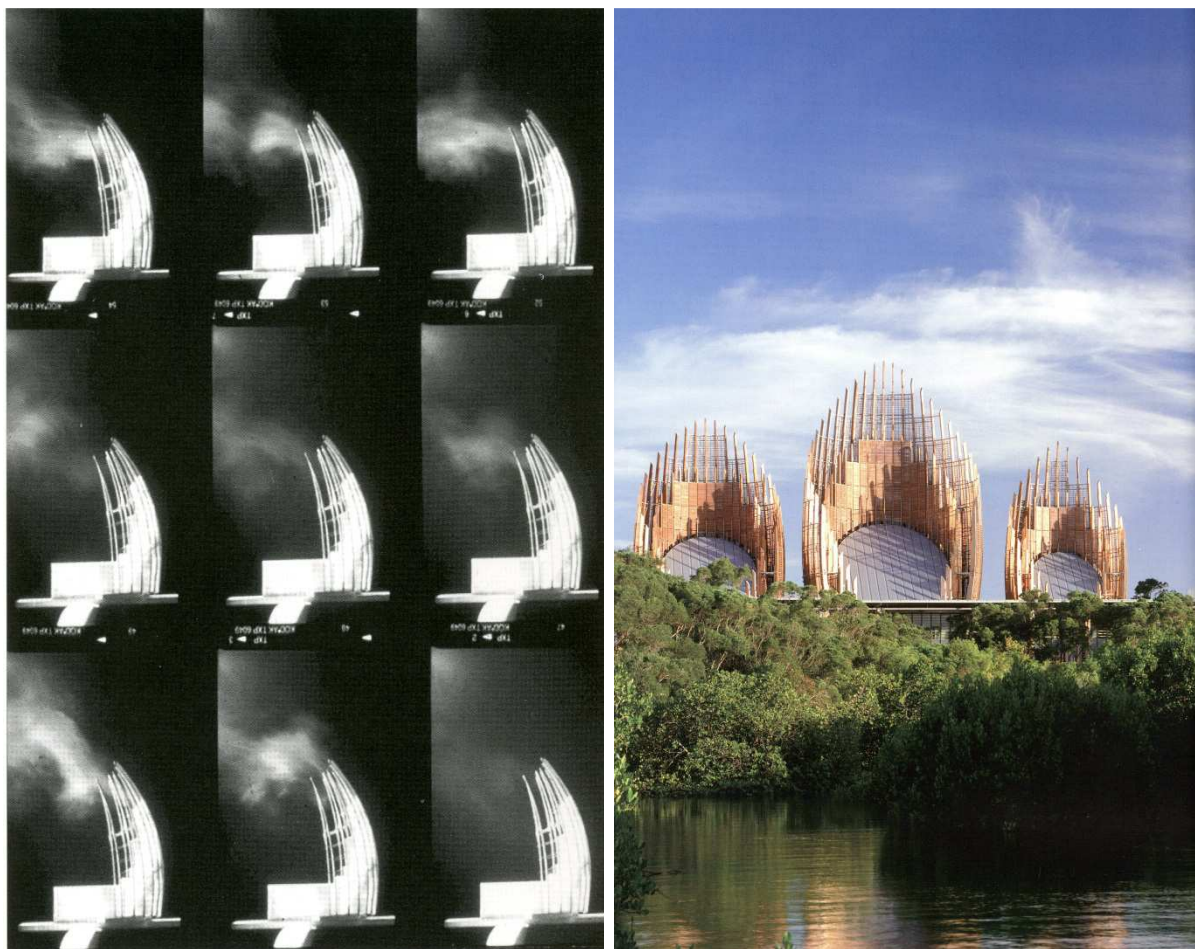
Melbourne-ben 2006-ban megvalósult a DesignInc tervezőiroda tervei alapján a CH2 elnevezésű városháza épülete, Ausztrália első olyan irodaépülete, mely a hatszillagos Green Building Council (Környezettudatos Építés Egyesület) minősítést elérte és túl is haladta (2.10. ábra). 80%-al kevesebb energiát és 70%-al kevesebb vizet fogyaszt az épület üzemeltetése egy konvencionális irodaépülethez képest. A komplex koncepció kardinális eleme a természetes szellőzés, mely éjszakánkénti alkalmazása a hőtároló födémszerkezetek lehűtését biztosítja. Nappal 17 m magasságból külső levegőt hűtenek le nedvesítés segítségével az utcai homlokzaton elhelyezett párasító légcsatornyákon keresztül; a hűtött levegővel pedig PCM (phase change materials) fázisváltó anyagokkal ellátott rendszert hűtenek le, melyek a mennyezeti sugárzó hűtőpanel szerkezeteket hűtik aktívtechnika (gépészet) alkalmazásával. A használt levegő a szintenkénti álmennyezetekben áramlik az északi homlokzat felé és ott fölfelé áramolva elhagyja az épületet. Hat szélturbina az északi homlokzat függőleges kiszellőző kürtőit

tetején rásegít ennek a használt levegőnek a gravitációs felfelé irányuló kiáramlására, mint egy szélenergiával meghajtott ventilátor rendszer. [21]



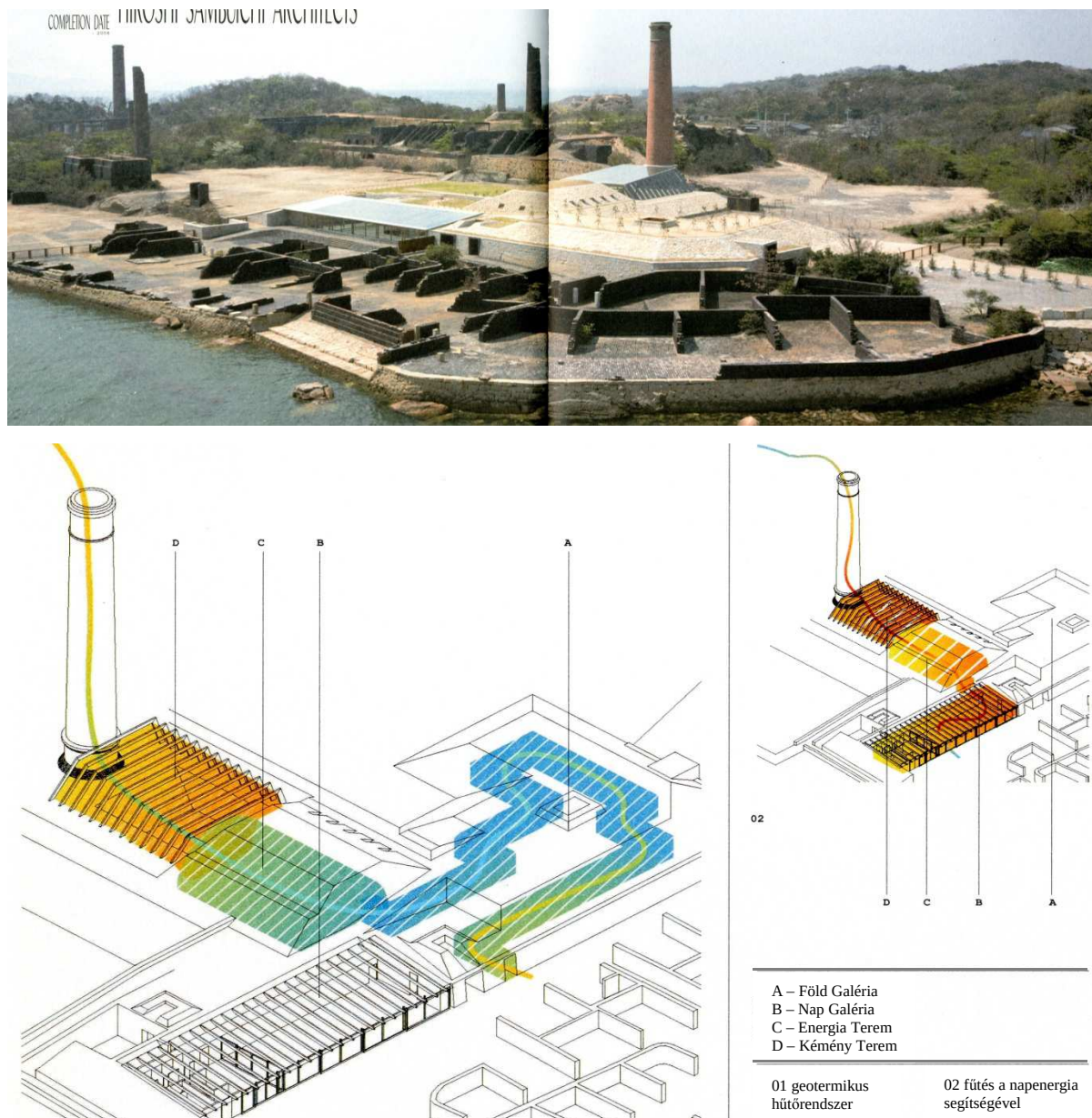
2.10. ábra: CH2 városháza épület Melbourne-ben hűtő-párásító szellőzőkürtőkkel (balra), szélturbinákkal (középen) és az éjszakai szellőzés működési elvével (jobbra) [22]

A modern építészet és a tradicionális kultúra és építéstechnológia ötvözésének szép példája Renzo Piano Jean-Maria Tjibaou Kultúrközpontja (Nouméa, Új-Kaledónia) [23, 24]. A régi kultúrát idéző süveg formájú épületrészek jellegzetessége az aerodinamikai pajzsot képző kéthéjű tetőszerkezet, mely segítségével az uralkodó szélviszonyokat különböző szélességek esetén is hatékonyan tudják használni természetes szellőzésre (2.11. ábra). Erős szélben a kürtő jellegű pajzsszerkezet tetején az alacsony nyomásnak köszönhetően kiáramlik a használt levegő, míg a széloldalon (luv oldal) ritkábban, a szélárnyék oldalon (lee oldal) pedig gyakrabban nyílászárókat nyitva a szél frisslevegőt nyom az épületbe. Közepes szélereőség esetén minden alsó nyílás megnyitásával üzemeltetik az épületet, - a kiáramlás a kürtő tetőn keresztül történik ekkor is. Gyenge szélviszonyok között a pajzsformájú épületburok szerkezet kürtőhatása gravitációs szellőzésként üzemel, mely alacsony nyomású zónát alakít ki a földszinten, így a frisslevegő utánáramlás biztosított.



2.11. ábra: Jean-Marie Tjibaou Kultúrközpont Új-Kaledóniában fotó (jobbra), szélcsatorna tesztek (balra) [27,28]

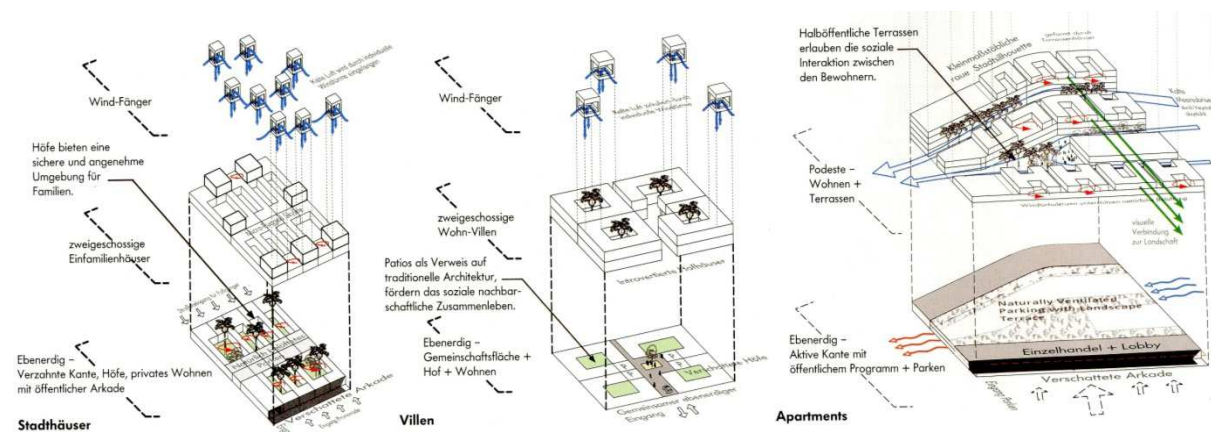
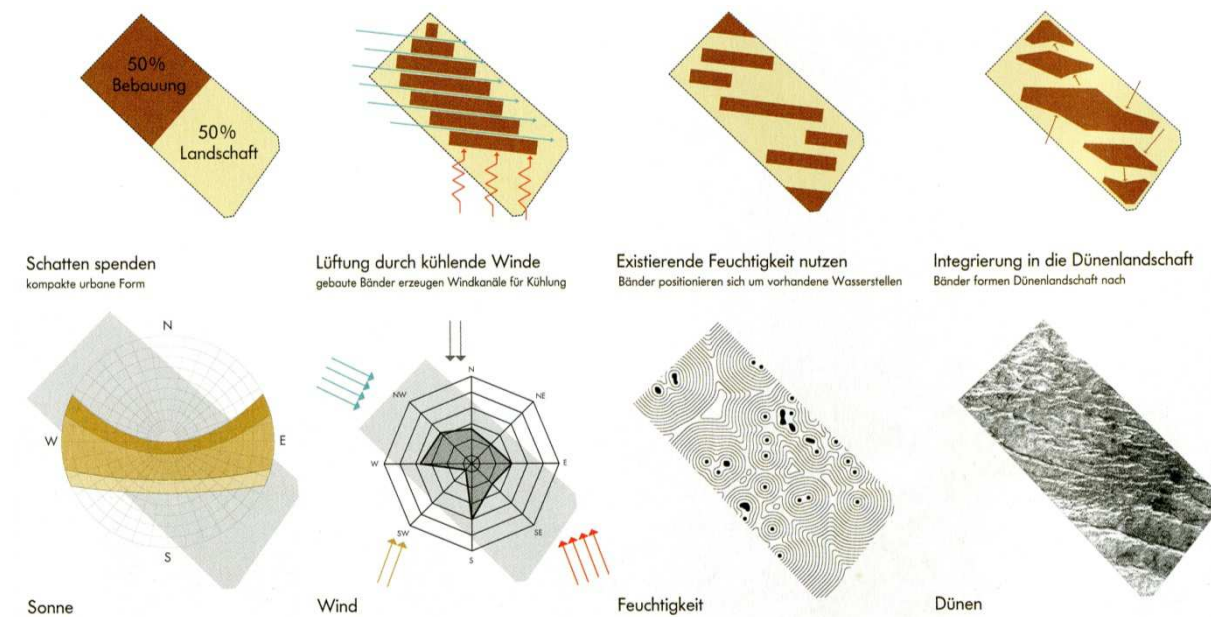
Japánban az Inujima Art Projekt keretében egy egykori rézgyártó ipari területet rekultiváltak Hiroshi Samboichi építész tervei alapján egy folyamatos kiállításokat megábrázoló komplexum formájában [25]. A régi gyárkéményt, mint egy passzív „meghajtó motort” szervesen integrálja az épület koncepciója a természetes szellőzés rendszerébe (2.12. ábra). Fűtési időszakban a felmelegedő levegőt az üvegtetővel rendelkező csarnokból a torony-kürtő átszívja az épületen keresztül és a kürtő tetején kiereszti a szabadba. Nyári időszakban a kémény kürtő az alsó szintről szívja meg a hűvös levegőt, áthűtve, átszellőztetve az épületet, majd kürtőhatás segítségével kiszellőzteti a meleg használt levegőt.



2.12. ábra: Inujima múzeum, Japán. Rézgyártó iparterület rekultiváció, átalakítás. Légi fotó (fent), fűtési és hűtési koncepció szellőzéssel (lent) [25]

Az urbanisztikai szintű településtervezés szegmensében innovatív tervezési példákkal találkozhatunk, melyek közül a Xeritown nevezetű 590.000 m² alapterületű városbővítési projekt Dubaiban vernakuláris (tradicionális), low-tech (alacsony gépesítési szintű, egyszerű) tervezési módszereket is alkalmaz. [26] A 2.13. ábrán látható városkonceptió a körülményekhez képest komfortos és alacsony energiafogyasztású városnegyed tervez 7000 lakos számára, mely keretében a tervezők az épületekkel és geometriáikkal, szerkezeteikkel történő árnyékolást, a széláramlatok hűtési hatásait, a meleg szelek elleni védelem kialakítását (utcahálózati

infrastruktur), a meglévő vízfelületek hűtőhatásának kihasználását, a lankás, dombokkal rendelkező természeti terület tömegbeli interpretációját kezelik komplex módon.





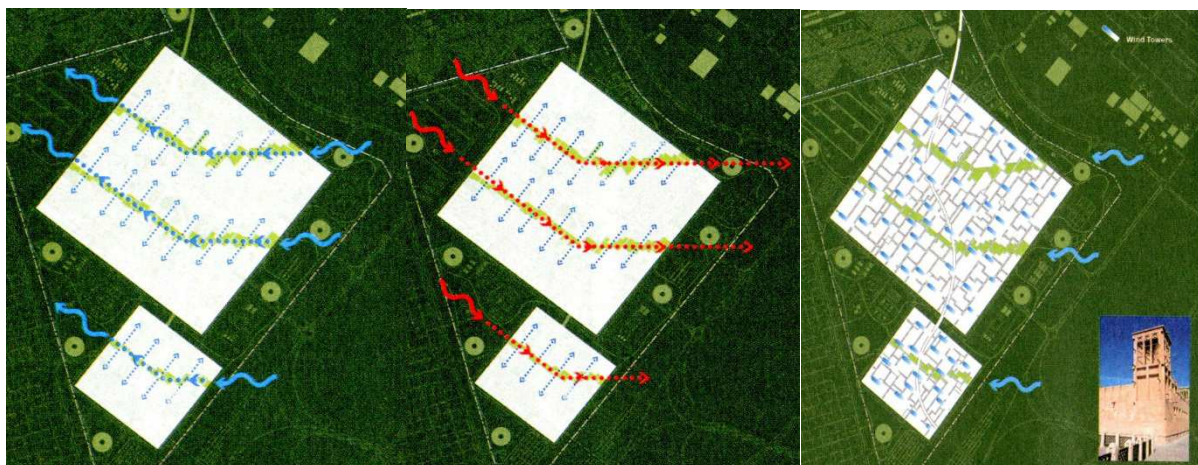
2.13. ábra: Xeritown, Dubai, klimatikai tervezési aspektusai (fent), lakóépületek szellőztetőtornyokkal (középen), látványterv (lent) [26]

A tipikus tradicionális építészeti elemeket, a privát tér és a félig közterek közötti fokozatos átmenet megoldását is alkalmazza az urbanisztikai koncepció. A passzív szellőzés szempontjából fontos szellőztetőtornyok (szélfogók, széltornyok) a városi villák és kisebb udvaros lakóházak tetején kerültek elhelyezésre, individuális hűs frisslevegőt biztosító rendszerként.

Első településtervezési projektek már megvalósulóban is vannak. A Foster Associates tervezőiroda Masdar Cityprojektje a zero CO₂-emissziójú város vízióját tűzte ki célul (2.14 ábra) Abu Dhabi-ban, [27] amely egy fenntartható jövőváros és megújuló energiaforrások technológiáinak kutatási-fejlesztési laboratóriumaként is hivatott működni. Az utcahálózatot szoláris és aerodinamikai szempontok figyelembevételével tervezték, a terek és épületek árnyékolásának és a széláramlatok szellőztető és temperáló hatásának kiaknázásával fejlesztették. A városi „hősziget” effektus kiküszöbölése céljából a nappali meleg légáramlatok a zöldfelületekkel ellátott fő utcavonulatokat, városi „hidegszigeteket” öblítik át, miközben lehűlnek, illetve az éjszakai hűvös széláramlatok is ezeken a folyosókon szellőztetik át a várost. A városaerodinamikai tervezést szélcsatorna tesztekkel és klímamodellekkel végezték, az eredmények pedig mutatták, hogy a város területei hűvösebbek lettek a városon kívüli természetes környezettel szemben. A meleg északnyugati széláramlatokat magas épületek be tudnák terelni a városba, ezért épületmagasság korlátozást rendeltek el. Az északnyugat-délkelet irányú

utcák nem lehetnek 75 méternél hosszabbak, hogy ne keletkezzenek folytonos átmenő meleg áramlási „folyosók”, melyek az utcákat és nyitott közösségi tereket felmelegítenék. Az utcák torkolatainál tradicionális elven működő széltornyokat helyeznek el a légmozgás további koordinálása és a hűvösebb szelek utcákba való becsatornázása végett.

A központi épületkomplexumban vernakuláris (tradicionális) elven működő széltornyokat terveztek modern technológiájú épületszerkezetekből, melyek lehetővé teszik a tornyok között elhelyezett árnyékoló napelem tetőszerkezet segítségével, hogy víz- és zöldfelületeket hozzanak a földszinten létre, valamint, hogy a használt meleg levegő a tornyok kürtőhatásának és a szél szívóhatásának köszönhetően kiszellőzzön a tornyok felső nyílásain keresztül, továbbá, hogy frisslevegő áramoljon a földszinten a belső terekbe.





2.14. ábra: Masdar City, Abu Dhabi, aerodinamikai várostervezési stratégia (fent), központi épület széltorony szellőzőszerkezete (középen balra), utca szellőztető torony (középen jobbra), látványterv (lent) [27,28]

Az épített környezetben megjelenő építészeti és épületfizikai szakmagyakorlat nemzetközi szinten érdekes, innovatív első példákkal úttörő tevékenységet folytat egy új fenntartható építészeti kialakításában, melynek egyik legszerveesebb alkotóeleme a természetes szellőzés. A példák mutatják, hogy a passzív szellőzés nem kizárólag a száraz és meleg éghajlattal rendelkező területeken alkalmazható, hanem sokkal inkább egy emberi elementáris igényről beszélhetünk, melyet különböző klímaviszonyok között, különböző területeken kivitelezett középületekben, irodaépületekben integrálnak és üzemeltetnek. Számszerűsített, főként mérési eredményeken alapuló, tudományos színvonalú adatok az ilyen épületek klimatikai és energetikai működéséről, hatékonyságáról, a természetes szellőzőrendszer monitorozott épületfizikai értékeiről ritkán fordulnak elő. Ha projektekben találkozunk is számokkal, mérési eredményekkel, akkor is csupán általános adatok publikáltak – esetenként szimulációs elméleti számítások lelhetők fel – viszont a hivatkozás, módszerek, mérések illetve a műszaki és tudományos háttér információk hiányosak és ritkák.

2.3 A szakirodalom összegzése

A tudományos publikációk széles körben közölnek eredményeket az elméleti analitikus és CFD áramlástan szimulációs modellek számszerűsített eredményeiről a természetes torony

szellőzési rendszerekkel rendelkező épületek különböző eseteiben. Kísérleti mérésekkel végzett kutatási eredmény viszont már igen kis számban lelhető fel a publikációk repertoárjában. Tovább nehezíti a helyzetfelmérést, hogy a mérésekkel dokumentált vizsgálatok kevés esetben történtek áramlástanilag komplex, nagyléptékű középületekben. Sokkal inkább kisléptékű helyiségekre vagy csupán egyes szelőzőszerkezetekre, kürtőkre irányulnak a tesztek, kísérleti kutatások. Mivel a szakmai élet kivitelezett, első úttörő épített példáiban is nagyrészt az épület projekt építészeti bemutatásával találkozunk - tudományos számadatok nélkül -, ezért összefoglalható, hogy mind a kutatási projektek tudományos irodalmában, mind a megépült projektek publikációiban szignifikánsan kevés gyakorlatban mért, tudományosan számszerűsített információ áll rendelkezésre. Ennek következtében az eddig létrehozott tudásanyag komplex épületek passzív szellőzéséről egyelőre még hiányos és sok esetben új kutatási területnek tekinthető.

3. A kutatás célja

A szakirodalom szintetizáló elemzéséből kiindulva a kutatás alapvető célja egy konkrét kísérleti épület természetes szellőző rendszeréről történő mérésadatok, számszerűsített fizikai paraméterek gyűjtése egy épület monitoring gyakorlati mérés technika rendszer segítségével.

A prototípus épület (3.1. ábra) a PTE, Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar, Építész-mérnöki Intézet, Energiadesign tanszékén fejlesztett ENERGIA DESIGN® tervezési módszerrel valósult meg, mely segítségével a projekt energiafogyasztása - a napelemes rendszer eredetileg tervezett méretűre való bővítésével - pluszenergia mérleget képes elérni. A kísérleti épület energiahatékonysági és fenntarthatósági koncepciójának szerves része a belső terek passzív szellőzői rendszere, mely a kisméretű helységek standard, egyoldalú ablakszellőzése mellett egy egyedi fejlesztésű szellőző szél tornyokból és széláramlást gyorsító szélterelő szerkezetekből álló csarnokszellőzésből áll. Az épület speciális tervezési folyamatában komfort-elméleti és energetikai tényezők figyelembe vételén kívül épület aerodinamikai tervezési eljárásokat is alkalmazott a tervező, melyekkel a belső terek természetes szellőzői koncepciójának döntéseit, értékelését volt lehetséges megtámogatni és igazolni a ház passzív szellőzésére végérvényesen tervezett rendszert. Az áramlástan tervezési fogások komplex szélcsatorna mérésekből álltak, melyek eredményei egy első CFD numerikus áramlástan szimulációval vissza is igazolódtak.

A kísérleti épület, a RATI Kft. ipari- és irodaépülete Komlón létesült, egy épületfelügyeleti rendszer kiépítésével, mely segítségével a gépészeti rendszer, a motoros nyílászárók és árnyékolók szabályozhatók. A PTE Energiadesign tanszék egy mobilis épületmonitoring mérésadatgyűjtő rendszert építtetett ki a komlói épületben, mely kísérleti épületklimatikai és -energetikai laborként nagyfelbontású és hosszútávú vizsgálatok, valamint mérésadatgyűjtés céljából rendelkezésre áll a tanszék kutatócsoportja számára. A komplex mérőrendszer segítségével az épület finomhangolt üzemeltetési stratégiáját és további épület- és üzemeltetési koncepciókat is lehetséges fejleszteni mind az építészeti, mind a gépészeti, továbbá a passzív szellőzői rendszerek tekintetében. **Ezúton lehetőség nyílik jelen kutatás célkitűzésének megvalósítására, az épület passzív szellőzőrendszerének, szél tornyainak méréses vizsgálatára, a rendszer működőképességének és hatékonyságának konkrét valós mérésadatokkal alátámasztott minősítésére, számszerűsített kimutatására.**

Ezen kívül központi **kutatási cél az ENERGIA DESIGN® tervezési módszer alkalmazott áramlástan tervezési fázisának, a szélcsatorna modellkísérlet eredményeinek a valós prototípus épületben mért értékekkel való összehasonlító analízise, validációja.** Az eredmények szembesítése folyamán a szélcsatorna tesztekkel támogatott tervezés pontosságát hivatott kimutatni jelen kutatás. Az összehasonlítás eredményei alapján esetlegesen fellépő eltérések, hibák esetén a kutatás keretében, fejlesztési javaslatokat szükséges tenni.

A kutatás további célja, a modellkísérlet és a valós mérési eredményekből kiindulva konkrét, a kísérleti épületre vonatkozó **következtetéseket levonni, melyek fellépő fejlesztési lehetőségeket hivatottak feltérképezni, további kutatási hipotéziseket felállítani és jövőbeli kutatási irányokat meghatározni.**

Ugyanakkor e tanulmány tudatos erőfeszítéseket tesz jelen kutatás végén arra, hogy a hasonló karakterisztikájú csarnokjellegű épületekre vonatkoztatható **általánosított érvényű tervezési, esetleg üzemeltetési konklúziókat is vonjon le.**



3.1. ábra: A kísérleti épület, a RATI Kft. ipari és irodaépülete passzív szellőztornyokkal. Északi homlokzat a földszinti termelőcsarnok polikarbonát külső falával és 3 db kapuval

4. A kutatás módszerei

4.1 A kísérleti épület aerodinamikai tervezése

4.1.1 A projekt speciális tervezési módszere

A kísérleti épület a gépjárműipart kiszolgáló belső alkatrészek, kiegészítők műanyag technológia központja, mely létesítmény a gyártócsarnok és egy raktárcsarnok mellett egyben irodarészleggel és egy innovációs központ funkcióval is rendelkezik, fejlesztési irodával, műhellyel és többfunkciós előadó, étkező és rendezvényterrel kiegészítve. A projekt megvalósítása folyamán egy pluszenergia mérleggel rendelkező épülettervezési módszert is kifejlesztett a tervező [29] és a PTE Pollack Mihály Műszaki és Informatikai kar, Energiadesign tanszéke. Az ENERGIA DESIGN® épülettervező módszer épületszimulációkkal végzett energetikai és klimatikai épületmodellezés mellett, épületaerodinamikai modellezést, szélcsatorna méréseket és CFD szimulációkat is alkalmazott a terv kidokgozásához, az épület működési koncepciójának fejlesztéséhez, melynek szerves része a természetes szellőzés koncepciója.

4.1.2 A kísérleti épület szellőzési koncepcióterve

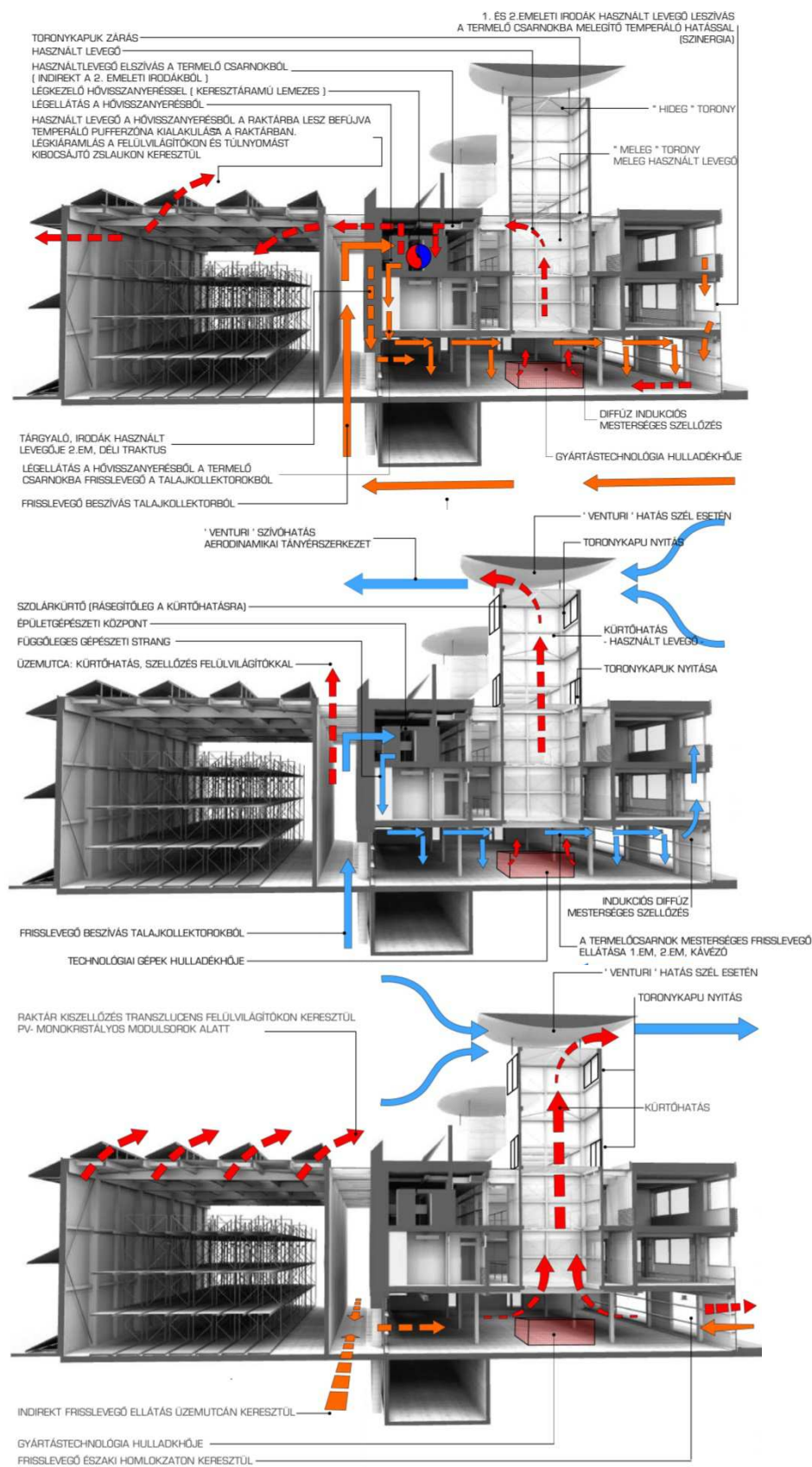
Az épület fenntartható, energiahatékony és környezettudatos működési koncepciója az év egyes évszakaiban szezonális üzemmódok alapján tervezett, fűtési, hűtési és átmeneti (passzív) üzemeltetési fázisokból áll. A működési koncepció, különböző építészeti, épületszerkezeti, épületklimatikai, épületgépészeti és energiaellátási alkonceptiókból áll. A kísérleti épület szellőzési rendszerét mesterséges, természetes és hibrid szellőzési elvek alkotják. Közös jellegzetessége a szellőzési elveknek, hogy minden alkonceptióban megtalálható: az építészeti alkonceptióban a természetes szellőzés a térszervezés légtereinek, formavilágának áramlástan meghatározó tényezője, az épületszerkezeti alkonceptióban a toronyszerkezetek anyagai, geometriái és a szellőző nyílászárók szerepelnek, az épületklimatikai alkonceptióban a passzív szellőzés üzemeltetési módozata, szellőztető és hűtőhatása dominál, az épületgépészeti alkonceptióban a mesterséges és a hibrid (félig mesterséges, félig természetes) szellőzés az egyik „főszereplő”, az energiaellátási alkonceptióban pedig a passzív és hibrid szellőztetés üzemideje, ventilátor villamosáram megtakarítása és a passzív szellőzésből adódó nappali és

éjszakai hűtés energiamegtakarítása a lényeges. Látható tehát, hogy az épület geometriájában, szerkezeteiben és működésében a szellőzés kulcsfontosságú szerepet játszik. A szezonális szellőzés működési elve a 4.1 ábrán látható [30].

Az épület komplexum szellőzése fűtési időszakban (4.1 ábra, fent) gépi szellőzéssel, hővisszanyeréssel üzemel, melynek aktív része a 3 db szellőzőtoronyból álló, a ház központi átriumát függőlegesen átszelő szerkezetegyüttes, mely a földszinti, egyszintes, 3,4 m belmagasságú gyártócsarnok légterével áll közvetlen kapcsolatban. Egy földalatti légcsatorna talajkollektoron keresztül, egy ventilátor által meghajtva bejut a frisslevegő a termelőcsarnokba, mely csupán a passzív geotermikus talaj-levegő kollektor által temperált (előfűtött). Az irodák használt, felfűtött levegőjének gyártócsarnokba való leszívásával a termelőcsarnok belső tere tovább temperált, majd az összes használtlevegő feláramlik a tornyokban a tetősíkon lévő zárt nyílászárókig. Itt a tetősíkon, a termikus épületburkon belül elhelyezett, tornyonként 1-1 elszívó légcsatorna csatlakozik a tornyokhoz, itt kerül elszívásra a használt meleg levegő a légtechnikai központba, ahol hővisszanyerés üzemel.

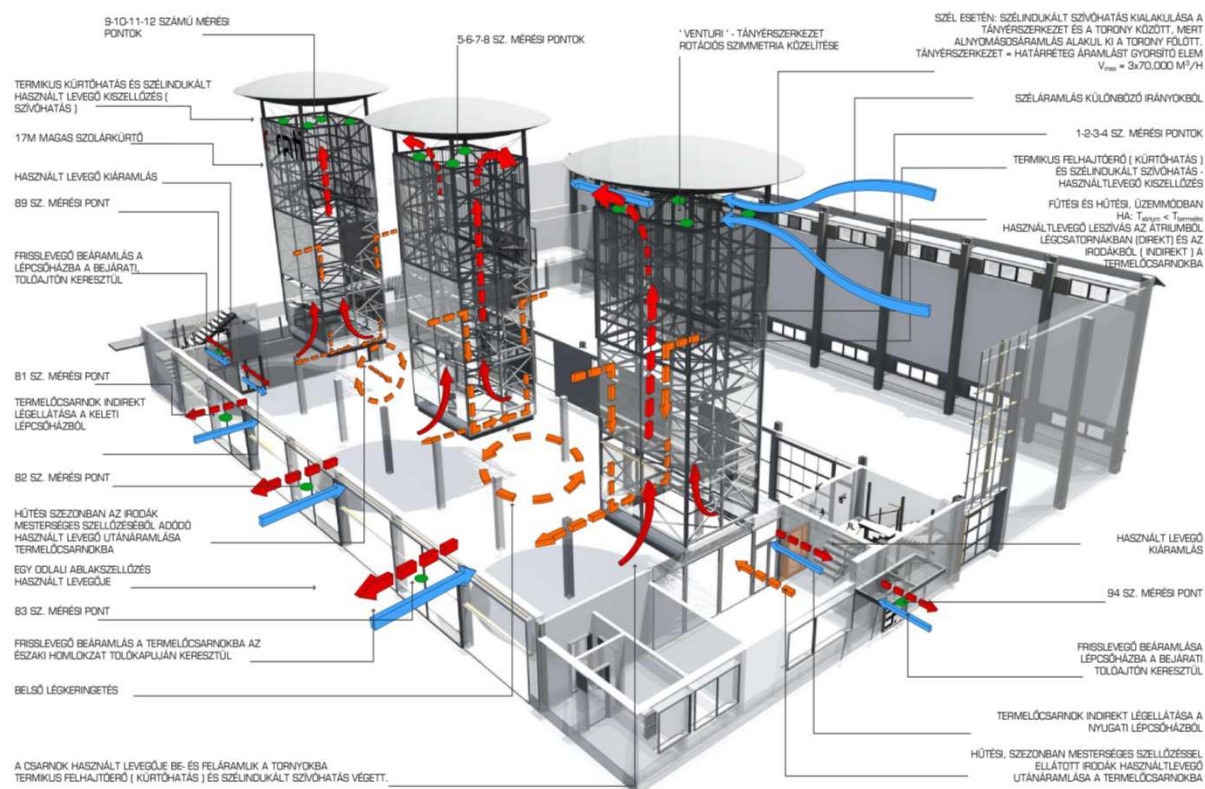
Hűtési szezonban (4.1 ábra, középen) a téli üzemmódhoz hasonlóan a talajkollektor előtemperálja (előhűtés) a gépi szellőzés által beszívott frisslevegőt, melyet egy ventilátor a mennyezet alatti anemosztátokon keresztül a csarnokba fújja. A felmelegedett használt levegő a szellőzőtornyokon keresztül gravitációs szellőzés, kürtőhatás elvén felfelé kiáramlik az épületből. Szél esetén a bernoulli áramlási törvény valamint az áramlási keresztmetszet, sebesség és nyomás összefüggése alapján a széláramlatok nyomása a torony és a felső szélterelő tányérszerkezetek közötti szűkített térben lecsökken, egyben megnövekszik az áramlási sebesség. Ezt a szélindukált szívóhatást „Venturi” effektusnak is hívják, ezért a tányérszerkezeteket Venturi-tányéroknak nevezte el a tervező. A szélterelő szerkezet tervezése tradicionális építéstechnológiákat (Badgír szélfogó, Malqaf széltorony) és épületbionikai formatervezési elveket ötvöztet (pingvin áramlástani rendszere) [31]. A nyári meleg időszakban éjszakai szellőzéssel üzemel a csarnok, a homlokzati kapukon keresztül légutánpótlás, a tornyokon pedig kiáramlás segítségével a napközben felmelegedett vasbeton földem, gerenda és pillér szerkezetek hőenergiáját lehetséges letölteni, a csarnokot a következő nap egy hosszabb időszakára (délelőtt) lehűteni.

Átmeneti, tavaszi, őszi időszakokban fűtés, hűtés és légtechnika nélkül üzemel a gyártócsarnok (illetve az egész épület), teljesen passzív módon a nyári éjszakai szellőzéshez hasonlóan (4.1 ábra, lent).



4.1. ábra: A kísérleti épület szezonális szellőzési koncepciója a földszinti termelőcsarnokban. Fűtési periódus (fent), hűtési üzemmód és éjszakai szellőzés (középen), passzív időszak (lent)

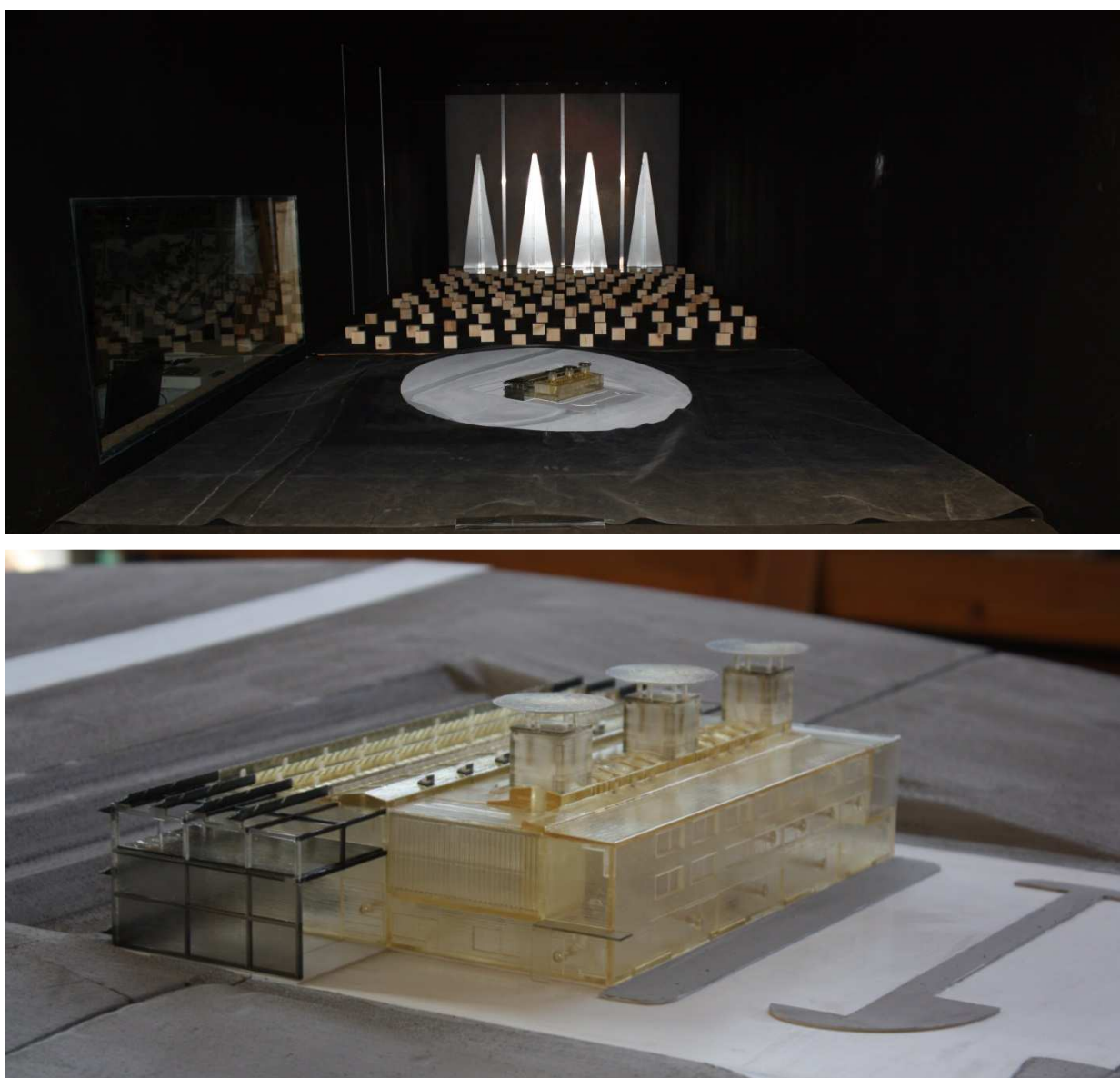
Jelen kutatás a komplex épület leglényegesebb központi terének, a termelőcsarnoknak a szellőzésére, ezen belül az átmeneti időszak összetett passzív szellőzésére koncentrált, mikor a termelőcsarnok beszellőzése az üzemcsarnok homlokzati kapujain keresztül, a kiszellőzés pedig a tornyokon keresztül történik. Ezen kívül a kutatás a hűtési szezon éjszakai, hasonló módon történő szellőzését, valamint a nappali hibrid szellőzést is vizsgálja, mikor a gépi szellőzés a gyártócsarnokba frisslevegőt fúj be, elszívás viszont nem üzemel, mert a kiszellőzést a szellőzőtornyok biztosítják. A 4.2. ábra a termelőcsarnok passzív szellőzésének a működését részletezi három északi homlokzati utánáramlási kapuval és három kiszellőző toronyszerkezettel, felső 'Venturi' torony-tányérszerkezetekkel. A déli tájolású raktárcsarnok is látható a terven, viszont a további 1. és 2. emeleti helységek nincsenek ábrázolva a termelőcsarnok működésének egyértelmű, érthető szemléltetése céljából. A koncepció működőképességének igazolása, hatékonyságának meghatározása egy szélcsatorna modellkísérlet segítségével valósult meg [31, 32].



4.2. ábra: A kísérleti épület passzív szellőzési koncepciója a földszinti termelőcsarnokban [33].

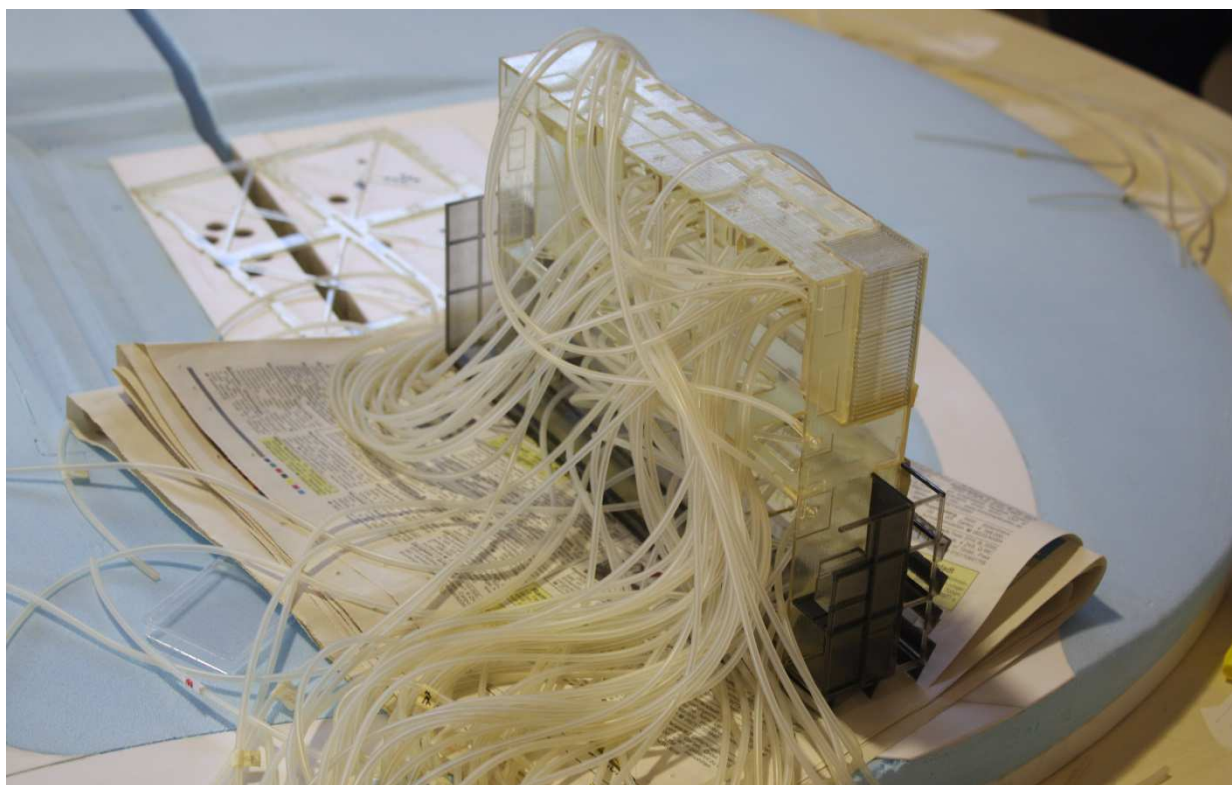
4.1.3 A szélcsatorna modellkísérlet technológiája

A kísérleti épület passzív szellőzési koncepciójának ellenőrzése céljából a szél épületszellőzésre gyakorolt hatására, egyben a széltornyok hatékonyságának meghatározására volt szükség. Az épületburok szerkezet felületén, a nyílászárókon fellépő nyomásviszonyok és az át-szellőztetett légtérfogat áram mennyiségek számszerűsítése Németországban, Hahnhofenben, a Dr. Theurer Áramlástechnikai Intézetben végzett szélcsatorna kísérletek keretében, egy Irwin által meghatározott úgynevezett határréteg szélcsatornában kerültek kivitelezésre [31, 32]. A szélcsatorna belső áramlási terét és a beépített kísérleti modellt a 4.3. ábra mutatja.



4.3. ábra: Kísérleti épület határréteg szélcsatornában elhelyezve (fent), a 3d nyomtatott tesztmodell fotórészlete (lent) [34].

A projekt modelljének méretétől függően az atmoszferikus határréteg áramlás kb. 150 m magasságig lett szimulálva az áramlási irányban elhelyezett axiálventilátor segítségével, amely háromszög formájú, turbulenciát előidéző úgynevezett vortex generátorokon keresztül fújja a levegőt az épület modelljére. A terep érdekességét 10x10 cm méretű fa kockatestek alakították ki. Az 1:200 léptékű, 3d nyomtatással készült épületmodell kb. 100 m átmérőjű környezetét is el kellett készíteni a vizsgálatokhoz. A modell nyílászárói mentén 95 db mérési pontot helyeztek el, melyeket egy magas érzékenységu nyomásmérő berendezéssel mértek egy akusztikailag kiegyenlített szilikon csőhálózat rendszer közvetítésével (4.4. ábra).



4.4 ábra: A kísérleti épület modellje a 95 db mérési pont nyomásértékeit közvetítő szilikon csőhálózattal [101].

A mérések 12 szélirányból, az átlagos magyarországi 3 m/s szélsébséggel történtek, időben átlagolt nyomáseggyütthatók meghatározásával: az épületburok nyílások elhelyezkedésének és méretének függvényében az után- és kiáramlási viszonyok kerültek számszerűsítésre, jellemző szélviszonyok és karakterisztikus léghőmérsékleti viszonyok között. Az épületburok mérési pontjain mért aktuális szélirány és szélsébség függő nyomásértékek (p) és a 10 m referenciamagasságban mért statikus nyomás (p_∞) különbségét az áramlási környezet referencia sebességéből (u_{Bezug}) adódó nyomással ($p = \rho \cdot u^2$) elosztva egy mértékegység nélküli nyomáseggyüttható számítható a következő összefüggés alapján [31]:

$$c_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho}{2} u_{\text{Bezug}}^2} \quad (1)$$

A kapott pozitív illetve negatív nyomásegységuttható értékeket az irodalomból vett épületbelső nyomásegységutthatókkal összegezve volt lehetséges meghatározni, hogy az adott nyílászárókon milyen mértékű nyomás uralkodik és milyen irányban fejt ki hatását (ki- vagy beáramlás). A nyomásegységutthatók segítségével az épületben átszellőztetett légtérfogat áram mennyiségek kiszámítása különböző jellemző hőmérsékletek mellett történt; a legtöbbször $T_{\text{külső}} \text{ levegő} = 31 \text{ °C}$ külső és $T_{\text{belső}} \text{ levegő} = 26 \text{ °C}$ belső léghőmérsékletnél. A kürtők gravitációs szellőzésének és a szélindukció együttes hatását kiszámítva az eredmények a vártnál jobbak lettek. A három torony akár $210\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ légátöblítést is képes teljesíteni bizonyos szélirányokból történő széáramlás esetében, így az épület passzív szellőzésének tervezett áramlástanai teljesítménye a szélcsatorna modellkísérlet sorozat segítségével igazolódott.

4.2 A megvalósult kísérleti épület bemutatása

4.2.1 A megvalósult prototípus épület összrendszere

Az ENERGIA DESIGN® tervezési folyamat keretében az energetikai szimulációk igazolták az épület pluszenergia mérlegét, miután a kivitelezés elkezdődhetett. A 2500 m^2 hasznos alapterületű épület (4.5. ábra) egy 10 m magas raktárcsarnoknak és egy termelőcsarnoknak biztosít helyet, irodákkal és szükséges szociális helyiségekkel kiegészítve, melyeket egy központi átrium szervez egységgé, kompakt épülettömeggé. Az épület innovációs központként is működik, fejlesztésiosztállyal ill. egy többfunkciós étkező, kiállító, előadó és rendezvényteremmel kiépítve.

Az előregyártott vasbeton pillérvázaz épület 12 hónap alatt készült el, előregyártott kéregpaneles és úsztatott esztrich födémszerkezettel, továbbá vázkitöltő téglá külső és belső falazóelemekkel. Hőszigetelő üvegezés és polycarbonat transzparens-transzlucens felületek tagolják a 20 cm hőszigeteléssel ellátott opak, nem fényáteresztő épületburok szerkezetet. A komplexum egy fűtetlen-hűtetlen raktárcsarnok részből és egy kondicionált főépület részből tevődik össze, mely tagoltság a keleti és nyugati homlokzatokról könnyen leolvasható.

A gépészeti koncepció alacsonyhőmérsékletű magas energiahatékonyságú felületi sugárzó rendszerből áll, padlófűtés és mennyezettermperálás formájában. A fűtési és az aktív, illetve

passzív hűtési energiát hőszivattyúk végzik, a mesterséges szellőzés pedig keresztáramú lemezes hővisszanyerős légkezelőkkel lehetséges. Az energiaellátás egy 100 kW teljesítményű geotermikus földszonda mezőből, továbbá hazánk, a tervező tudomása szerint legnagyobb, több mint 1 km hosszúságú talaj-levegő kollektorából, valamint termikus (napkollektorok) és fotovillamos (PV) szolártechnikából áll. [35]



4.5. ábra: A kivitelezett kísérleti épület Komlón

4.2.2 A megvalósult passzív szellőzőrendszer

A három fehér fesztet ponyva-tányérszerkezettel ellátott polycarbonat illetve üveg szerkezetű torony (4.6. ábra) nem csupán a termelőcsarnok kisszellőzését hivatott szolgálni, hanem felülvilágítóként a természetes megvilágítást is biztosítani.



4.6. ábra: A kivitelezett kísérleti épület kiszellőztető széltornyai „Venturi” tányérszerkezetekkel

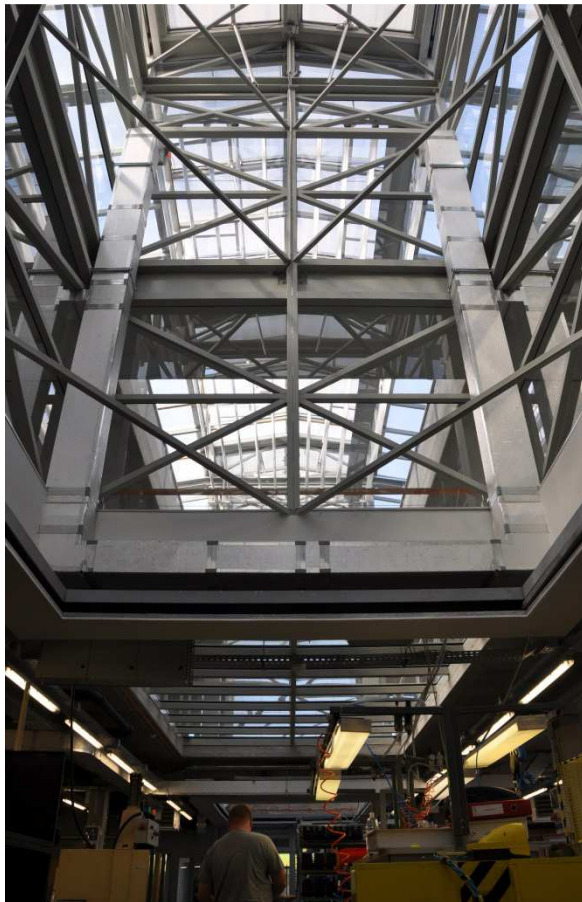
A passzív szellőzés utánáramlási nyílásai az épület északi homlokzatán, a földszinten elhelyezkedő termelőcsarnok polycarbonat falába integrálódik (4.7 ábra). A három szellőző és bevilágítótorony által működtetett termelőcsarnok fölött egy központi galériás, kétszintes közlekedő-átrium található, mely szintén szellőző és felülvilágító funkcióval rendelkezik. Ezt az átriumot a három torony térileg áthatja (4.8. ábra), az átriumtól külön légteret képezve, a gyártócsarnok légteréhez közvetlenül kapcsolódva (4.8. ábra, balra). A termelőcsarnok a raktár-csarnokkal két ipari szekcionált kapun keresztül áll összeköttetésben, a gyártás- és logisztikai technológia kiszolgálása céljából (4.9 ábra, jobbra). Mivel a tornyok a szellőzés mellett felülvilágítóként is hivatottak működni, a széltornyok tetőn kívüli/felüli részei polycarbonat-acél szerkezettel készültek (4.7. ábra), a tronyok épületen belüli részei pedig a tűzvédelmi előírások következtében biztonsági üvegezett szerkezetek (4.10 ábra). A 4.11. és 4.12. ábrák a termelőcsarnok berendezett állapotát illusztrálják, mely alapján megállapítható hogy az alapterülethez képest arányosan alacsony, 3,4 m belmagasságú csarnok légtere nagymértékben módosult a gyártástechnológia gépeinek, berendezéseinek és az egyéb polcrendszerek elhelyezése által.



4.7. ábra: A kivitelezett kísérleti épület 3 db északi homlokzati utánáramlási kapuja (fotó az építkezésről)



4.8. ábra: A központi átriuma a szellőztetőtornyokkal tagolva. Toronybelső (balra), galéria-átrium (jobbra)



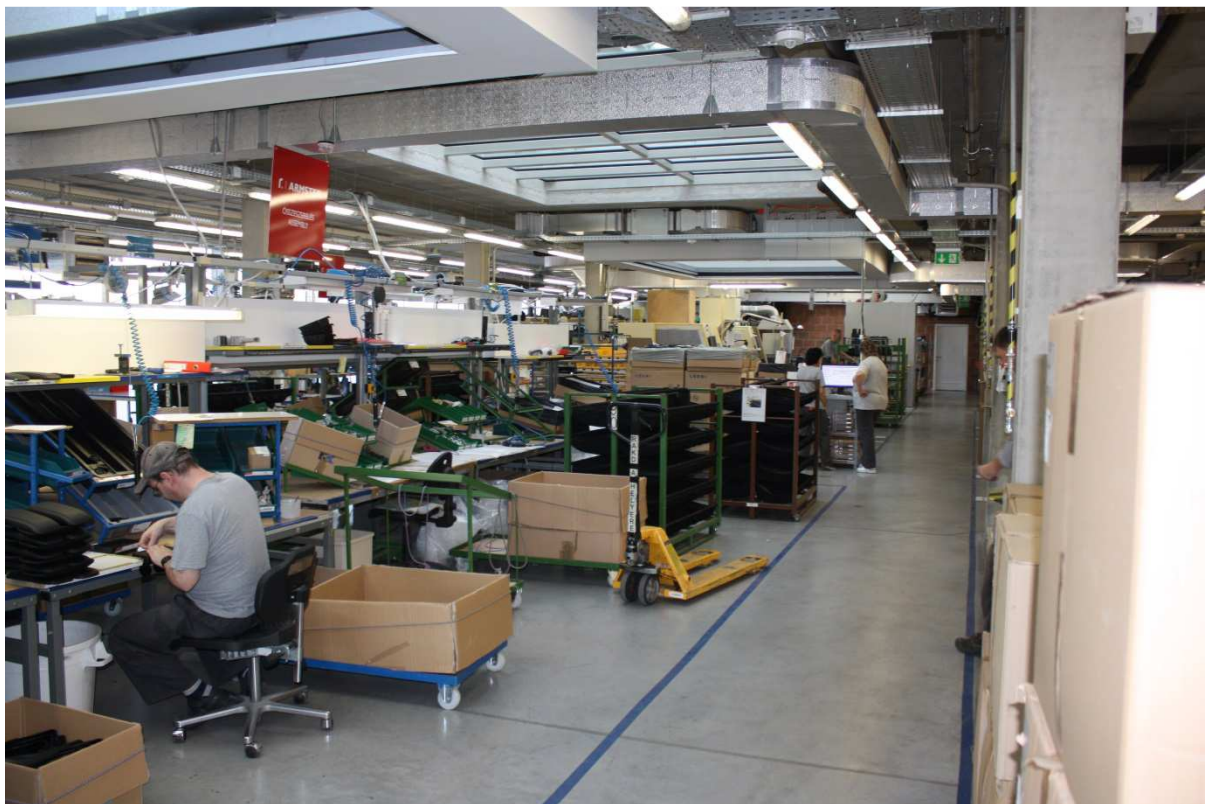
4.9. ábra: A termelőcsarnok nyugati szellőztetőtornya közös légtér a termelőcsarnokkal (balra), a keleti szekcionált kapu a raktárcsarnok és a gyártócsarnok között



4.10. ábra: Az egyik szellőztetőtorony zárt felső nyílászáró szerkezettel és egy anemométer légsebesség mérő szenzorral



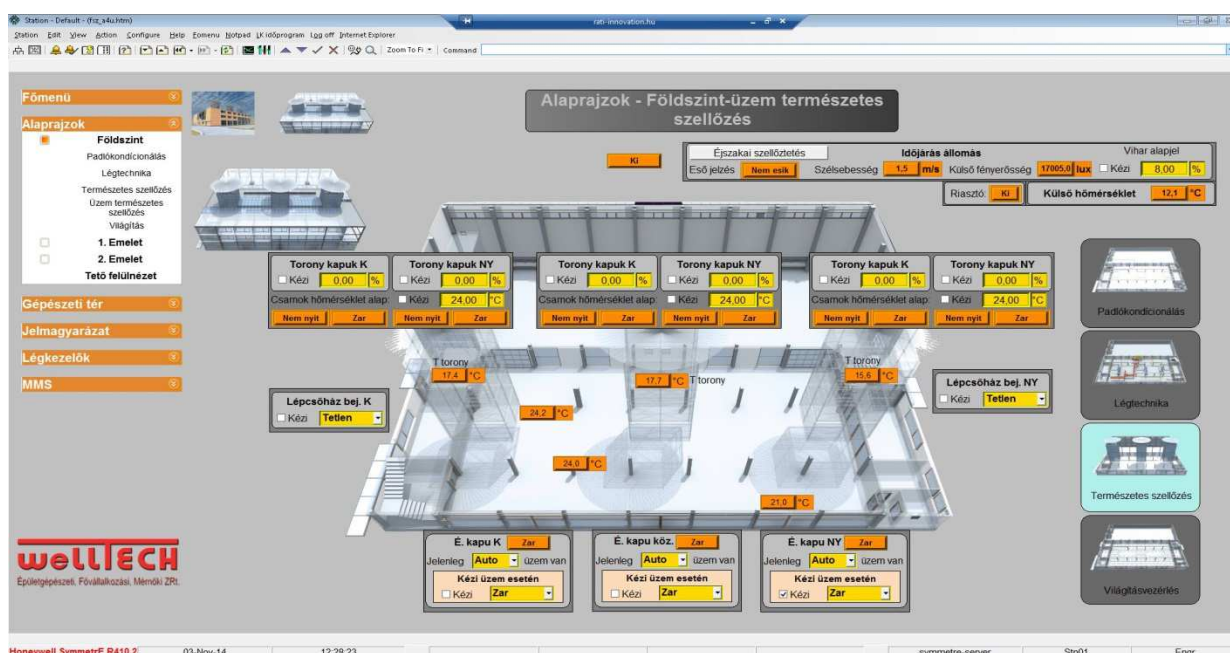
4.11. ábra: A földszinti gyártócsarnok a termelés technológiai berendezéseivel



4.12. ábra: A földszinti gyártócsarnok központi sávja munkaállomásokkal

4.2.3 A kivitelezett kísérleti épület BMS felügyeleti és MMS monitoring rendszere

Az épületben egy BMS (Building Management System) épületfelügyeleti rendszer került beépítésre annak érdekében, hogy a komplex épületszerkezeti, –gépészeti, és -villamossági rendszereket összefüggésében lehessen vezérelni, szabályozni és monitorozni, az alapl működést biztosítani. A hőszivattyúk, a fűtési- ill. hűtési pufferrendszerek, a központi hat osztógyűjtő, továbbá a három légkezelő gépészeti berendezésekben hőmérséklet és hőmennyiség mérés valamint a fűtés, hűtés és a gépi szellőzés vezérlése folyik. Ezen kívül az épület motoros nyílászáró szerkezeteit is működteti az épületfelügyeleti rendszer: a tornyok felső nyílászárói, a földszinti utánáramlási kapuk, az átrium és a raktár nyílászárói és felülvilágítói a természetes szellőzést szolgálják és motorizálva vezérelhetők a különböző koncepciók függvényében. Minden lényegi helységben IRC (individual room controlling) egyedi helység-hőmérséklet szabályzás lehetséges. A 4.13. ábra a természetes szellőzés szabályzásának kijelzőjét mutatja.



4.13. ábra: A BMS (building management system) épületfelügyeleti rendszer, a termelőcsarnok természetes szellőzési rendszere a széltornyok és nyílászárók szabályzásával

A BMS rendszer a demonstrációs kutatási projekt keretében kibővül egy MMS (Mobile Management System) mobilis épületmonitoring apparátussal, mellyel a meglévő BMS léghőmérséklet, relatív páratartalom és külső hőmérséklet, szélsébség és csapadék, ill. gépészeti hőmennyiségmérés, új MMS anemométeres légáramlás sebesség, légcsatorna légáramlás mérés,

felületi és sugárzási hőmérséklet, levegő CO₂-tartalom mérés és a geotermikus szonda, illetve a talaj-levegő hőcserélő kollektor rendszer hőtérképezésével és villamos áramfogyasztás mérésekkel bővül. [36] Az MMS monitoringja segítségével nem csak lényegesen nagyobb felbontású épületklimatikai- és energetikai mérésadatgyűjtés biztosított, hanem lényegesen pontosabban is lehet vezérelni az épületet, továbbá igazolni a tervezés eredményességét, pontosságát (szimulációk validálása). Ezen kívül a nagyfelbontású MMS vizsgálatok egy optimalizált energiamanagement épületüzemeltetési stratégiának a kidolgozását is lehetővé teszik a kísérleti épület számára, továbbá ebből kiindulva általánosított üzemeltetési koncepció is fejleszthető a jövő energiahatékony épületei számára.

Az MMS rendszer szerves része az épület lapostető felületén elhelyezett, gyárilag kalibrált Vaisala WXT520 meteorológiai megfigyelő állomás, mely három alegységből épül fel (4.14. ábra).



4.14. ábra: Vaisala WXT 520 komplex időjárás állomás mérőműszer a kísérleti épület nyugati peremén kb. az épület közép-vonalában elhelyezve

Az egyik a csapadékmennyiségeket, a második a levegő állapotait, azon belül a légnyomást, léghőmérsékletet és a páratartalmat méri. A harmadik egység rögzíti a szél irányát és sebességét, ennek az adatait gyűjtöttem és értékeltem ki a kutatás során. A szélfigyelő egységben

három ultrahang továbbító és fogadó szenzor van beépítve, melyek egyenlő távolságra vannak egymástól elhelyezve egy vízszintes síkon. A mérés alatt az egyik jeladó ultrahangot bocsájt ki és a két vevőig eljutó időtartam közötti különbség alapján számítja a szél irányát és sebességét. Szélcsend esetén a két érték megegyezik.

4.2.4 Anemométerek: hődrótos áramlásmérés

Az MMS (Mobile Management System) mobilis épületmonitoring rendszerben mért tornyokban kialakuló levegő hőmérsékletek, relatív páratartalmak és légsebességek a 4.15. ábrán láthatóak, az épület háromdimenziós hosszmetSZete mentén ábrázolva. A TDK tanulmányban a mért légsebességekből számítom a fellépő légtérfogat áram mennyiségeket a tornyokban, amely a valós légsebesség méréseknek köszönhetően a kürtőhatás termikus felhajtóerejét, a hőmérsékletek hatásait (szoláris hőnyereség/teher, berendezések és dolgozók által kialakult belső hőképződés), valamint a szélindukció effektusait össZhatásában tükrözi.

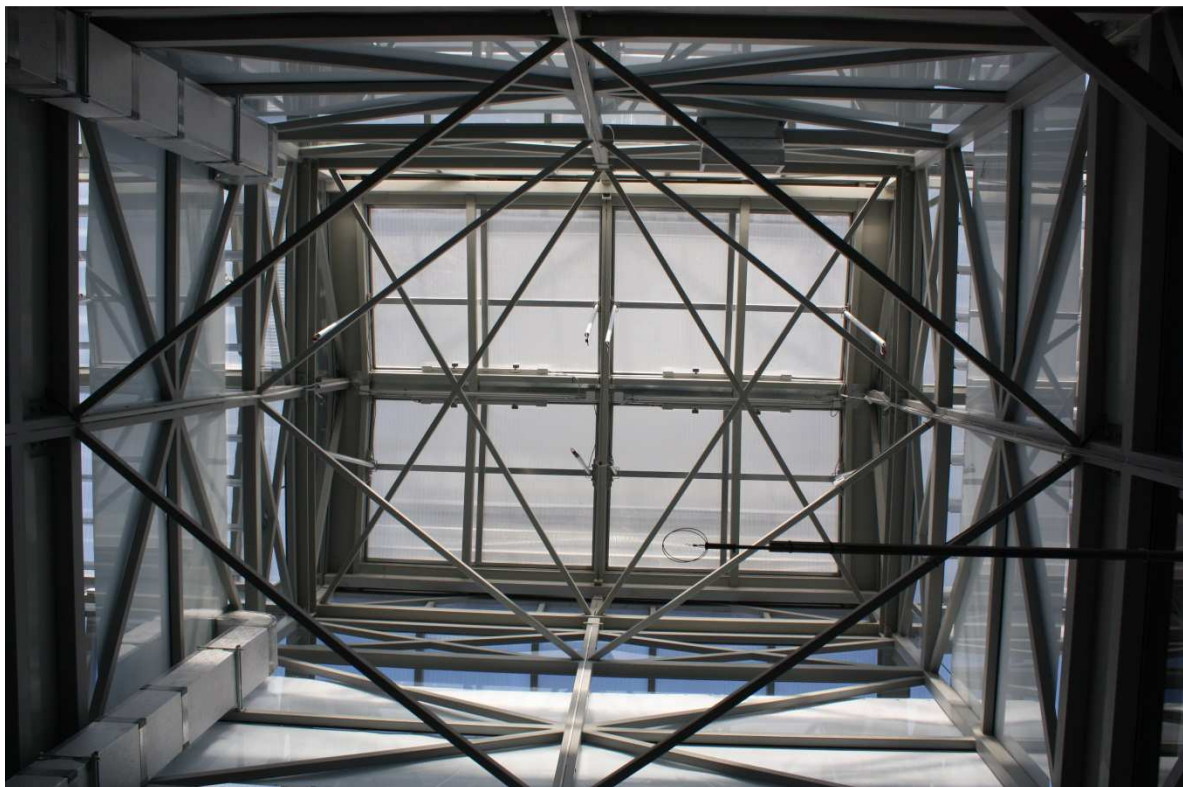


4.15. ábra: Az MMS (mobile monitoring system) komplex épület mérésadatgyűjtő rendszer. A termelőcsarnok természetes szellőzési rendszere a széltornyokban mért levegő hőmérséklet, páratartalom és áramlási sebességekkel

A 4.16. ábra demonstrálja a torony felső részébe integrált hődrótos anemométer szenzort a toronyban fellépő légsebességek mérése céljából. Az 4.17. ábrán a szellőzőtorony 3,8 x 4,9 m nagyságú, 18,62 m² felülettel rendelkező áramlási keresztmetszte látható.



4.16. Ábra: Hódrótos anemométer szenzor a torony felső részében és a toronyfűtés hőcserélője a torony felső részében



4.17. ábra: Az épületen belüli cél-üveg szerkezetű egyik szellőztetőtorony áramlási keresztmetszete zárt felső nyílászáró szerkezettel

Az 4.16. ábra fotóján felismerhető a toronyba integrált toronyfűtés hőcserélő vízhálózat is, mely nyáron üzemel a gyakran túlmelegedő termikus napkollektoros rendszer puffertárolójának visszahűtése céljából. Szélcsend esetén a toronyfűtés további funkciója a termikus felhajtóerő erősítése a tornyokban: a gépészettel meghajtott aktív szolárkürtő a tornyok felső áramlási légtereit fűtve erősíti a kürtőhatást, megakadályozva ezzel a levegő visszaesését a tornyokban. A torony transzparens felületei által passzív szolárkürtőként is működik.

A 4.18. ábra a kísérleti épületben használt anemométerek mérésadatgyűjtőjét (balra) és az MMS rendszer központi szerverét mutatja (jobbra). Az állandó hőmérsékletű (CTA) hődrótos áramlásmérés a hődrótos anemométerek egyik alkalmazása. Magát a hődrótos áramlásmérés elvét sok éve alkalmazzák áramlástani mérésekhez, mivel gyors, pontos, egyszerű és költség-hatékony megoldás. A szenzor egy fémhuzal, amely a Joule effektust használja a huzal melegítéséhez, amit közben az áramló közeg hűt. A huzallellenállás mérésével pontosan meghatározható annak hőmérséklete és ezúton úgy is üzemeltethető, hogy egy adott hőmérséklet (ellenállás) fenntartásához meghatározott áramot vezetünk át rajta. [37]



4.18. ábra: Az MMS épületmonitoring rendszer szerver PC (jobbra), anemométeres mérésadatgyűjtő Mini CTA (balra)

A mérésekhez a Dantec cég eszközeit használtam, amelyek a következő ábrán (4.19. ábra) látható módon üzemelnek. A probe-ok (hődrótos szenzorok) a Mini CTA eszközhez csatlakoztathatók, amelyek tartalmazzák a mérőhidat és a szabályzót az állandó hőmérséklet fenntartásához.

4.19. ábra: Az épület monitoringban alkalmazott Dantec Mini CTA hődrótos anemométer technika elvi sémája

A MiniCTA digitális formában továbbítja a jeleket a számítógéphez, miután a probe karakterisztikájának megfelelően konvertálta az eredményt. A rendszer folytonos jelekkel dolgozik, így a mérés pontossága a mintavételezés gyakoriságától függ. Az érzékelő szál 5 μm átmérőjű, 1,25 mm hosszú platina bevonatú volfrám huzal. Az előnyös geometriai tulajdonságoknak köszönhető a magas érzékenység (0,1 m/s) és nagy mérési tartomány: már 0,1 m/s légsebességet is érzékel, akár 500 m/s-ig. A konvektív hőleadás (Q) mennyisége az áramlási sebesség, a ΔT ($T_w - T_0$) és a közeg fizikai jellemzőinek (k , ρ , μ) függvénye (k = hővezetés, ρ = a levegő sűrűsége, μ = a hőátadási együttható). A legegyszerűbb formában leírva a hengeres test hőleadása a következő összefüggéssel lehetséges:

$$Q = (T_w - T_0)A_w\alpha = A + BU^n, n \approx 0,5 \quad (2)$$

ahol A_w a huzal felülete, α a hőátadási tényező. A mérés során egy lineáris függvénnyel lehet közelíteni az egyenletet, ahol A és B a kalibrációs konstansok, U a szélesség.

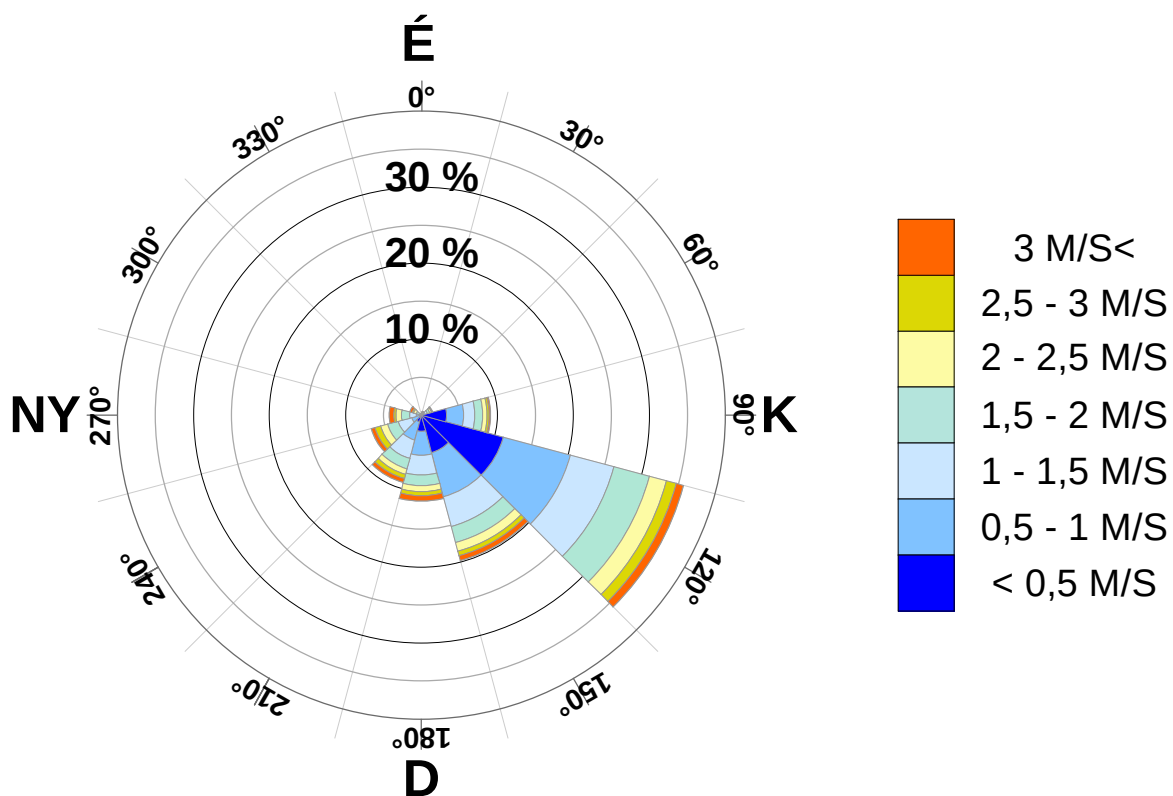
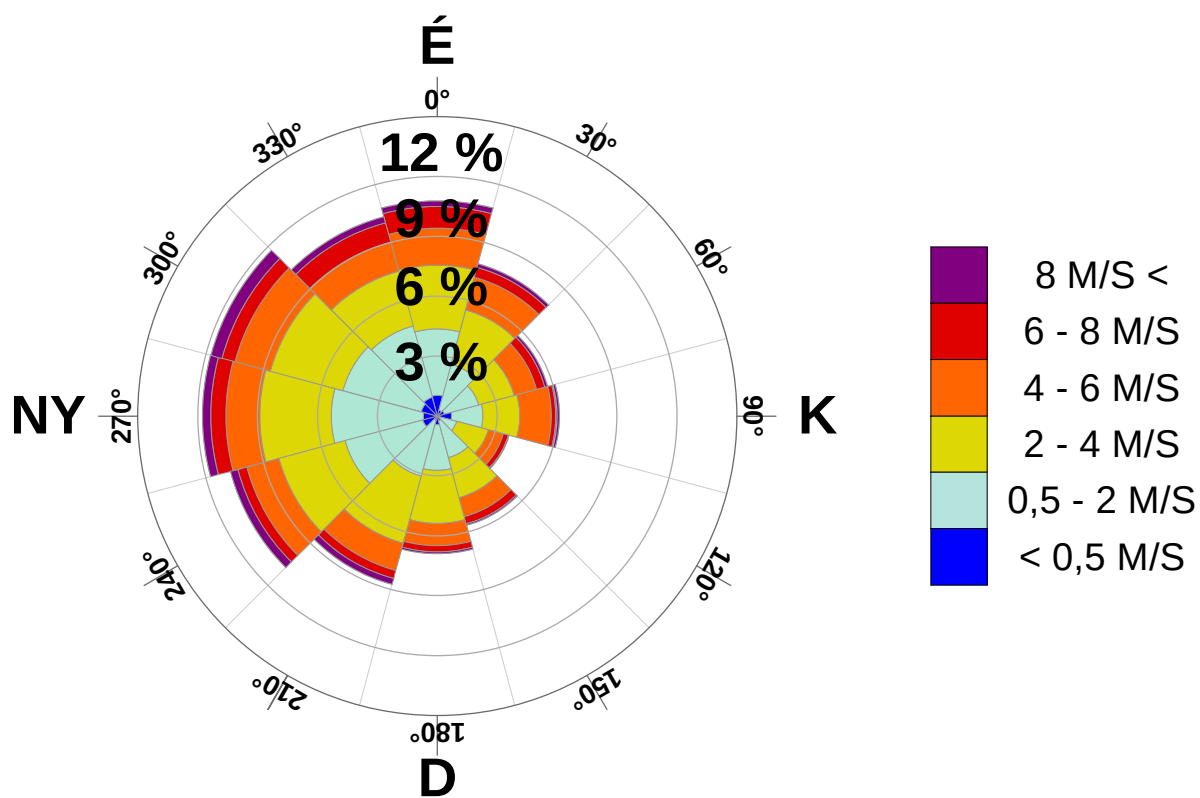
5. A kutatás eredményeinek bemutatása

5.1 A helyi mikroklimatikus szélviszonyok: uralkodó szélirányok és szélsébségek

Magyarországra és a kísérleti épület elhelyezkedésének területére (Komló) a meteorológiai mérőállomások adatai szerint a nyugati, északnyugati széljárás az általános. Ezeket az értékeket a Meteonorm 7 klímadatabank szoftver segítségével állítottam elő (5.1. ábra, fent). Az épület aerodinamikai tervezési alapelveinek létrehozásakor ezeket és az OMSZ (Országos Meteorológiai Szolgálat) adatait vette figyelembe a tervező az épület aerodinamikai szélcsatorna modellkísérletekben, és ennek alapján az átlag szélsébséget 3 m/s-ban határozták meg. [42]

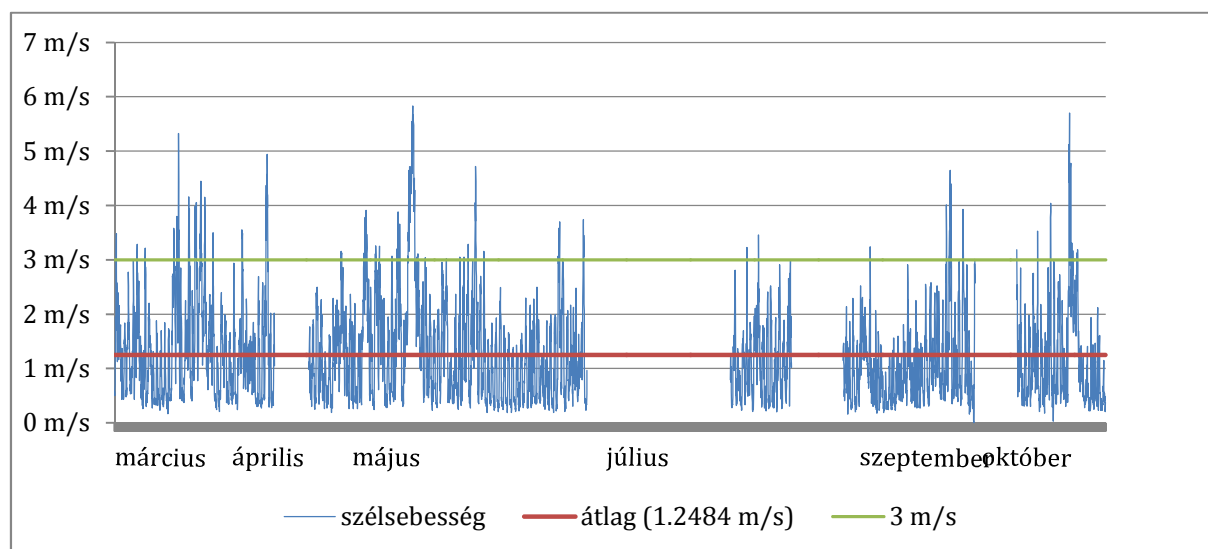
Az épület tetőszerkezetén elhelyezett Vaisala meteorológiai megfigyelő és mérőállomás segítségével, már több mint egy éve gyűjtöttem az adatokat. Első lépésben a mért adatbázisból a kutatás számára releváns időintervallum értékeit szűrtem ki és rendszereztem (5.1 ábra, lent). Mivel a kísérleti ipari- és irodaépületben alapesetben a természetes szellőzést és annak fő szerkezeteit, a szellőző tornyokat a BMS (building management system) épületfelügyeleti rendszer szabályozása alapján csak akkor üzemeltetik, ha már nincs fűtés üzemeltetve az épületben, ezért a márciustól októberig tartó időszakaszban volt szükség az mérésadatok kigyűjtésére. A 2014. évben először április 2-án, utoljára pedig október 16-án nyitották meg a szellőző tornyok felső nyílászáróit, mivel az idei (2014-es) időjárási viszonyok következtében, a kísérleti épületben áprilisban lehetett abbahagyni a fűtést.

Az adatbázist, melyből a kutatáshoz a legtöbb információt gyűjtöttem, az MMS (Mobile Monitoring System) mobilis épület megfigyelő rendszer készítette. Ebből a mérőrendszerből hat perces időközökkel volt lehetséges lehívni a hődrótos anemométer szenzorok méréseit, melyeket ezekután óránkénti átlagértékekbe sűrítettem annak érdekében, hogy összeegyeztethetők legyenek az MMS mérésadatok a BMS, épületfelügyeleti rendszerből kapható órák átlagértékű mérésadatokkal. Ez a számítógépes BMS és MMS rendszer azonban bizonyos időközökben nem üzemelt. A hiba okai áramkimaradás, hardveres illetve ritka időközönként szoftveres problémák voltak. Emellett még az épület belső intranet hálózata és a monitoring rendszer között is felléptek kapcsolatvesztések, mely időszakokban a mérésadatok felvétele nem volt lehetséges.



5.1 ábra A szélérősségek irányonkénti megoszlása Meteoronorm 7 klímaadatbank alapján (fent), az épület tetőszerkezetén mért adatbázis alapján (lent)

A széljárással kapcsolatos kiértékelt adatokat először éves viszonylatban hasonlítottam össze (5.2 ábra). Az időközönként fellépő, technikai problémákból adódó mérésadat hiány (kiesés) ellenére megállapítható, hogy az egész vizsgált időintervallum döntő részében (73,6 %-ában) sikeres mérésadatgyűjtéssel állunk szemben. Ez 4116 használható órát jelent az összesen 5661 mért órából. Látható, hogy a helyi, a beépítési telken uralkodó (mikroklíma) lokális szélkarakteristikája nagymértékben módosulhat a lokális, adott terepviszonyokból, szomszédos beépítésből, vegetációból, lokális léghőmérsékletekből adódóan [1]. Ezért a mért szélesebességek és azok átlagos értéke, az 1,248 m/s elmarad az előzőekben az OMSZ és a klímaadatbank (Meteonorm 7) adatai alapján meghatározott, és a szélcsatorna modellkísérletben alkalmazott 3 m/s-os átlagsebesség értékétől. Leolvasható, hogy a szélesebesség tavasszal és ősszel nagyobb volt, míg nyáron kisebb értékeket produkált.



5.2 ábra: A szélesebesség éves alakulása (m/s) a komlói kísérleti épület konkrét beépítési telkén

Az eredmények jelentősége az aerodinamikai tervezési szempontoknál különösen hangsúlyos, mivel nem illetve csak mérsékelten lehetséges általános meteorológiai adatokkal dolgozni a széljárással kapcsolatban. Egy komplex geometriájú épület illetve épületegyüttes már önmagára nézve is befolyásolja a szél mozgásának útvonalát és irányát, de ugyanígy jelentős a környező beépítés jellege, valamint az épített környezet geometriája, a terep nagyléptékű (jelen esetben völgy, domb/hegy, medence), illetve kis léptékű (jelen esetben lejtős terep, süllyesztett épülettömeg) tulajdonságai [1].

A prototípus épület esetében is észrevehető (5.1 ábra), hogy a széljárás erőssége és iránya nagy arányban más karakterisztikát mutat, mint amit a meteorológiai adatok alapján a

klímaadatbank (Meteonorm 7) meghatározott. Egyértelműen megállapítható, hogy az uralkodó szélirány a délkeleti volt. A mérés adatok 35%-a ebből az irányból érkezett, míg a maradék adat egyenetlen eloszlást mutat, döntően a keleti és déli irány közé eső szélirány negyedben. A többi irányból csak mindössze az mérési időszak kb. 25%-ában érkezik a szél. A keleti irányból érkező szelek nagyrészt 2 m/s alatt maradnak, de természetesen kismértékben előfordulnak ennél erősebb szelek is. A nyugati, különösen az északnyugati, irányból azonban fokozatosan erősebb sebességű széláramlatok lépnek fel. Ezekben az esetekben a szélesebbségek gyakran érik el a 3,5 – 4 m/s értékeket. Ennek oka a mikroklíma helyi tulajdonságaiban keresendő. Gyakori, hogy a völgyekben uralkodó széláramlatok, a völgy hossz tengelyével párhuzamosan, illetve a lejtőre merőleges irányban, 24 órás periódusokban változnak: a völgyből kiáramlás, illetve a völgybe beáramlás, valamint a lejtőkön feláramlás, illetve leáramlás keletkezik [1]. A RATI Kft. kísérleti épületének esetében is érvényesülhet ez az effektus, mivel a ház egy völgy peremén található. Lényeges adottság továbbá, hogy az épület be van süllyesztve a hegyoldalba, így a lezúduló légtömeget délről semmi nem gátolja, egyből a tornyok szintjén csapódik az épületre. Valószínűsíthető, hogy a völgy egészében is veszítenek erejükből a széláramlatok.

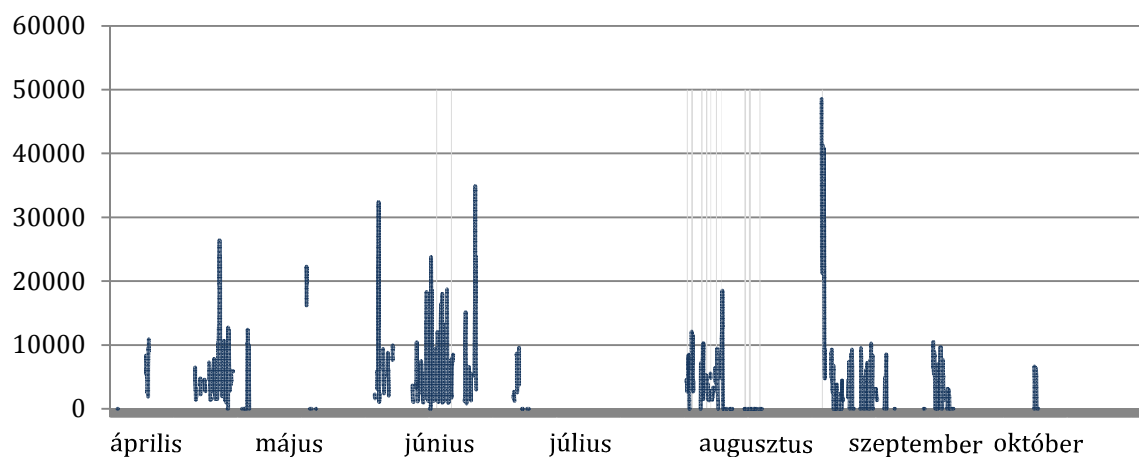
5.2 A szellőzőtornyok működése, szellőztető képessége

5.2.1 A tornyok éves kihasználtsága

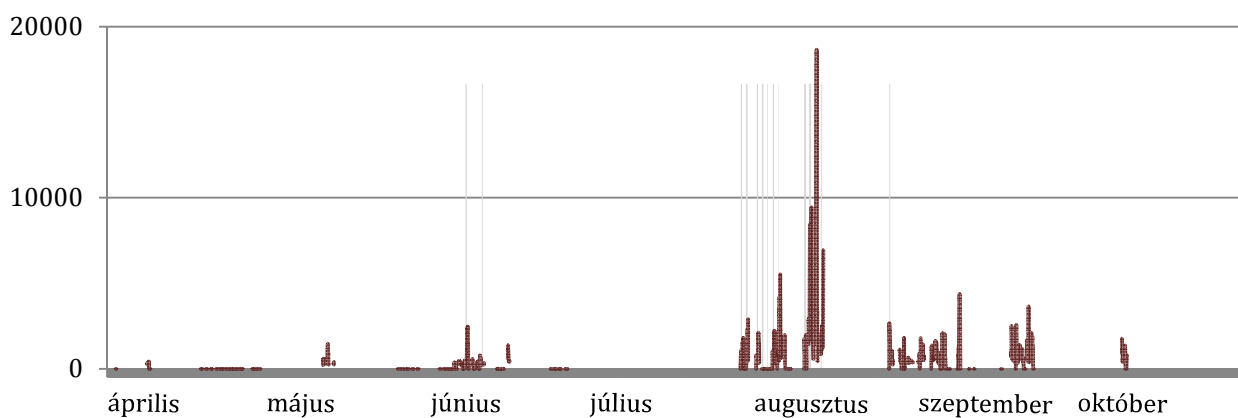
Szükségnek tartottam először a termelőcsarnok szellőző tornyainak éves kihasználtságát vizsgálni, a légátöblítést, légtérfogat áramokat az üzemidő függvényében, - minden további szempont nélkül - egységesen elemezni, annak érdekében, hogy megtudjam az év melyik szakaszán és milyen intenzitással működtek a szellőzőtornyok (5.3 ábra).

A keleti torony üzemelt a legtöbbet, ezen belül a tavaszi időszakban volt legsűrűbben megnyitva. A középső és a nyugati tornyokat májusban kezdték el intenzíven használni, valamint a nyári szakaszban voltak legtöbbször nyitva. Már itt jól észrevehető, hogy a középső torony működése messze elmarad a többitől, szinte minden esetben. A keleti torony a többiekhez viszonyítva tavasszal, míg a nyugati ősszel végzett több munkát. Ennek okait már több szempont szerint is tárgyalom a következők fejezetekben. A diagramon jelöltem a toronyfűtés működését is szürke grafikonokkal, azokban az esetekben, amikor a tornyok nyílászárói nyitva voltak.

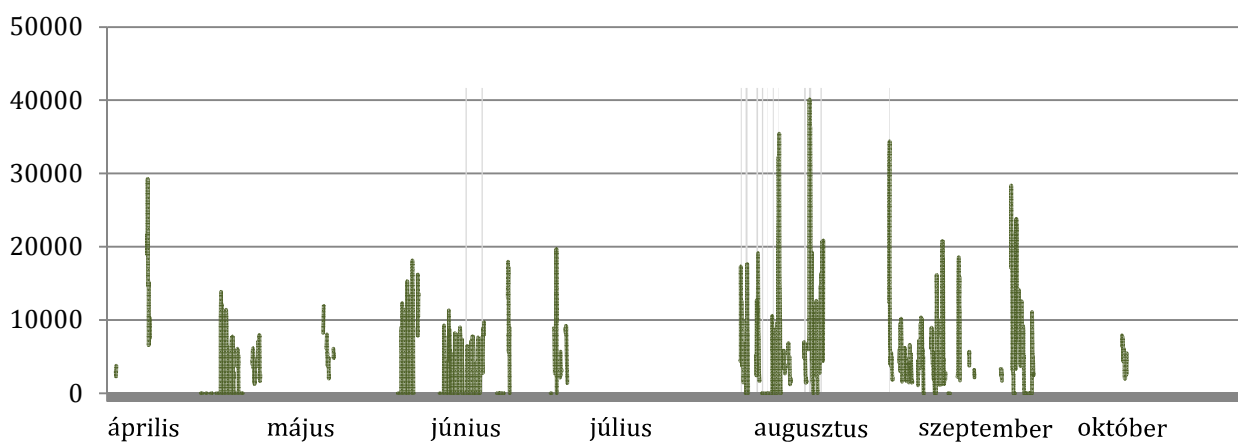
Keleti torony



Középső torony



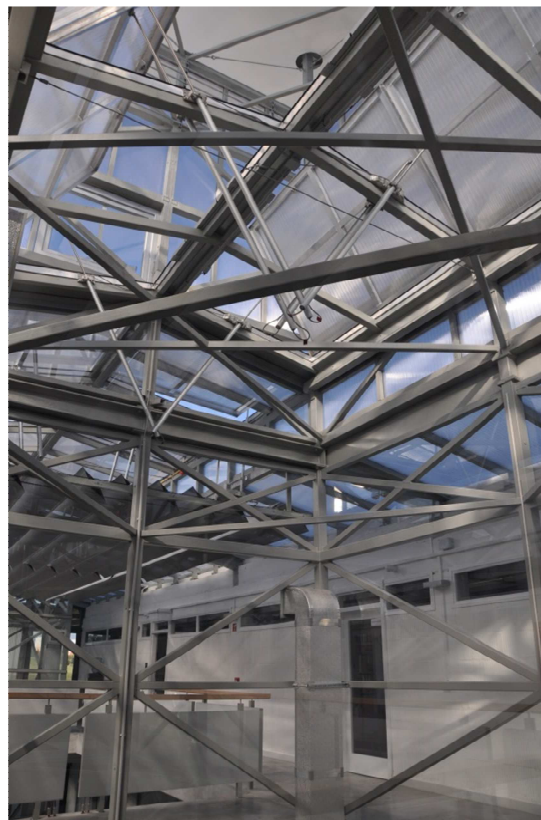
Nyugati torony



5.3 ábra: A toronyok légátöblítésének (függőleges grafikon tengely: légtérfogat áram, m^3/h) éves alakulása. A szürke grafikonok jelzik, hogy a toronyfűtés mely időszakokban volt bekapcsolva

Mivel a toronyfűtött időszakokban nem látszik kiugró változás a légöblítés alakulásában, azt a következtetést vontam le, hogy a torony fűtése nem befolyásolja jelentős, illetve általános módon a szellőztornyok légátöblítésének mértékét. Ennek oka a szélsébség lényegesen dominánsabb hatása a tornyok légátöblítésére a kürtőhatás, a gravitációs szellőzés termikus felhajtóerejével szemben. Az épület tervezője a toronyfűtés rendszert ez okból kifolyólag kifejezetten szélcsend esetére tervezte, a tornyokban lévő kürtőhatás kialakítása, erősítése céljából.

A tanulmány ezen pontján, az eredmények kiértékelése szempontjából lényeges megemlíteni az épület használóinak szokásait és azok kötődéseit is a tornyok működéséhez. A tornyokat a BMS épületfelügyeleti rendszer egy algoritmus alapján szabályozza. A tornyok nyitásának feltétele függ a külső hőmérséklettől, a termelőcsarnok három (keleti, középső és nyugati) zónájának hőmérsékletétől, a torony felső hőmérsékletétől, az időjárástól (szélsébség, eső, vihar), az időpontoktól és mindezek összefüggéseitől. Ha a termelőcsarnok három hőmérsékletzónájának egyike meghaladja az aktuálisan beállított alapjel hőmérsékletet, akkor a hozzá tartozó torony nyílászáróit 30% intenzitással nyitja az automatika, ezután pedig 2 K hőmérséklet növekedés fokozatonként 60 %-ra, majd 100%-ra nyit a torony. (5.4. ábra)



5.4. ábra: A tornyok nyílászáró szerkezeteinek 30%-os (balra) és 60%-os (jobbra) nyitásintenzitása a kísérleti épületben

Ez a rendszer három csoportban külön-külön tornyonként és hozzátartozó hőmérsékletzónánként működik. Ebbe az automatizált üzemmódba kézi szabályzással lehetséges beavatkozni, ha a dolgozóknak nem felelnek meg az aktuális belső komfortállapotok. Ezúton az épületet használók saját igényeikhez alakították a tornyok működtetését, időszakos kézi beavatkozásokkal is – így kijelenthető, hogy a dolgozók komfort érzete légminőség és huzathatás szempontjaiból megfelelő volt. Az üzemeltető információja szerint az időnkénti kézi beavatkozás elegendő volt ahhoz, hogy a dolgozók komfortérzete az elvárt magas színvonalon maradjon. Mindezt a PTE Energiadesign tanszéke a gyárüzem és irodaépület dolgozói által kitöltendő komfort kérdőívek segítségével, szubjektív vélemény gyűjtés keretében is igazolni, dokumentálni szándékozik.

5.2.2 Torony üzemmódok

Két féle üzemeltetési típus szerint válogattam szét az adatokat. Az üzemcsarnok északi oldalán három homlokzatba integrált kapu nyílászáró található, melyek a passzív szellőzés, a légutánpótlás (utánáramlás) miatt lettek beépítve (bejáratként vagy rakodó átjáróként nem használhatók, a kapu előtt az épületen kívül gyeppel, majd vízelvezető csatorna található). A szimmetrikus, kétrészes tolókapuk jobbra-balra, két oldalra eltolva csak teljes mértékben nyithatóak (szabad légbeáramlás kapunként 16 m^2 felületként), illetve zárhatóak. Részletesebb nyitási-intenzitás nem lehetséges, illetve a 100% nyitást csupán egy 50%-os nyitási variációval lehet kiegészíteni, mikor a kétszárnyú tolókapu csak egyik szárnyát nyitják teljes mértékben (ekkor összességében a tolókapu 50%-ban van nyitva).

Annak függvényében, hogy a kapuk nyitva vagy zárva voltak, más-más módon történik a levegő beáramlása a csarnokba. A természetes szellőzés üzemeltetése folyamán (BMS automatika illetve, kézi beavatkozás) a tornyok mindig nyitva voltak, míg a kapukat döntő többségben csak a műszakidő végén nyitották ki (éjszakai szellőzés), mivel a tornyok és a kapuk teljes mértékű nyitásával túl nagy huzathatás jött létre és a dolgozók panaszkodtak a kellemetlen körülmények, a huzathatás miatt. Nyitott kapuk esetében a légcsera a homlokzati nyílászárókon keresztül történő frisslevegő utánpótlással működött, zárt kapuk esetében pedig a toronykiszellőzés a raktárcsarnokból és a lépcsőházakból történő lég után áramlással volt biztosítva, mivel a raktár és a lépcsőházak gyártócsarnokkal határos nyílászáróit üzemidőben, napközben a használat, a gyártástechnológia és a raktárlogisztika függvényében különbözőképpen, időben rendszertelenül, de nyitották-zárták.

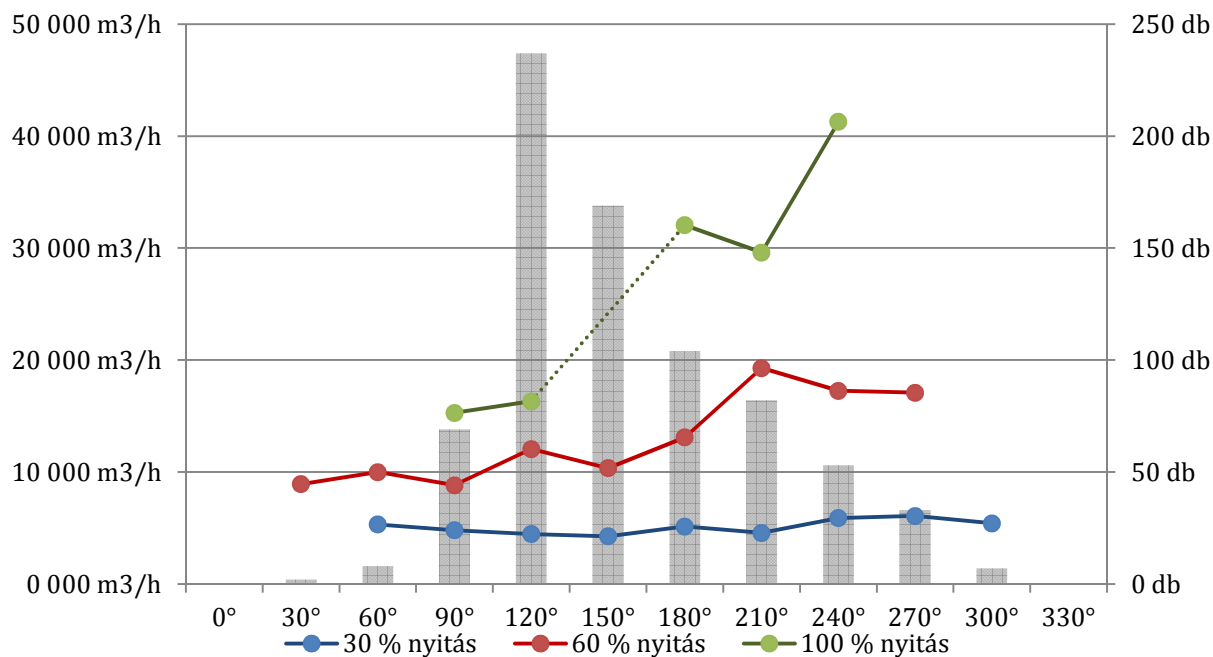
Ennek tükrében vizsgáltam tehát a toronyszellőzést zárt, továbbá nyitott homlokzati nyílászárók esetében is, különös tekintettel az igazolandó szélcsatorna modellkísérletre, amely csak azt az eshetőséget szimulálta, amikor mind a három homlokzati kapu teljes mértékben nyitva volt.

A kivitelezett épületben a torony nyílászárók nyitásakor a szervomotoros nyitószervezet csak három pozíció felvételére lett programozva: a 30% nyitásintenzitás 24° nyílászáró szárny dőlésszöget, a 60% nyitásintenzitás 48° nyílászáró szárny dőlésszöget jelent, valamint 100% nyitásintenzitás esetén 80° mértékben döntöttek a nyílászáró táblái. Fontos megjegyezni, hogy a torony nyílászáróit (30%, 60% és 100% intenzitással) és az üzem északi homlokzati kapuit (50% és 100% intenzitással) egymástól függetlenül is lehetséges más mértékben nyitni, illetve zárni.

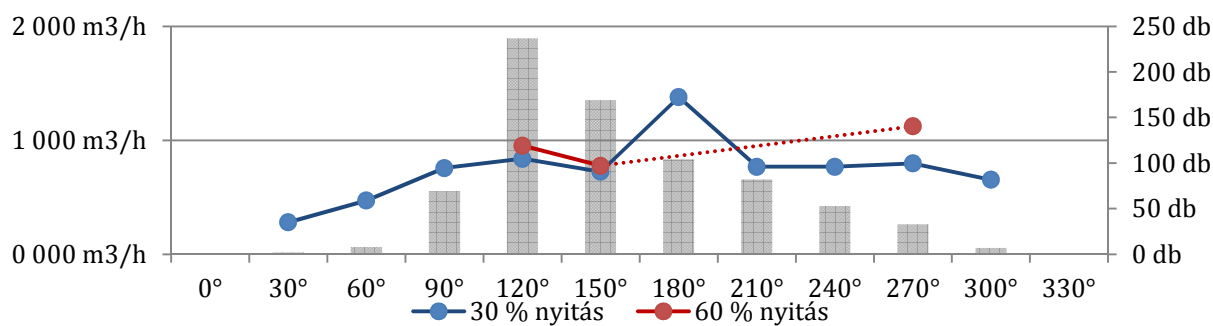
5.2.2.1 Toronyszellőzés zárt homlokzati csarnok kapuk esetében

Ezt az üzemmódot jóval többször alkalmazták ellentétben a nyitott homlokzati kapuk szellőzési esetével. 807 mért óra folyamán zárt homlokzati kapuk mellett történt a toronynyitás (szellőzés) a vizsgált időintervallumban, ellentétben a nyitott homlokzati kapukkal üzemeltetett toronyszellőzés 178 db órás átlag mérési eredményével. Kihangsúlyozandó, hogy a nap-pali (zárt homlokzati kapuk) szellőzés naponta jellemzően nyolc-kilenc órás időintervallumokat jelent, míg az éjjeli (nyitott kapuk) éjjelenként általában körülbelül öt-hat órát. Ezek a számok természetesen a körülmények függvényében akár nagyobb eltérést is mutathatnak. Összefoglalva tehát a zárt homlokzati kapuk melletti torony nyílászáró nyitások nagyjából 90-100 napot ölelnek fel, a nyitott kapukkal üzemelő torony nyílászáró nyitások kb. egy hónapot. Az 5.5. ábra a tornyok szellőzési működését részletezi különböző torony nyílászáró nyitásintenzitás és zárt gyártócsarnok homlokzati nyílászárók (kapuk) mellett a szélirány függvényében. A szürke oszlopgrafikon a tornyokban mért órás átlagolt áramlási mérés adatok darabszámát jelzi a különböző szélirányok esetében. Csukott homlokzati kapuk esetében megfigyelhető volt, hogy a tornyok felső nyílászáróit jellemzően nem teljes mértékben nyitják meg; a ritka kivételes esetekben pedig kizárólag a keleti torony nyit akár 100%-os intenzitással.

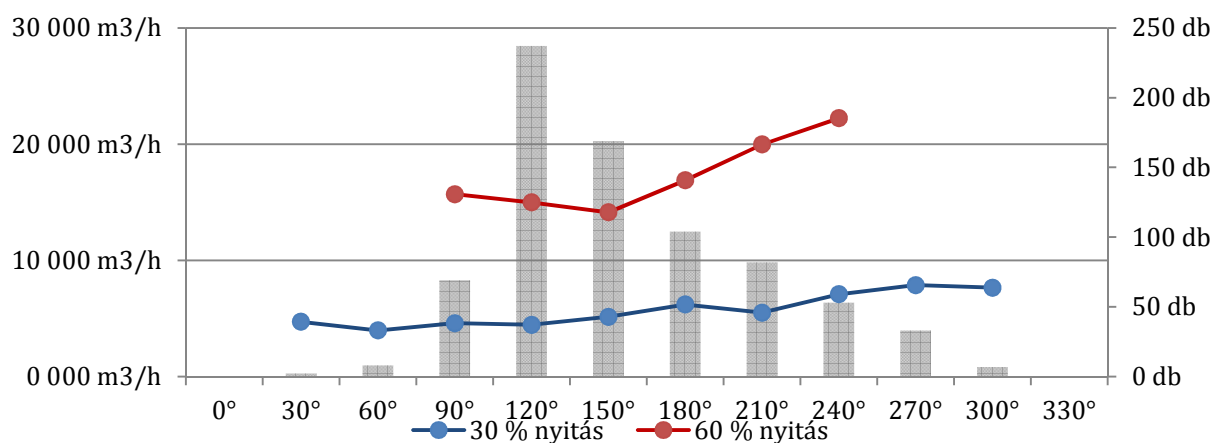
A tornyok együttesen 30%-os nyílászáró nyitásintenzitásnál $11.500 \text{ m}^3/\text{h}$ légátöblítést értek el, mely a kb. 2300 m^3 légtérfogattal rendelkező üzemcsarnokban óránként ötszörös légcserét jelent. 60%-os torony nyitás esetén a légcsereszám már $13,5 \text{ h}^{-1}$ értéket mutat, $31000 \text{ m}^3/\text{h}$ légtérfogat áram mellett.



Keleti torony



Középső torony



Nyugati torony

5.5 ábra: A három torony szellőzésének (légtérfogat áram, m³/h) szélirány és nyitásiintenzitás szerinti változása, zárt homlokzati kapuk mellett

A keleti és nyugati tornyok zárt homlokzati kapuk mellett nagyjából azonos képességgel rendelkeznek, 60%-os felső torony nyílászáró nyitásnál például akár óránkénti $15\,000\text{ m}^3$ -es légátöblítést, 30% nyitásnál pedig kb. $5\,000\text{--}6\,000\text{ m}^3/\text{h}$ légtérfogat áram szellőzést biztosítanak. Azonban feltűnő, hogy a középső torony a nyitás mértékétől függetlenül nagyon kis hatékonysággal szellőztet, a másik két a torony adataihoz képest elhanyagolható értékeket produkál. Ennek oka a torony elhelyezkedése az épületen belül és kívül. Mivel keleti és nyugati szélirányokból nézve a középső torony „szélárnyékban” van a szélső, keleti és nyugati tornyokhoz képest, tehát a szabadon áramló levegőtől messzebb helyezkedik el, mint a szélső tornyok, így már eleve csak lassított széláramlás és egyben alacsonyabb szívóhatás keletkezik a középső torony 'Venturi' tányérszerkezete alatt a termelőcsarnok használtlevegőjének kiáramlására. A középső torony a csarnokon belül is középen helyezkedik el, mely az említett utánáramlás (légbeszívás) pontjaitól is a legtávolabb áll a sűrűn berendezett termelőcsarnok térben.

A 5.5 ábra grafikonajain látható, hogy főként 30% és 60% torony nyílászáró nyitásintenzitás mellett üzemeltek a szellőző tornyok, - a mérésadatok ilyen pozíciójú toronynyitás mellett állnak rendelkezésre. A grafikonokból értelmezhető, hogy a két domináns (keleti és nyugati) széltorony légtérfogat áram szellőzési értékei felső korláttal rendelkeznek, a tornyok széliránytól függetlenül egy bizonyos mennyiségű levegőnél többet nem szívhatnak ki a gyártócsarnokból. Ennek mértékét az előbbieken során már felsorolt tényezők, a komfort alapú kézi beavatkozás, a rendszertelen időközönkénti, folyamatos utánáramlás szomszédos belső terekből és a tornyok nyitásintenzitása határozzák meg. A középső torony kivételt képez teljesítményével az említett „szélárnyék” hatás miatt.

A grafikonokat elemzve érdekes jelenség figyelhető meg az eredményekben: a tornyok légátöblítése, a légtérfogat áramok értékei magasabbak a vártnál, annak ellenére, hogy a termelőcsarnok homlokzati kapui zárva voltak.

A zárt homlokzati kapuk melletti viszonylag magas légátöblítés jelensége a termelőcsarnokban a következő okokra vezethető vissza:

- A termelőcsarnok és a raktár között több kapu is található, melyek közül kettő ipari szekcionalizált motorosan mozgatott kaput anyagmozgatásra használnak, négy kézi működtetésű totlókaput pedig a szellőzés elősegítésére használhatják a dolgozók. Megjegyzendő, hogy ezek a kapuk alapesetben zárva vannak. Nyitottságuk nincs vizsgálva, ugyanis használatuk teljesen rendszertelen: a szekcionalizált ipari kapuk tisztán termeléstech-

nológiai és logisztikai igények következménye, a kézi tolókapuk pedig szubjektív komfortérzet alapján használtak. Ugyanakkor a raktárból származó légmennyiség nem elhanyagolható hatás, mert ez a belső levegő utánáramlás egy nagyterű, 6000 m³ térfogatú raktár csarnokból érkezik a termelőcsarnokba. Ez a raktárból beáramló levegő nincs felhasználva, mivel a raktár csarnokban az anyagmozgatás során gyakran cserélődik a levegő, közvetlenül a szabadból. Ebben a nagy légtérfogatú egybefüggő teremben, csak csomagolt alapanyagokat és készárut (gépjármű műanyag alkatrészeket) tárolnak, továbbá az itt dolgozók száma nagyon alacsony (2-3 személy), így puffer térként működik a raktár a relatív friss levegő számára, mely innen a termelő üzembe utánáramlik.

- A két lépcsőház alaprajzilag közvetlenül kapcsolódik az üzemcsarnokhoz, melyeken keresztül indirekt utánáramlás alakul ki a külső térből a gyártócsarnokba.
- Bizonyos mennyiségű külső levegő beszűrődés az épületburok szerkezetek tipikus kivitelezési pontatlanságai következtében létrejövő filtrációs hézagok miatt is kialakult.
- Mivel ezen lehetőségek még nem indokolják teljes mértékben a nagy arányú légtérfogat áram átszellőzést a tornyokban (az anyag és energiamegmaradás fizikai törvényei alapján), feltételezhető, hogy további utánáramlási forrása is van a légmozgásnak. Az épület geotermikus energiákat is felhasznál a légtechnika beszívott frisslevegőjének előfűtéséhez, illetve előhűtéséhez: egy több mint egy kilométer hosszúságú földalatti csőrendszert építettek három méter mélységben a talajba, melyen keresztül a frisslevegő beszívást temperálják, mielőtt a légkezelők feldolgozzák a befűjandó légellátást. Elképzelhető, hogy a tornyok a külső szél sebességének hatására olyan nagy szívóerőt képesek kifejteni, amely ezen a csőrendszeren keresztül képes levegőt után áramoltatni a szellőzéshez, mivel az üzemcsarnok részleget a fölcSATORNÁTÓL nem lehet légcsatorna ZSALUZATTAL LEZÁRNI. Ezen elmélet bizonyítása viszont további vizsgálatokat tesz szükségessé.

5.2.2.2 Toronyszellőzés nyitott homlokzati csarnok kapuk esetében

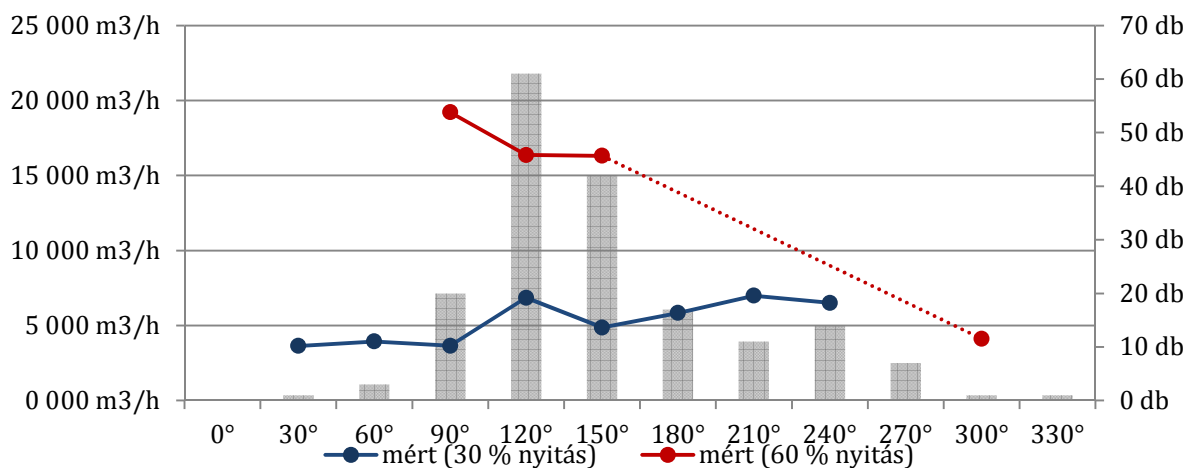
Abban az esetben, ha a homlokzati kapuk nyitva vannak az üzemben, egyértelműen látszik a változás az előző esethez képest. Nappal (kevés esetben) a keleti kapu 0%, középső kapu 100%, a nyugati kapu pedig 50% intenzitással lesz megnyitva az 5.2.2 fejezetben említett huzathatás kialakulása miatt. A kapuk nyitómotorjai nem képesek finomhangolt nyitásmechanizmus kialakítására, ezért az említett differenciált homlokzati kapunyitás megfelelő kompromisszumként üzemel. A keleti kapu azért nem nyitott, mert a mögötte telepített gyártástechnológia berendezései magas hőfokon üzemelnek, termikus hőformázó (termoformázó)

berendezések, melyek 300 °C gépen belüli üzemhőmérséklettel működnek és kihűlés ellen védeni kell őket. A középső kapu mögötti polcrendszer légáramlást tompító hatása miatt nyitott, a nyugati kapu mögötti csarnoktér pedig szabad berendezésű ezért a félig nyitott, „fojtott” nyitási pozíció. Éjszaka azzal a különbséggel nyitják a homlokuati kapukat, hogy a keleti kapu is megnyitódik 100%-ra. Nyitott homlokzati kapuk mellett a tornyok 30%-os nyílászáró nyitásintenzitásakor átlagosan 13000 m³/h, 60%-os nyitásnál pedig 39000 m³/h légátöblítést biztosítottak. Előbbi 5,7 h⁻¹ utóbbi 17 h⁻¹ légcserét jelent óránként a gyártócsarnokban. Fontos itt megjegyezni, hogy a mérések alapján számított jelen eset értékei nagyságrendileg közelítenek a zárt homlokzati kapuk melletti 30 %-os toronynyitás intenzitás légtérfogat áram eredményeihez, azonban ezeket az adatokat különböző szélesebség mellett mérték.

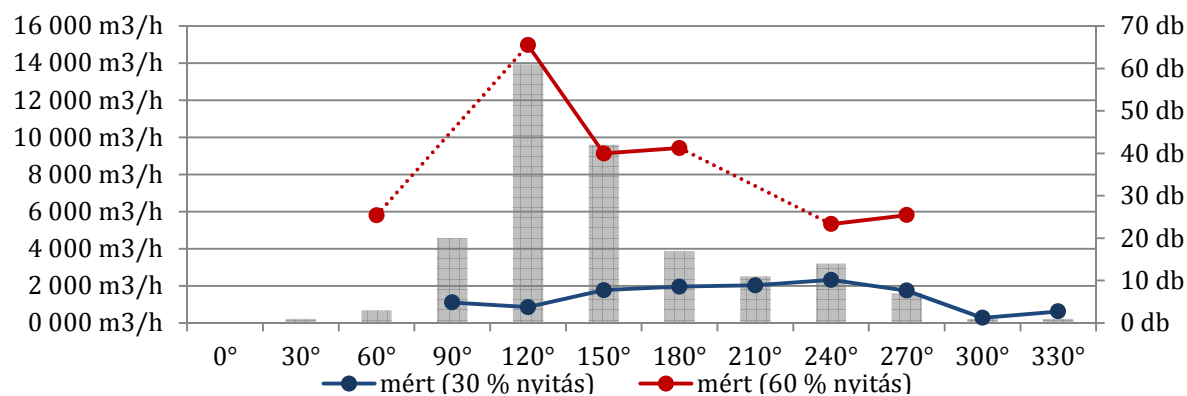
Az 5.6. ábrán elsőként feltűnik, hogy ebben a „nyitott homlokzati kapu” üzemmódban csak a nyugati tornyot üzemeltették 100 % nyitásintenzitással. A szürke oszlopgrafikon ezeken az ábrákon is a tornyokban mért órás átlagolt áramlási mérésadatok darabszámát jelzi a különböző szélirányok esetében. A keleti torony a délkeleti szelekre jobban reagál, nagyobb légöblítést képes elérni. Ennek oka az, hogy a domináns gyakoriságú délkeleti szél egyből a szélexponált keleti toronyba ütközik, nem lassítja semmi, ellentétben a többi szélirányból érkező áramlatok eseteivel, így a széláramlás a lehető legjobb teljesítményt hozza ki a szerkezetből, a kisebb átlagos szélesebség ellenére is. A középső torony frisslevegő után áramlást biztosító nyitott homlokzati kapuk mellett már jól funkcionál, szintén a délkeleti irányú széljárásnál képes nagyobb légtérfogat áramot produkálni.

Azonban mennyiségben a középső torony mind a keleti mind a nyugati tornyok teljesítményétől ebben az esetben is elmarad. 30 %-os nyitás esetén átlagosan közel 5000 m³-el, 60 %-os nyitás esetén pedig már átlagosan kb. 10000 m³ kevesebb szellőző levegőt képes óránként átmozgatni.

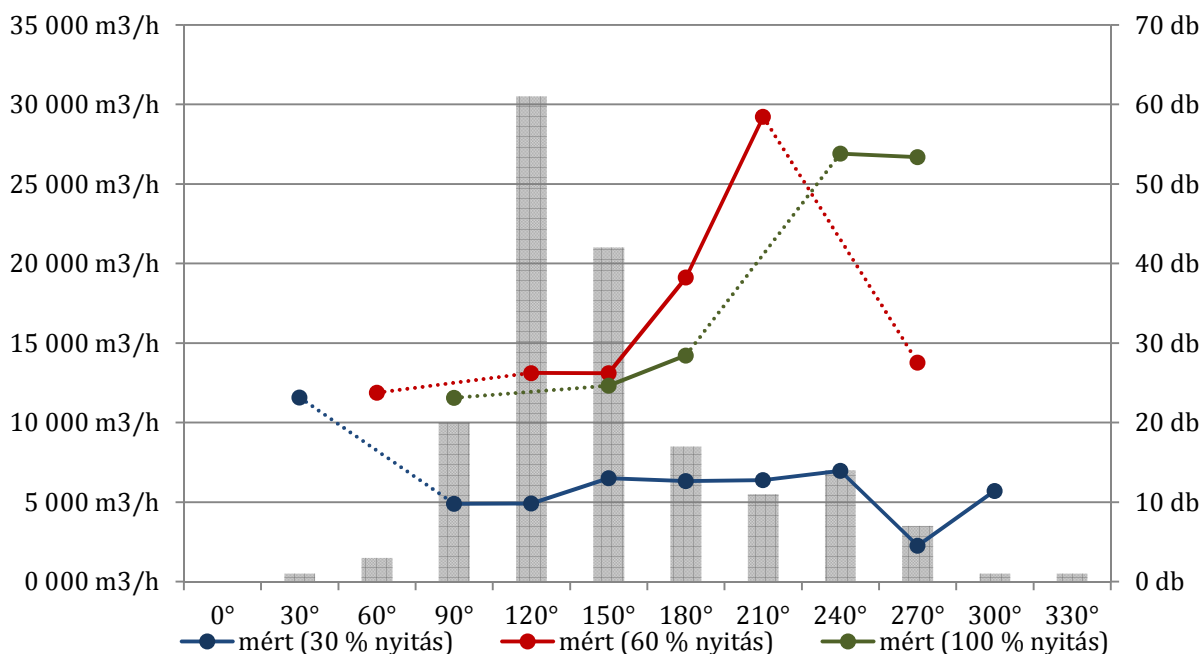
Megfigyelhető az is, hogy a keleti és a középső torony 60%-os torony nyitásintenzitás folyamán keletkező légátöblítése az uralkodó gyakoriságú szélirány függvényében szignifikánsan változik (növekszik), míg 30%-os toronynyitás mellett ezen tornyok szellőzése szélirány függetlenné válik.



Keleti torony



Középső torony



Nyugati torony

5.6 ábra: A három torony szellőzésének (légtér-fogat áram, m³/h) szélirány és nyitásiintenzitás szerinti változása, nyitott homlokzati kapuk mellett

A nyugati torony a nyugati szelekkel dolgozik együtt jobban. Okai ennek ugyan olyan természetűek, mint a keleti torony esetében. Az épülethez érkező szelet nem akadályozza semmi, lassítás nélkül érkezik a szélexponált nyugati torony Venturi-tányérjához, mely következtében a nyugati széláramlásokra jobban reagál a nyugati torony és ekkor nagyobb légátöblítést végez. Ehhez a dél-délnyugati irányhoz tartozó erősebb széljárás miatt a nyugati torony 60% torony nyitásintenzitás mellett a keletinél akár $10000 \text{ m}^3/\text{h}$ –val is nagyobb értékeket produkál. A nyugati tornyot kinyitották 100%-os mértékben is, azonban ez az eset csak 8 db mért órában fordult elő, így nem mondható reprezentatívnak. Az értékek elmaradtak a 60%-os nyitás folyamán mért eredményektől, ami egyrészt a nagyon alacsony számú (és ezért kevésbé reprezentatív) mérés mintavételezésből adódhat, másrészt abból, hogy az épületfelügyelet szabályozása, illetve a manuális beavatkozás alacsonyabb szélsébségek esetén nyitotta csak meg 100% intenzitásra a tornyot, mikor a termelőcsarnokban ellépő hűtőhatás igénye miatt az alacsony szélsébség mellett a torony maximális nyitásával a légátöblítést erősíteni volt szükséges. Ennek logikus következménye az ekkor kialakult kisebb légátöblítés a gyártócsarnokban.

Mindhárom toronyra elmondható, hogy alacsonyabb nyitásnál széljárás függetlenné válik az átöblítés karakterisztikája. A három görbén nem található szignifikáns módon kiugró érték.

A vizsgálatok keretében a homlokzati kapuk szerepét a szellőztetésben is ki szándékoztam mutatni a mérési eredmények segítségével. Kérdésként merült fel, hogy a levegő mekkora hányada áramlik be az erre tervezett nyílászárókon keresztül a csarnokba, a tornyok kiszívott légmennyiségéhez képest. Ebből következtetéseket lehetséges levonni a homlokzati kapukon kívüli további nyílásokon után áramló légmennyiségekre. A mérési eredmények viszont irreálisan magas szélsébség értékeket mutattak, ami a szellőző kapuk elé közvetlenül elhelyezett szekrényrendszerek hatásának köszönhető. Ezek olyan turbulenciákat, légörvényeket hoztak létre, melyek az anemométerek körül gyorsított levegőmozgást indukálnak. A légsebesség mérő szerkezetek azonban irányt nem tudnak mérni, így az értékekből nem lehetséges valós számításokat végezni, tehát további, kézi mérésekre, illetve más mérési pozícióba helyezett anemométeres mérésekre van még szükség a kapuk esetében. Ennek a hibának a kiküszöbölésére, újfajta sebességmérő rendszer kiépítését javasolnám ezen a területen, amely a homlokzati kapuknál és a szekrények mögött, a csarnokban is méri a szélsébséget. A mérő eszközök megfelelő helyét füstvizualizációs eljárással jelölném meg, ahol látszódnának, hol nem zavarják össze a mérőt a keletkező örvények.

Fenti okok miatt a tornyok kiáramlási paramétereivel foglalkoztam, támaszkodva az anyag- és energiamegmaradás fizikai összefüggéseire.

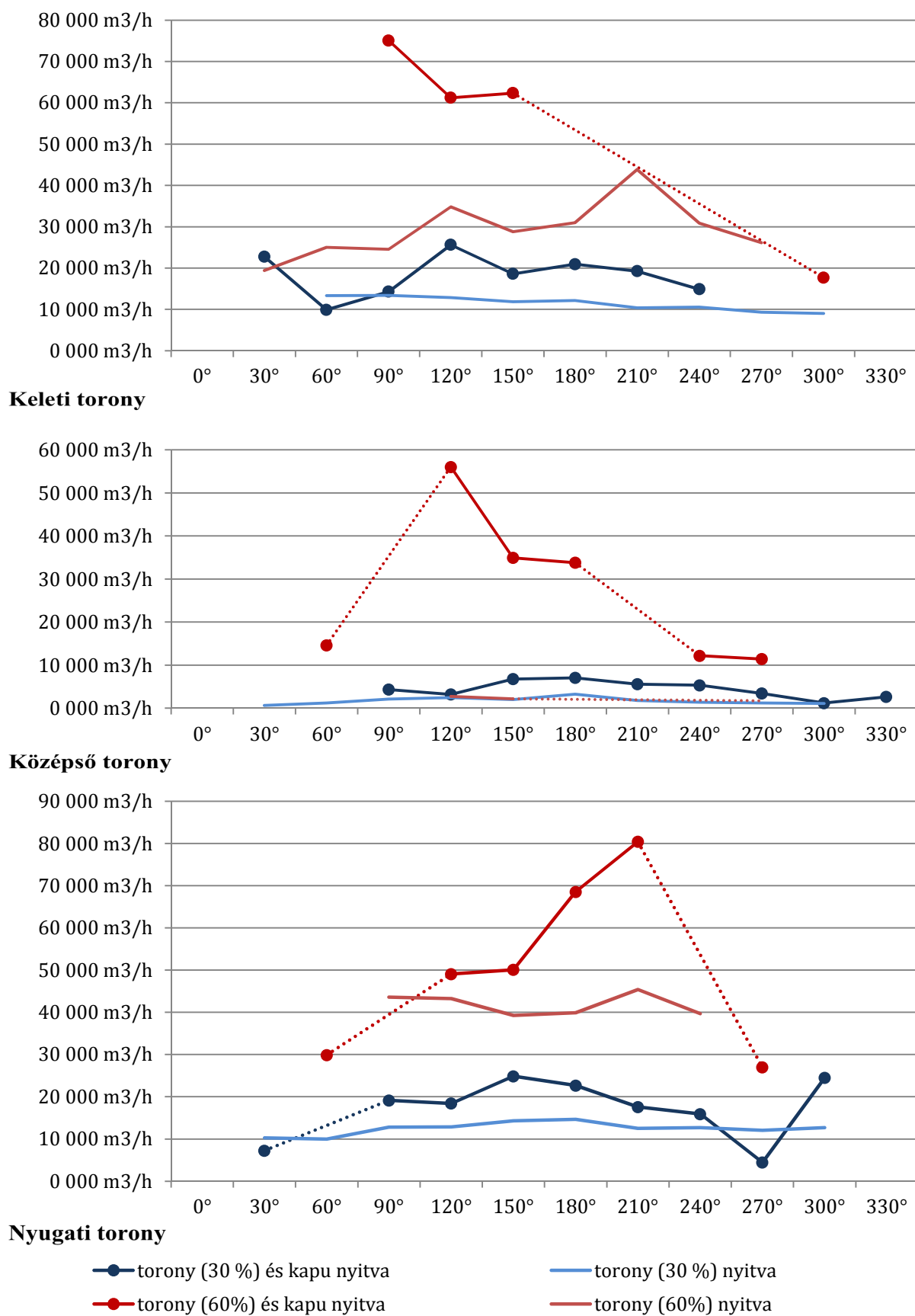
5.2.2.3 Toronyszellőzés működésének összegzése

A két eset összehasonlítása folyamán a mért fluktuáló szélsébségek értékeit egy azonos szélsébség erősségre számítottam át, azon fizikai törvényszerűségekre alapozva, miszerint a légsebesség növekedése és az ezeknek megfelelő légtérfogat áram mennyiségek egymással lineáris viszonyban vannak [39]. A légtérfogat áram értékek 3 m/s szélsébség alatt kialakuló légtérfogat áram nivóra lettek „kalibrálva”, a szélsébséggel egyenes arányban növelve.

Ez a szélsébség gyakorlati okból kifolyólag lett kiválasztva, mivel a következőkben (5.3. fejezet) elemzett szélcsatorna modellkísérletben is 3 m/s légsebességgel végezték a modellezést és így lehetővé válik a mérés és a modellkísérlet sikeres összehasonlítása. Az eredmények alapján (5.7 ábra) kijelenthető, hogy nyitott homlokzati nyílászáró kapukkal nagyobb mennyiségű levegőt képes megmozgatni mindhárom torony: 30% torony nyitás esetén a tornyok kb. 10.000 m³/h-val, 60%-os torony nyitás esetén pedig akár 40.000 m³/h-val nagyobb légöblítés jön létre az üzemcsarnokban.

Elgondolkodtató tény, hogy a 100%-os toronynyitás milyen ritkán lett beállítva a kísérleti épület üzemeltetése folyamán. Ha a tornyok teljes nyitását továbbra is ilyen alacsony számban alkalmazza a BMS automatika algoritmus vagy az épület használóinak kézi „komfort”- beavatkozása, akkor érdemes felülvizsgálni a tornyok geometriáját, paramétereit és optimális értékeit.

Ezen fejezet keretében lényegesnek tartom, hogy kitérjek a toronyszellőzés áramlási irányaira, mivel a hődrótos anemométerek nem érzékelik jelen vizsgálatok keretében a légáramlás irányát. A szellőzőtornyokban a szellőzés áramlási iránya bizonyítottan felfelé áramlik a termelőcsarnokból a tornyokon keresztül a külvilágba, - ezt a jelenséget mind a szélcsatorna modellkísérlet, mind a CFD szimulációk elemezték és igazolták az ENERGIA DESIGN® tervezési folyamat kutatási fejlesztési eljárásaiban [31, 32].



5. 7 ábra: A három torony szellőzésének (légtérfogat áram, m³/h) szélirány és nyitvásintenzitás szerinti változása, összehasonlítva a nyitott és zárt homlokzati kapuk mellett üzem módokat

5.3 Szélcsatorna mérések validálása

5.3.1 Összehasonlító analízis a szélcsatorna szélesebségének korrekciójával

Először tisztázni szükséges a szélcsatorna modellkísérlet mérési módszerei és a valós mérések adatfeldolgozása közötti alapvető különbséget. A szélcsatornában az 5.1 fejezetben tisztázott átlagos szélesebséggel, 3 m/s-mal végezték a kísérleteket. Ahhoz, hogy az épület szellőzési áramlásának légtérfogat áram ($\dot{V}$) értékeket számítani lehessen, aerodinamikai nyomásegységütthető (c_{pe}) értékeket mértek a szélcsatorna áramlási terében elhelyezett épületmodell épületburrok felületein. A mért nyomásegységütthetőségből az alábbi képlet szerint számoltak tovább:

$$\dot{V} = \Delta c_p \cdot A_{aero} \cdot v_{szél} \cdot 3600 \quad (3)$$

ahol a Δc_p a külső és a belső mért szélnyomás értékek különbsége, $v_{szél}$ a szél sebessége, a 3600 az óra másodperc átváltás szorzója, az A_{aero} pedig a torony keresztmetszetének aerodinamikai megfontolások alapján, korrekciós tényezővel módosított (csökkentett) mérete. Ez a c_d korrekciós tényező 0,4 volt, mely az értéket a szerzők nagyon konzervatív számításnak jellemezték, nem tökéletes és nem minden tényezőre kiszámított értékről van szó, de jó közelítést lehetséges belőle számítani. Ez az érték egy hagyományosan nyíló ablak esetén 30°-os nyitásnak felel meg. A korrekciós tényezőt azért kell alkalmazni, mert egy adott keresztmetszetű nyíláson adott sebességgel keresztül áramló levegő sebessége nem egyenlő egy ugyanakkora felületű szabad levegőfelületen áthaladó levegő sebességével, a különböző geometriájú határoló szerkezetek, nyílászárók, stb. örvényeket gerjesztő hatása miatt.

A valós kísérleti épület szellőzési légáramlásának mérésadatgyűjtése alapján a légtérfogat áram számításakor, a torony tetején elhelyezett hődrótos anemométerek (légsebesség mérők) eredményeit a tornyokban kialakuló légáramlási sebességeket használtam fel a következő képlet segítségével.

$$\dot{V} = v \cdot A \cdot 3600 \quad (4)$$

Fontos kiemelni, hogy nem alkalmazok korrekciós tényezőt a torony keresztmetszetének (A) figyelembe vételekor. Lényeges különbség a két számítás között, hogy a szélcsatorna modellkísérlet keretében a torony felső részében kialakuló légsebességre (v) csak egy külső, más helyen mért szélesebesség segítségével tudnak következtetni, mely természetesen a torony áramlási keresztmetszetében kialakuló légörvények, turbulenciák miatt lassul, így értékét is korrigálni kell. Ezzel szemben a valóságban mért adat már a torony által megváltoztatott mozgású légáramlás sebessége, tehát a mérés pillanatában, már a toronyba való beáramlás, súrlódás, toronygeometria és ellenállások okozta módosult légmozgást mérjük, ezért használható korrekció nélkül a mért sebesség érték. [38]

A számítás módszerén kívül eltérés van a modellezhetőségből adódóan is. A szélcsatornás modell mérésében nem volt lehetséges minden körülményt pontosan szimulálni vagy kalkulálni. Ilyen tulajdonságok például a külső-belső léghőmérséklet különbségek. Továbbá a szélcsatorna modellben az üzemszarnok a modellben egy összefüggő üres légtér, mely mérete közel 2300 m^3 a tornyok térfogatával együtt. A valós prototípus épületben viszont ebből a térből a használat során természetesen sok helyet elfoglalnak a betelepített munkagépek, a tároló szekrények és a létesített munkaállomások. A bútorozás nem tömör testekből áll, de a légmozgást jelentősen befolyásoló, légáteresztő képességgel rendelkező tárolók szerelt szerkezetű szekrények. A csarnokban a keleti oldalon öt úgynevezett termoformázó műanyag megmunkáló gép lett elhelyezve, melyek üzemszerű hőterhelését a termelőcsarnok belső légtérére szintén nem vagy nehezen lehetett volna megfelelő pontossággal előre megbecsülni.

A légsebesség és az átöblített légtérfogat áram egyenesen arányos kapcsolata miatt [39] először a szélcsatorna modellkísérlet szélesebességét (3 m/s) számítottam át arányosítva a valós épület mérései keretében mért különböző szélesebesség értékekhez. Ezúton váltak a szélcsatorna modellkísérlet és a valós épület mérési adatai összevethetővé.

Az összehasonlításhoz még szükség volt a szélcsatorna modellkísérlet torony keresztmetszeteinek átszámítására is. Mivel a valós kísérleti épület mérései a toronyban kialakuló súrlódásból, turbulenciákból és belépésből adódó ellenállást már magában hordozzák, ezért a szélcsatorna modellkísérlet kiáramlási torony keresztmetszet méreteit arányosítottam a mért valós kísérleti épület keresztmetszeteihez (nyitási intenzitásaihoz, 30%, 60%, 100%). Ez alapján arányosítva már lehetséges volta a modellkísérlet és a valós épület méréseinek az összehasonlító elemzése.

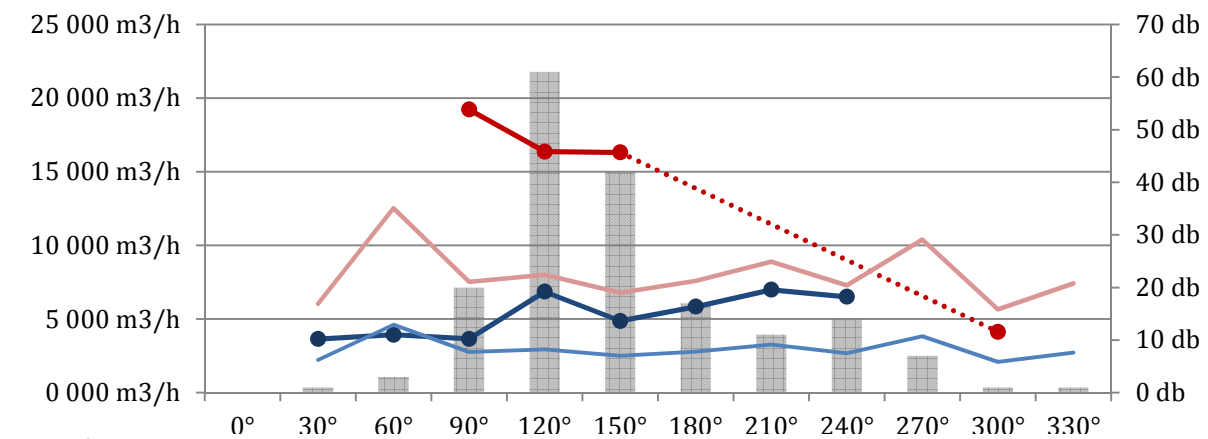
A szélcsatorna mérések során a számításokat 5 K külső és belső hőmérséklet különbség mellett számították ($T_{\text{belső}} = 26 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{\text{külső}} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$). Ezt a tényezőt két okból hagytam figyelmen kívül a további vizsgálatokban. Egyrészt a valós mérések folyamán a tényleges hőmérséklet

alakulás és az együttes szélhatás a valós épület anemométeres áramlási sebesség mérésében már megtalálható. Továbbá a csarnok légcseréje a tornyok szellőztető intenzitása miatt, akár 15 perc alatt is 100%-ban átcserélődhet, tehát a fellépő hőmérsékletkülönbségek kint és bent között jóval intenzívebben változnak, mint a konstans 5 Kelvin. Másrészt egyéb kutatásokban (Ben Richard Hughes, Mak Cheuk-Ming [10]) szellőző széltornyokban a termikus felhajtóerő és a szél hatásait egymástól megkülönböztették és számszerűsítve kimutatták, hogy már kis léptékű kiszellőző tornyoknál is 75%-kal nagyobb teljesítménye van a szél szívóhatásának a belső tér légátöblítésére, mint a termikus felhajtóerőnek (kürtőhatás, termikus felhajtóerő). Összevetve ezeket a tényeket, továbbá figyelembe véve a toronyfűtés szintén elhanyagolhatónak értékelt sokkal magasabb hőmérséklet különbségen működő hatását, a külső és belső tér hőmérsékletkülönbségei nagyságrendileg nem befolyásolják a méréseredményeket.

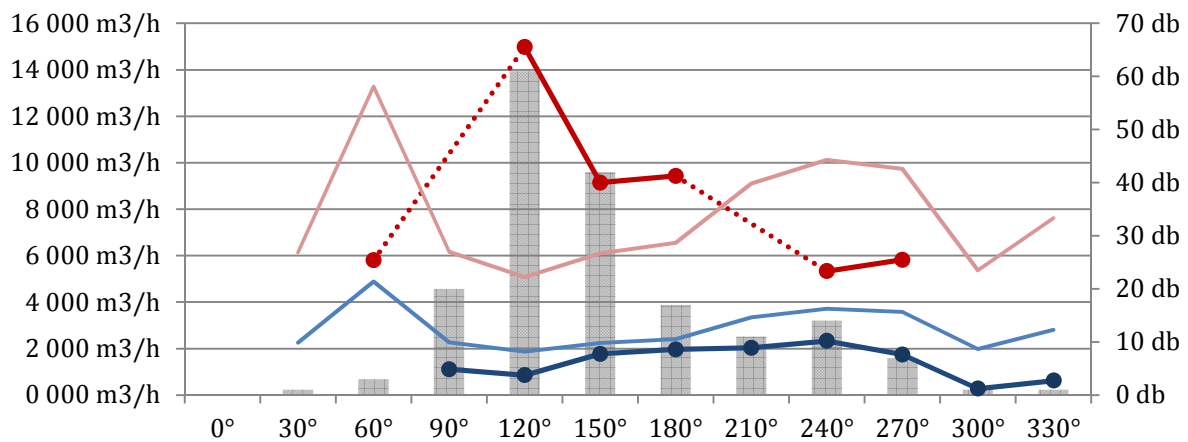
Az eredmények alapján (5.8. ábra) mindhárom toronyra hasonló következtetéseket lehet levonni. 30 %-os torony nyílászáró nyitás esetén a kapott adatok léptékéhez képest kismértékű eltérést mutatnak a modellkísérletben és a valós épületben végrehajtott mérések eredményei. A kísérleti méréseket tehát ilyen intenzitású toronynyitási pozícióban validálhatjuk.

Ezzel ellentétben, 60%-os torony nyitás esetén jelentős eltérést mutatnak az értékek. A keleti és középső torony az uralkodó szélirány esetén teljesít a valós épület mérési eredményeiben jobban, mint a szélcsatorna modellkísérlet eredményei, a nyugati torony pedig a megfelelő szélexponált oldalon a déli, délnyugati szélirányok esetén emelkedik ki. 1,5 néhol 2,5-szeres légátöblítés többlet keletkezik ezen szélirány tartományokban. A tornyok szélexponáltságának mértéke és az uralkodó szélgyakoriság erőteljes hatása olvasható le ezekből az eredményekből, mint háttérösszefüggés. További mérésadatgyűjtésre van szükség annak érdekében, hogy a 60%-os tornynyitás esetére is megbízható igazoló elemzést zárhassak le.

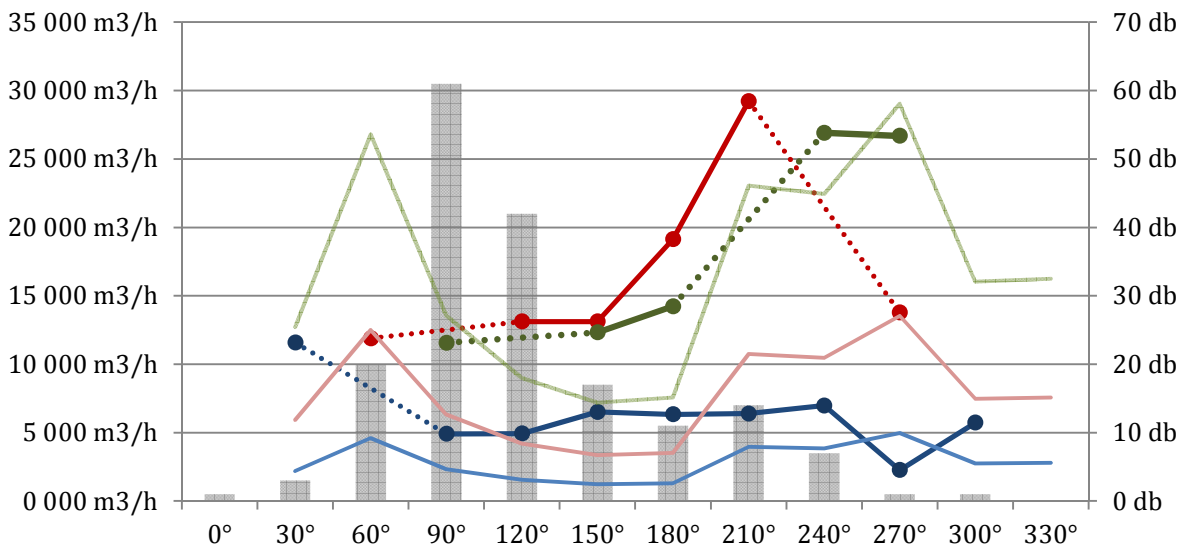
A teljes toronynyitás mellett mért értékek korrelálnak a modellkísérletben mértekkel, azonban ebből a még kevés számú mérési eredmény miatt, nem lehet egészen bizonyos következtetést levonni, ugyanis a tornyokat kevés esetben nyitották meg 100%-ban. A további mérésadatgyűjtés keretében fény derül arra, hogy hosszú távon is ilyen kismértékben használják-e a 100% toronynyitást, ugyankor bizonyos következtetést lehet levonni a korreláló vagy eltérő szélcsatorna, illetve valós épületben mért eredményekből.



Keleti torony



Középső torony



Nyugati torony

- mért (30 % nyitás)
- mért (60 % nyitás)
- mért (100 % nyitás)
- modellezett eredmény (30 % nyitás)
- modellezett eredmény (60% nyitás)
- modellezett eredmény (100% nyitás)

5.8. ábra: A három torony szellőzése (légtérfogat áram, m³/h) a szélcsatorna modellkísérletben és a valós épület méréseiben

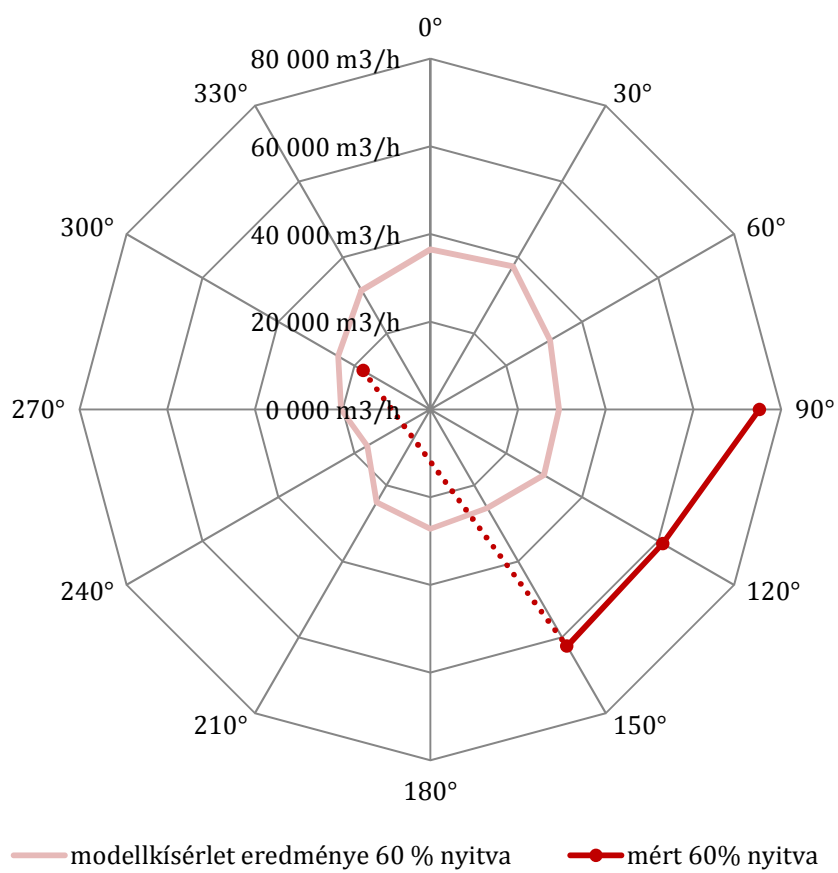
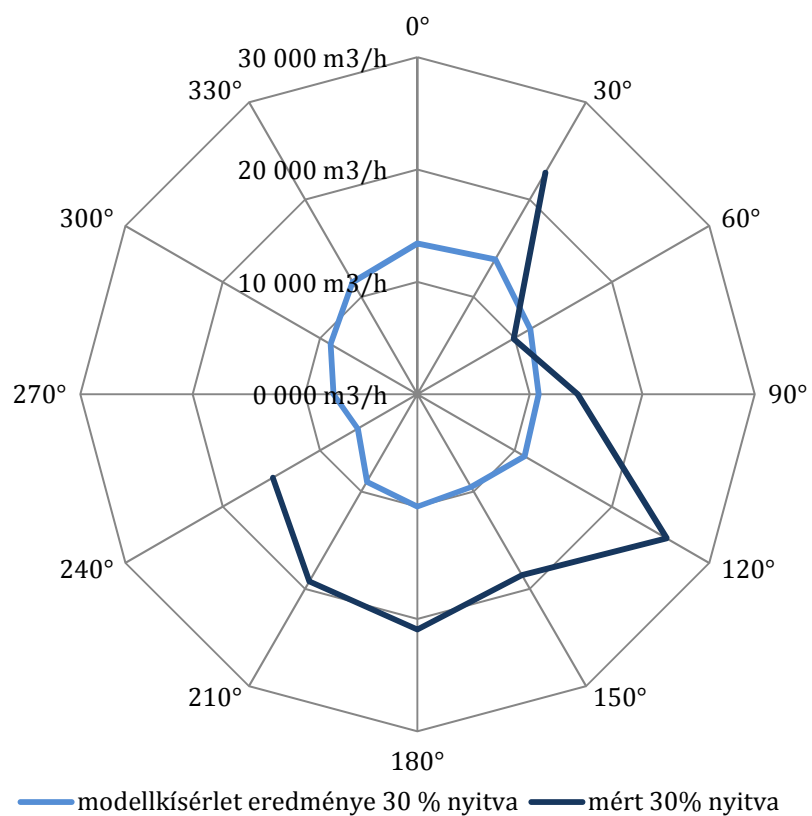
5.3.2 Összehasonlító analízis a kísérleti épület szélesebségeinek korrekciójával

Vizualizációs okokból szélrózsákkal is kimutattam a szélcsatorna modellkísérlet és a prototípus épület méréseinek eredményeit (5.9, 5.10 és 5.11 ábrák). Ahhoz, hogy a szélcsatorna mérések mind a 12 szélirányban kapott eredményeit fel tudjam használni, szükséges volt a valós mérési eredmények szélesebségeinek átszámítására a szélcsatornában tesztelt, 3 m/s értékre és ezután ennek függvényében számolni a légátöblítésekkel. A szélesebségek átszámítását a 5.2.2.3 fejezetben leírtak alapján végeztem, azon fizikai törvényszerűségekre alapozva, miszerint a légsebesség növekedése és az ezeknek megfelelő légtérfogat áram mennyiségek egymással lineáris viszonyban vannak [39].

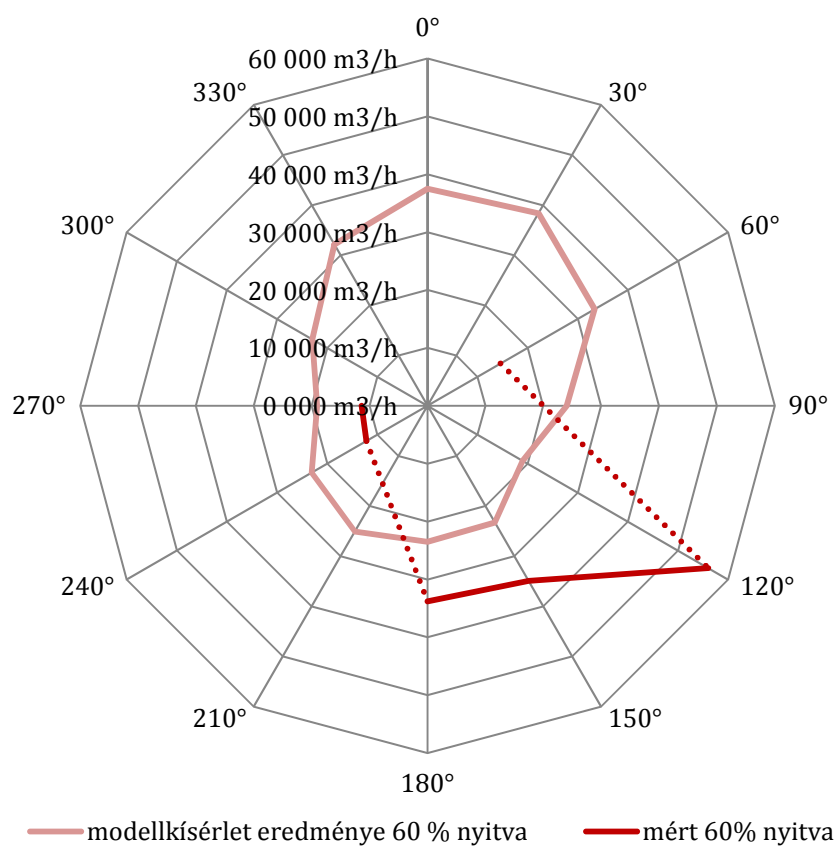
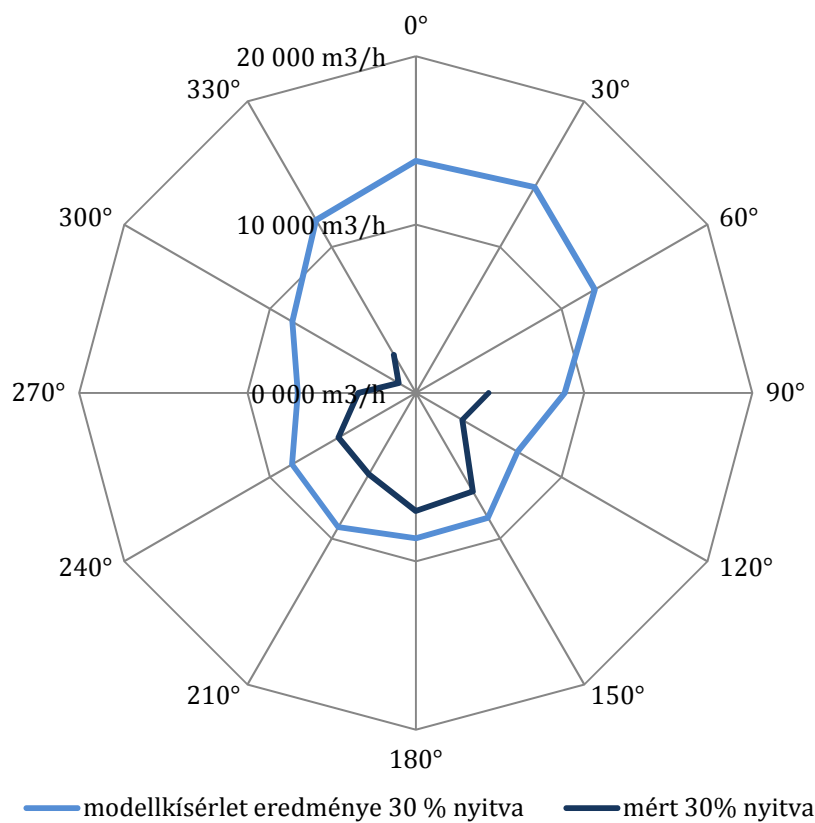
A 30%-os torony nyitás esetében mindhárom torony kiszellőztetett légtérfogat áram teljesítményei – jelleggörbéiket illetően – azonosak a szélcsatorna szélesebségének korrekciójával végzett (5.3.1 fejezet) összehasonlító elemzés eredményeihez, csupán a légátöblítés mennyiségei mutatnak magasabb értékeket, mivel a nagyobb szélesebségek miatt magasabb légtömegeket szellőztetnek a tornyok. Az átlag szélesebség közel megkétszereződésével a légátöblítések közötti különbségek is kb. megkétszereződtek.

60%-os torony nyitás mellett a jelleggörbék karakterisztikái szintén hasonlóan viselkednek mint a 30%-os nyitásnál, kivéve a szélcsatorna és a valós mérések közötti különbséget, melyek a szélesebség kb. megkétszereződésével már magasabbak, a középső torony esetében ötszörös faktort mutatnak. A nyugati torony értékeinek összehasonlítása követi a 60%-os nyitás esetének példáját.

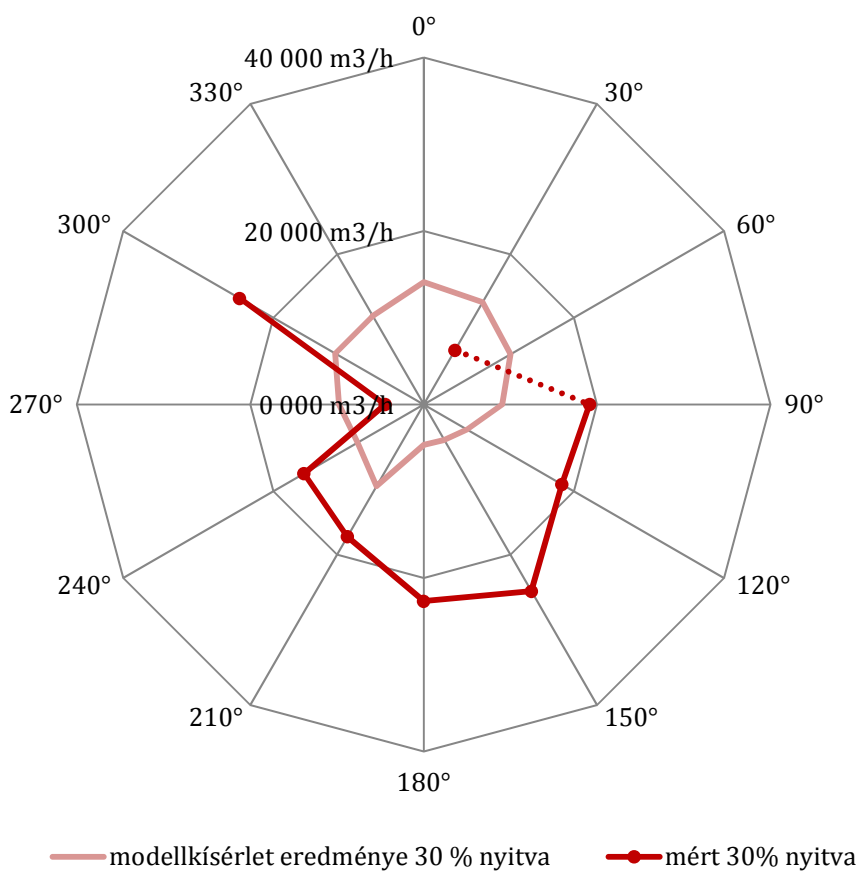
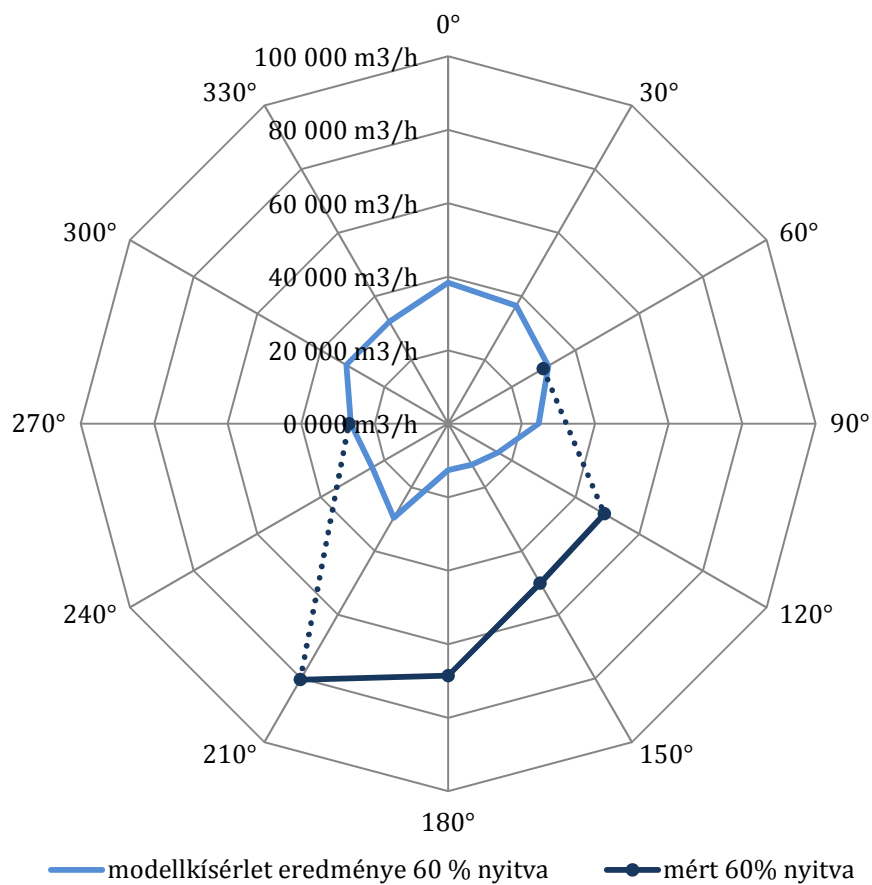
Ezen eredmények hangsúlyozzák, milyen intenzív hatása van a szélesebségnek belső terek légátöblítésének intenzitására.

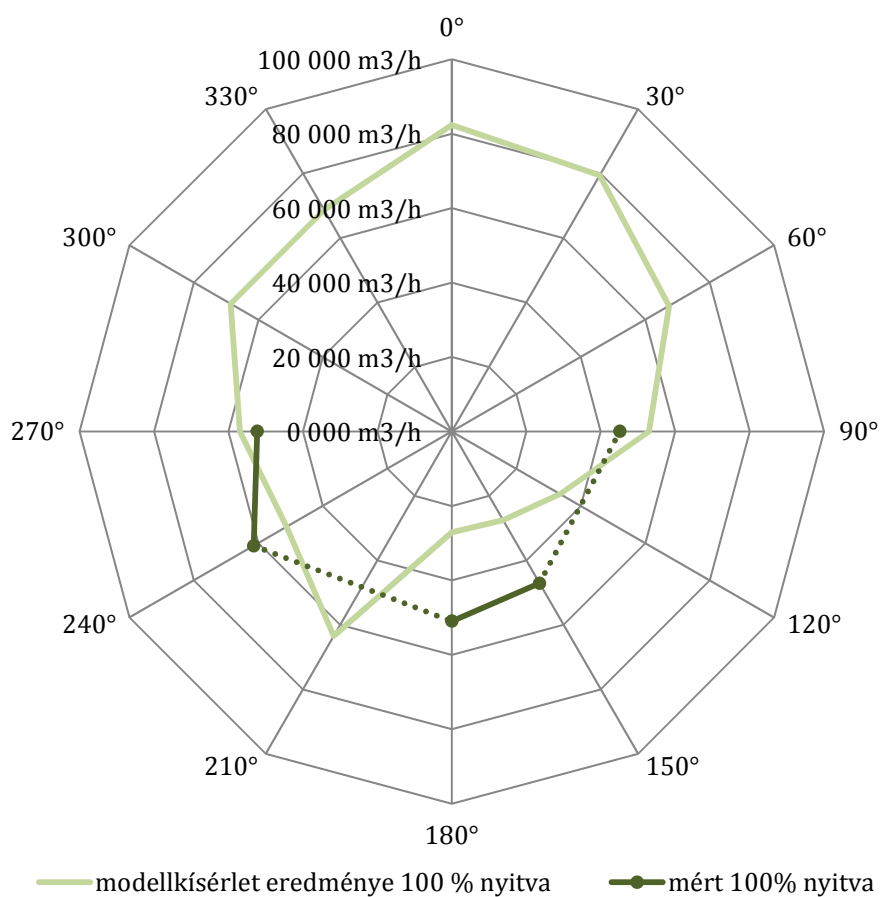


5.9. ábrák: Keleti torony légátöblítő képessége szélirány és nyitásintenzitás alapján a szélcsatorny modellkísérlet eredménye-
ihez viszonyítva - szélrózsa kimutatás



5.10 ábrák: Középső torony légátöblítő képessége széliráyn és nyitásintenzitás alapján a szélcsatorna modellkísérlet eredményeihez viszonyítva - szélrózsa kimutatás





5.11 ábrák: Nyugati torony légátöblítő képessége széliráyn és nyitásintenzitás alapján a szélcsatorny modellkísérlet eredményeihez viszonyítva - szélrózsa kimutatás

6. Következtetések

6.1. A kísérleti épület szellőzőrendszerének minősítése

6.1.1 A kapuk működése

Elengedhetetlen, hogy a helyi, a beépítési telken uralkodó (mikroklíma) lokális szélkarakteristikáját is ismerjük és ezúton megbízható eredményeket kapjunk a kutatásban vagy tervezésben, mivel a helyi szélviszonyok nagymértékben módosulhatnak a lokális, adott terepviszonyokból, szomszédos beépítésből, vegetációból, illetve hőmérsékletekből adódóan [1].

Az üzemcsarnok északi homlokzati kapuinak nyitásintenzitását gyakorlatilag nem lehetséges szabályozni, a kapuk zárt illetve 100%-ban nyitott állapotokban üzemelnek, részletesebb nyitásintenzitás nem lehetséges, illetve a 100% nyitást egy 50%-os nyitási variációval lehet csupán kiegészíteni, mikor a kétszárnyú tolókapu csak egyik szárnyát nyitják teljes mértékben (ekkor összességében a tolókapu 50%-ban van nyitva). Ebből egyenesen következik, hogy a beáramló légmennyiséget sem lehet mérsékelni a huzathatás elkerülése végett. A dolgozók komfortja érdekében tehát műszakidő alatt csak nagyon ritkán használták a homlokzati kapukat, csak akkor, ha a széljárás is lehetővé tette. Az eredeti tervek szerint léptető motorokkal felszerelt kapuk lettek volna beépítve, amely elláthatta volna a szabad keresztmetszet szabályozásának feladatát, de a beruházó a költséghatékonyabb megoldást választotta a projekt kivitelezésekor. Következtetésként le kell vonni, hogy nagyméretű szellőzéshez kialakított nyílászárók esetén, ha a komforttényezőkkel számolnunk kell, akkor kizárólag kontrolálható, szabályozható nyílászárókat építsünk be. Ennek előnye, hogy friss, jó minőségű, megfelelő mennyiségű és komfortos (lassú légsebességű) légellátást lehetséges biztosítani, az ASHRAE 55 nemzetközi szabványban megfogalmazottak alapján.

6.1.2 Tornyok működése zárt kapuk mellett

Elgondolkodtatóak az eredmények, melyek szerint a tornyoknak lényegesen nagyobb légátöblítő képességük van zárt homlokzati utánáramlási kapuk mellett, mint várható volt. Ez a toronyszelőzési karakterisztika több körülmény miatt válik lehetővé. Az üzemcsarnok raktárral szomszédos oldalán két szekcionált ipari kapu, továbbá a raktárban ezekhez közel, még további két kapun keresztül a külső térrel indirekt módon szomszédos az üzemcsarnok. A raktár kapui az anyagmozgatás miatt gyakran nyitva vannak, így ha a raktárt az üzemcsarnoktól el-

választó kapukat is megnyitják „rövidzár” képes kialakulni a levegőáramlásban. A mérési eredmények egyértelműen utalnak arra, hogy ilyenkor a kapukon keresztül, az alaprajzilag közeli, keleti és nyugati, tornyokba áramlik a levegő, egyfajta „rövidzárlatot” kialakítva a termelőcsarnokban, mely nincs negatív hatással a belső tér komfortjára, csupán erősíti a légcsereszámot az üzemcsarnokban.

Valószínűsíthető ezen kívül az a hipotézis, mely szerint a tornyok a levegő után áramlásnak további jelentős részét a földalatti talaj-levegő hőcserélő légcsatornán keresztül szívják be a termelőcsarnokba, mivel zárómechanizmus zsaluzat a légtechnikai csatornarendszerben itt nem található. A hálózat egy tichelmann formájú, párhuzamos kötésű, temperáló csőszervezet, mely az épületprojekt generáltervező információja alapján hazánk legnagyobb, több mint egy kilométeres teljes hosszával előmelegíti, illetve előhűti a kültérből beszívott, szállított levegőt. Geotermikus talaj és meteorológiai környezeti viszonyoktól függően 1,5 - 3 méterrel a földfelszín alatt a hőmérséklet két - három hónapos késleltetéssel veszi fel a szezonális minimum és maximum hőmérséklet értéket [1]. Ez a jelenlegi éghajlaton egy időjárási évszaknak felel meg, így képes a rendszer nyáron hűtőhatást, ősszel, kora télen pedig fűtőhatást elérni.

A tervezés során az építész és épületgépész tervező arra hagyatkozott, hogy csak a tervezett légtechnikai (légkezelőkből álló) rendszer tudja majd leküzdeni a beszívott közel $4500 \text{ m}^3/\text{h}$ légtérfogató áram számára az egy kilométeres hálózat nyomáseséséből keletkező áramlási ellenállást. Ha azonban igaz, hogy a tornyokban keletkező szívó hatás zárt homlokzati nyílászárók mellett képes felszívni levegőt, a talaj-levegő kollektor rendszerén keresztül is, akkor a kapukra a nappali szellőztetés során nincs, vagy csak ritkán van szükség. Ezáltal a kapuk feladata csak az éjszakai szellőztetés során jelentős, mikor intenzívebb légátöblítésre, magasabb légtérfogató áram értékekre van szükség a nappali hőterhek hatására felmelegedett épületszerkezetek hőenergiájának bizonyos mértékű letöltése, lehűtése céljából. A tornyok a zárt homlokzati kapuk ellenére sem csupán egy szellőzőrendszert alkotnak, hanem kiegészülve egy geotermikus talaj-levegő kollektorral működnek, akár csak az ősi mezopotámiai vagy azok mintája alapján tervezett közel-keleti épületek. A földalatti légcsatornákat quanat-nak nevezik az említett területeken, mely működését a 2.1.1 fejezetben megemlítettem [4]. Hátrányai, hogy nagyon költséges tisztítani és karban tartani, valamint a környezet ideális patkányok és más kórokozót hordozó rágcsálók megtelepedésére valamint a magas páratartalom miatt gombák, penész és baktériumok jelennek meg a vezetékekben. Ezzel ellentétben, a kísérleti épületben egy ipari ezüst bevonattal rendelkező antibakteriális csatornarendszer készült el, melynek megfelelő kondenzvíz gyűjtő, és elvezető rendszere van [35]. A 6.1. ábra az elvi

működését mutatja a rendszernek, mely 3 m mélységben került 3%-os lejtéssel kialakításra a keletkező kondenzvíz elvezetése céljából.

6.1 ábra: Felszínközeli talaj-levegő hőcserélő légcatorna hálózat tichelmann kötésben

Ennek a hipotézisnek igazolására hőkamerás vizsgálatokat, illetve kézi anemométeres méréseket végeznék az üzemcsarnok légcatornájának légbeáramlási nyílásai, anemosztátjai mentén vizsgálva a lehetséges légbeáramlási sebességeket, mennyiségeket és hőmérsékleteket, melyeket főként télen, a fűtési periódusban érdemes vizsgálni, a hideg időszakokban $T_{k\ddot{u}ls\ddot{o}} \leq 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ mellett a csarnokba a földcsatornán keresztül beáramló kb. 6-8 $^{\circ}\text{C}$ belépő léghőmérsékletek esetében.

Az MMS (épület monitoring megfigyelőrendszer) mérési adatokat rögzít az üzemben több helyen a léghőmérsékletről, valamint adatokat rögzít a geotermikus légcatorna rendszer több pontján a hőmérsékletről [40], mely alapján vizsgálni lehetne a földcsatorna hűtő/fűtő hatás mértékét, az energiamegtakarítás mennyiségét és a komfortérzetre gyakorolt hatását is.

A tornyok teljesítménye tájolásuk, elhelyezkedésük és a szélirány kapcsolatától, a nyílásaik geometriájától, a nyitásintenzitástól és természetesen a szél sebességétől függ. A széláramlatok, szélviszonyok jellemzőit nem elegendő, ha az országos adatok (makroklíma) vagy egy mérőállomáshoz kötődő „tájklíma” vagy városklíma (mezoklíma) adatai alapján vizsgáljuk egy konkrét épület esetében, hanem szükséges a mikroklimatikus szélviszonyok vizsgálata.

764 órában volt lehetséges mérésadatokat gyűjteni zárt kapuk melletti üzemállapotokról, ezen belül naponta 8-10 órás üzemidő periódusokban. Mivel ezen időintervallumon belül az összesen 1557 db esetben mérési eredményekből történt mintavételből 1378 db mérés 30%-os toronynyitás mellett készült, ezért az itt kapott értékek reprezentatívnak tekinthetők.

A szélexponált keleti, és nyugati tornyok egyharmados (30%) nyitásintenzitásnál körülbelül 5000 - 6000 m³/h légátöblítést végeztek, mely kb. kétszeres légcseré óránként, emellett viszont a középső torony elhanyagolható értékeket produkált. 60%-os nyitás mellett már 17000 m³ levegőt áramoltatott óránként a toronyrendszer, mely az üzemcsarnokban 6 h⁻¹ légcsereszámot jelent.

Abból a tényből kiindulva, hogy csukott homlokzati kapuk mellett, nem teljes mértékű nyitásnál is ilyen nagy átöblítő képességei vannak a tornyoknak a gyártócsarnokban, elképzelhető, hogy kevesebb toronnyal is működtethető lenne az épület természetes szellőzőrendszere.

6.1.3 Tornyok működése nyitott kapuk mellett

A tornyok nyílászárói az üzemcsarnok homlokzati kapuival szinkronban főleg éjszaka voltak nyitva, a zárt kapus esethez képest jóval kevesebbszer. 178 órában volt lehetséges mérési adatokat gyűjteni nyitott homlokzati kapuk melletti üzemállapotokról, ezen belül általában naponta 4-5 óra éjszakai üzemmódban. Ezen belül összesen 340 db mérési eredményekből történt mintavételből 279 db mérés 30%-os toronynyitás mellett készült, ezért az itt kapott értékek reprezentatívnak tekinthetők. 30% nyitások esetén átlagosan 13000 m³/h légtérfogat áramot öblített át óránként a három torony, mely kb. 4,5 h⁻¹ légcsereszámot jelent az üzemcsarnokban. Ennél a nyitásintenzitásnál még mindig nagyon alacsony részt vesz ki a középső torony a szellőzésből, azonban 60%-os nyitás mellett már ez a torony is képes 11000 m³/h légtérfogat áram szellőzési erősség elérésére. A mérések során kiderült, hogy a középső tornyot ritkán nyitják ki 60%-ra, valamint az elmúlt év során egyáltalán nem nyitották ki teljes mértékben (100%). Annak érdekében, hogy a rosszabb légátöblítő képességet növelni lehessen, szüksé-

ges a középső tornyot is 100%-ra megnyitni abban az esetben is, ha a másik két szellőzőtorony kevésbé van megnyitva.

Az eddigi mérések azonban arra mutattak rá, hogy a két szélső torony önmagukban is képesek ellátni az üzem kiszellőztetését, így akár el is hagyható a harmadik torony, - az épülettervezés eredményeként született passzív toronyszellőző rendszer hatékonyabb a vártnál, a bizonyos mértékű biztonsági túlméretezést redukálni lehet. További mérésadatgyűjtés viszont elengedhetetlen ahhoz, hogy a redukciót, optimalizációt a tornyok méretezésére vonatkozólag pontosítani lehessen. Az épület optimalizációja (rekalibrálása) során újra lehetne pozicionálni a keleti illetve nyugati tornyokat, és a meglévő adatok alkalmasak lennének újfajta

- toronykeresztmetszetek,
- toronymagasságok
- és szélterelő szerkezetek kialakításához.

A középső torony megléte az éjszakai szerkezettemperálás során lehet még nagy horderejű, mivel az éjszakai passzív szellőző hűtés során nem az áramló levegő sebessége, illetve mennyisége az egyetlen meghatározó tényező, hanem a hőtároló (a kísérleti épületben vasbeton földem- és téglafal) szerkezetek hőátadásának ideje és intenzitása. Ennek számításait el lehet végezni a BMS és MMS rendszerek által gyűjtött felületi hőmérséklet, csarnok léghőmérséklet és torony léghőmérséklet (tornyonként 6 db léghőmérséklet és relatív páratartalom mérő) adatait, hőmérséklet grádienseit felhasználva, miáltal a szellőzés optimális üzemeltetési módjait határozhatjuk meg. [40]

Az épület toronyfűtésének hatását légátöblítés szempontjából egyelőre nem lehetséges vizsgálni, mivel a szélsőségek hatásukban jóval felülírják a termikus felhajtó erő hatását. A légátöblítő képességet túl sok variábilis környezeti tényező befolyásolja, melyek reprezentatív összehasonlítása ekkora időintervallumban nem lehetséges. A jelenlegi eredményekben szignifikáns különbségeket nem lehetett beazonosítani, mert a szél sebessége felülírta a termikus felhajtóerő teljesítményét. A toronyfűtés funkcióját, hatását kizárólag szélcsend esetén ($v_{szél} = 0$ m/s) lehetséges majd érdemlegesen vizsgálni, viszont a toronyfűtés rendszer addig is ellátja másik – alapvető – feladatát, a termikus napkollektoros és HMV puffertároló rendszer visszahűtését, mely során a toronypalást falszerkezet tetején elhelyezett hőcserélő csőhálózat hűti a napkollektorok által túlmelegített szolár-HMV puffertárolót.

Nyitott homlokzati kapuk mellett csupán a nyugati torony esetében történt elenyésző esetben (8 mért óraszámban) 100% torony nyitásiintenzitás.

6.2 A modellísérlet validációja

A validáció keretében a „5.3.1 Összehasonlító analízis a szélcsatorna szélesebségének korrekciójával” fejezet számításaira lehetséges inkább támaszkodni, ahol nem a valós szélesebségek kerülnek átszámításra, hanem inkább a szélcsatorna elméleti magyarországi átlagsebessége (3 m/s).

A 30%-os toronynyitási üzemmód mellett nyertem a legtöbb mért órás átlagértéket, melyek eredményei következésképpen ebben a kutatásban a legrepresentatívabbak és legmegbízhatóbbak. A tornyok 30%-os nyitásintenzitása folyamán a kapott összehasonlító analízis (5.3. fejezet) alapján látható, hogy a szélcsatorna mérési értékek, illetve a valós prototípus épületben mért értékek a tornyok légátöblítési karakterisztikájához és értékeihez képest nem térnek el egymástól jelentős mértékben, tehát **konvergensenek minősíthetők a légtérfogat áram eredmények mindkét mérés esetében; egyben kijelenthető, hogy a valós mérések a szélcsatorna mérések eredményeit validálják. Megállapítható, hogy jó döntés volt a tervezési módszerben alkalmazni a szélcsatorna méréseket, és a nyert értékek alapján meghatározni az épület szellőzőrendszerének főbb paramétereit.**

Ezzel ellentétben 60%-os toronynyitásnál már jelentősen eltérő eredmények is születtek, főként a tornyok szélexponáltságának függvényében. Ezen eredmények viszont kevésbé reprezentatívak a modellkísérlet igazolása szempontjából, mivel csak 51 mért órában van mérésadat, tehát nagyon kevés számú érték áll rendelkezésre az összehasonlításhoz. Erre a tényre felállítottam két hipotézist, melyek igazságtartalmát csak további mérési mintavételezéssel lehetséges igazolni. Az első szerint az algoritmus csak akkor nyitott 100%-ra, amikor alacsonyabb volt a szélesebség, és a 60%-os nyitás nem elégítette ki a meghatározott hűtés mértékét. Ilyenkor a 100%-os nyitás alacsonyabb szélesebség mellett zajlott, így az öblítés is kisebbnek számított. A 60%-os mérések azonban nagyobb szeleknél jobban működtek, így az algoritmus szükségtelennek tartotta a nyílás további növelését.

A második feltevés szerint a 60 %-os nyitás (nyílászáró szárny dőlésszöge: 52°) egy olyan geometriájú nyílást hoz létre a téglalap alaprajzú toronyban, mely a szélre gyorsító hatással van. Ez a szelephatás pedig megnöveli a kiáramló levegő sebességét, így akár a légtérfogat áram növekedéséhez is vezethet. Érdekes jelenség, mely szerint a teljes nyitású toronyállapotban kisebb a légátöblítés. Ennek oka a felvázolt szelephatás lehet, melyet újabb, konkrétabb szélcsatorna mérésekkel, CFD szimulációkkal, vagy a helyszíni fokozottabb, mérésfelvétellel lehet ellenőrizni.

Lényeges viszont itt is megemlíteni, hogy a mérésadatgyűjtés folytatására, az adatbázis rendszer fejlesztésére feltétlenül szükség van ezen elméletek megbízható igazolásához, tervezéséhez, fejlesztéséhez és megvalósításához a gyakorlatban, ebben a kísérleti épületben.

6.3 Általánosított ismeretanyag hasonló csarnokjellegű épületekre

Magyarország jellegzetes, viszonylag mérsékelt szélsébségű területén felépült prototípus épületen végzett mérések alapján, a hasonló hazai és nemzetközi klimatikus területeken épülő, leendő könnyűipari funkciójú csarnokokkal kapcsolatban általánosítható tervezési következtetéseket lehet levonni. Ezek a következtetések hasonló méretarányokkal és dimenziókkal rendelkező, összefüggő nagyterű épületek tervezése során hasznosíthatóak. Mivel a három torony együttesen 30%-os toronynyitásnál kb. 13000 m³/h légtérfogat áram mellett 5,7-szeres légcserét, 60%-os torony nyitás esetén kb. 39000 m³/h mellett közel 17 h⁻¹ légcsereszámot képes produkálni, ezért kijelenthető, hogy a tornyok természetes szellőztetés céljára túlméretezettek, és ezért leggyakrabban csak 30%-os nyitással üzemeltek. Azonban az éjszakai szellőzés által kialakult hűtés további légsebesség, hőmérséklet és épület energiafogyasztás (villamos áram és hőmennyiség) mérésadat gyűjtés alapján szintén minősíthető, melyek eredményei a tornyok ilyen dimenziójú megépítését igazolhatják (szellőzéshez nappali munkaidőben kisebb intenzitású toronynyitás, éjszaka pedig intenzívebb toronynyitás üzemeltetése), vagy ellenkező esetben módosíthatják. Az általánosítható tervezési fogások a következők:

- a) Hasonló méretű tornyok tervezése esetén, nagyobb távolságot érdemes tartani két szellőző torony között, annak érdekében, hogy a természetes széláramlatok a toronnyal való találkozás, illetve a torony által módosult turbulens viszonyok után visszanyerje eredeti tulajdonságait, és karakterisztikája konszolidálódni tudjon. Ellenkező esetben a megzavart örvényektől torzított szélhatás miatt, a közrefogott, illetve szélárnyékban található torony (a kísérleti épület esetében a középső torony) környezetében depresszió, alacsony szélsébségű terület alakul ki és így ez a szellőzőtorony nem képes megfelelő légátöblítést végezni.
- b) Abban az esetben, ha nem lehetséges a széltornyok közötti távolságok növelése, akkor egymáshoz képest a tornyok helyzete, illetve magasságuk variációjával lehetséges az a) pontban említett „szélárnyékolt” szellőzőtorony hátrányos szellőztető teljesítőképességét javítani.

- c) Ezzel összefüggésben, olyan üzemcsarnokokban, melyek geometriája a csarnoktömeg és toronykonstelláció szempontjából hasonló, csupán szellőző légcseré szempontjából nincs szükség 3 db hasonló léptékű toronyra a szellőzőrendszer kiszolgálása céljából, mert a középső torony alacsony teljesítménye nélkül 2 db torony is ki tudja szolgálni a csarnoképületet. A toronykapacitás vagy torony darbszám növelése csak éjszakai szellőző hűtés esetén indokolt.
- d) Ha a tervezést előkészítő építkezési helyszínen végzett pontos mérések során uralkodó széliránytartományokat lehet beazonosítani, akkor a szellőzőtornyok nyílásait speciálisan is lehet tájolni a kihasználtság megnövelése érdekében. Különböző alacsony és magas nyomású zónák kialakítása és szellőzésre való hasznosítása lehetséges a torony nyílásának és formájának tudatos képzésével. A szélirány oldalon (Luv oldal [1]) légbeeresztés lehetséges, a szélárnyékos oldalon pedig (Lee oldal [1]) légkieresztés üzemelhet egymástól elkülönítve, vagy a Lee oldal csak kiereszt, utánáramlás pedig más Luv oldali szélnyomással rendelkező épületburok nyílászárókon keresztül képes üzemelni.
- e) Ilyen léptékű tornyok és csarnokgeometria arány esetében olyan mértékű huzathatás jön létre teljes szellőző nyílászárók nyitásával, mely jelentősen rontja a komfortfokozatát a csarnoknak. Ennek elkerülése érdekében felül kell vizsgálni a tornyok geometriai paramétereinek indokoltságát, illetve a nyitás-zárás finomszabályzás lehetőségét biztosítani kell.
- f) Épületszerkezettani szempontból kijelenthető, hogy csarnokjellegű épületek passzív toronyszerkezetekkel történő szellőzését akár moduláris, előregyártott szerkezetekkel is meg lehetséges valósítani egy további épületszerkezeti fejlesztési munka keretében.

7. Összegzés

7.1. A kutatás előzménye és módszere: prototípus pluszenergia potenciállal rendelkező épület innovatív passzív szellőzőrendszerrel

A fenntarthatóság érdekében folyamatosan szigorodó épületenergetikai előírások születnek, például az EPBD 2013/31/EU (Energy Performance Building Directive) épületek energetikai minőségének irányelvét figyelembe véve, miszerint 2019-től minden új létesítésű középület és 2021-től minden új létesítésű épület kizárólag NZEB (Net Zero Energy Building) közel nulla energiaigénnyel kell, hogy rendelkezzen. Erre reagálva a Pécsi Tudományegyetem Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar, Energiadesign Tanszéke kidolgozott egy több szempontból is innovatív speciális tervezési eljárást, az ENERGIA DESIGN® módszert, a pluszenergia mérleggel rendelkező épületek megvalósításához. A módszer alkalmazásával az első megvalósult létesítmény egy prototípus ipari és irodaépület projekt Komlón, mely a RATI Kft. tulajdonában üzemel, ugyanakkor az Energiadesign Tanszék számára kutatási épületklimatikai és –energetikai laborként is működtetett. Az energia- és környezettudatos szemléletet ötvöző fenntartható épület energiamérlege pluszenergia szint (aktívház) elérésére is képes [41]. E cél eléréséhez a prototípus épület komplex energiahatékony épületszerkezeti, épületgépészeti és energetikai rendszerekkel rendelkezik, melyek közül kutatásomban az energiahatékony és a légkényeztetés egyik stratégiaileg legfontosabb alkotóelemét, az épület passzív épületszerkezetekből álló szellőző rendszerét és működését vizsgáltam meg.

Az épület látványának fő karakterét az a három torony adja meg, melyek biztosítják a prototípus létesítmény fő terének, a gyártócsarnoknak a természetes átszellőzését. A tornyok tetejére úgynevezett 'Venturi'- tányérok kerültek elhelyezésre, melyek a természetes széláramlás sebességét a torony és a tányérszerkezetek között felgyorsítva a kürtőhatást tovább erősítő szívóhatást alakítanak ki a tornyokban, ezáltal növelve az átöblített légtér fogat áram mennyiségét a termelőcsarnokban. Ebbe az üzemcsarnokba kívülről három kapun keresztül biztosított a légutánpótlás, illetve közvetett és ideiglenes módon a szomszédos raktárcsarnok teréből, valamint a lépcsőházakból is után áramlás lehetséges.

A kísérleti létesítmény épületfelügyeleti vezérlő és szabályzó rendszere (BMS, building management system), továbbá az épület mobilis megfigyelő rendszere (MMS, mobile monitoring system) segítségével mérés adatokat gyűjtöttem a helyi szélviszonyokról, valamint a passzív toronyszellőzés rendszerének légáramlási karakterisztikájáról óránkénti felbontásban.

7.2. A kutatás célkitűzése

A kutatásban lehetőség nyílt a prototípus épület három szellőzőtoronyból álló természetes szellőzőrendszerének vizsgálatára, a működés áramlástan mérésadat gyűjtéssel támogatott elemzésére az elmúlt egy évben. Az eredmények alapján a következő fő kérdéskörök megválaszolását tűztem ki célul:

- a) *Az ENERGIA DESIGN® pluszenergia mérleggel rendelkező épülettervezési módszer alkalmazásával, azon belül az épület aerodinamikai tervezési eljárás segítségével milyen pontossággal lehetett a prototípus épület passzív szellőző koncepcióját meghatározni, működését előre jelezni?*

Az eredményekkel fel akartam tárni a különbségeket az ENERGIA DESIGN® módszerben alkalmazott épületaerodinamikai tervezési és kísérleti eljárás, a szélcsatornában végzett méretarányos modellkísérlet mérési eredményei és a valóságban mért adatok között. Ezúton igazolni vagy adott esetben megkérdőjelezni a szélcsatornás vizsgálatok fontosságát, illetve eltérések esetén megtalálni azokat a tényezőket, amelyekkel a tervezési eljárás nem vagy nem megfelelő modellezési pontossággal számolt, valamint kideríteni, hogy ezek a hiányosságok vagy adott esetben hibák megoldhatóak e következő kísérletekben.

- b) *A megvalósult kísérleti épület természetes szellőzőrendszere működőképes e és ha igen milyen hatékonysággal?*

- c) *Mely problémák és azok mögött álló ok-okozati összefüggések azonosíthatóak be a kísérleti épület szellőző rendszerében?*

Az épületfelügyeleti és monitoring rendszer adatai alapján a természetes szellőzés használati időtartamát szándékoztam beazonosítani, majd a tornyokban hődrótos anemométer rendszerrel végzett mérésadat gyűjtés eredményeit megvizsgálva a légsebesség értékekből légtérfogat áram számítást elvégezve a légátöblítés mértékét, a légcsereszámot, egyben a szellőzőtoronyok hatékonyságát terveztem meghatározni. Emellett a torony kiáramlási nyílászárók és a homlokzati után áramlási kapuk nyitási módjait és hatékonyságuk mértékét volt szükséges elemezni, értékelni, a felmerülő problémákat és azok okait felderíteni.

d) *Mekkora hatást fejtenek ki a helyi mikroklimatikai adottságok, szélviszonyok a kísérleti épület szellőzésére?*

Az időjárás állomás szélsősebesség és szélirány mérései alapján következtetéseket szándékoztam levonni a beépítési telek mikroklíma jellemzőire, valamint az épület szellőzési működésére, üzemeltetésére kifejtett mikroklimatikus hatásmechanizmusokra.

e) *Milyen általánosítható tudásanyag szűrhető le az eredményekből?*

- *Kifejleszhető a kutatás eredményeként csarnok jellegű épületekben egy általános passzív szellőzési és hűtési rendszer? Lehetséges ehhez egy pl. moduláris épületszerkezetekből álló rendszer megalkotása?*
- *Átültethetőek e tradicionális épületszellőzési és hűtési megoldások modern épületekbe és ha igen milyen módon?*

Az eredmények segítségével szándékomban állt olyan állítások és hipotézisek felállítása, melyekkel mind a konkrét kísérleti épületben, mind általánosságban a fenntartható, energiahatékony és környezetbarát passzív szellőzőrendszerek tervezését, modellezését és használatát korszerűsíteni lehet nagyterű csarnok jellegű épületekben. Egyben választ kerestem arra, hogy a tradicionális épületklimatizálás technológiai átültethetőek e modern épület projektekbe, illetve hogyan illeszthetőek a legújabb energiahatékony építészeti, szerkezeti és gépészeti rendszerekhez. Logikus végső kérdésként merült fel, hogy a vizsgálatok alapján lehetséges-e egy akár moduláris épületszerkezeti rendszermegoldás kidolgozása csarnokjellegű épületekre, mely a természetes szellőzést és hűtést is biztosítani tudja.

f) *Milyen további kutatási feladatok tárulnak fel a konkrét prototípus épületben, illetve általánosságban?*

Tudatos célkitűzés volt a vizsgálatok, a kísérleti eredmények elemzéseiből és kiértékeléséből valamint a következtetésekből adódó további, jövőre irányuló kérdések, kutatási, fejlesztési lehetőségek és igények konkrét megfogalmazása is.

7.3. Eredmények értékelése, következtetések és a felmerült problémák

A mérésadatok vizsgálatát márciustól októberig tartó időintervallumban végeztem, mivel a fűtési üzemidőben a toronykapuk zárva maradnak a légtechnika hővisszanyerésre miatt. Az épületfelügyeleti vezérlő, illetve szabályzó rendszer (BMS, building management system) és

az épület megfigyelő rendszer (MMS, mobile monitoring system) segítségével mérésadatokat gyűjtöttem a szélirányok szerinti szélesebbesség eloszlásáról, óránkénti felbontásban. Ezek alapján megállapítható, hogy a keleti és déli irányok közötti tartományból fújt a mért időintervallum kétharmad részében a szél, mely átlagsebessége alig érte el az 1,3 m/s-os értéket. A kapott értékek elmaradnak a Meteoronorm időjárás mérőállomások adataitól, melyek a szél irányát főként északnyugati irányban határozzák meg nagyobb mértékű eloszlásban, valamint az átlagos szélesebbességet 2-4 m/s között határozzák meg. A természetes szellőzés működtetése április hónapban kezdődött az üzemcsarnokban, mely egészen október hónapig üzemelt. A tavaszi és őszi időszakokban jellemzően a szellőzőtornyok nyílászárói voltak nyitva, miközben a termelőcsarnok homlokzati kapui zárva voltak. A kiértékelés során kiderült, hogy a tornyok légátöblítő képessége nem csökkent, sőt továbbra is ki tudta szolgálni az ipari csarnoktól gyorsan elhasználódó levegőjének 2 h^{-1} értékű cseréjét 30%-os torony nyitásintenzitással, és 6 h^{-1} értékű cseréjét 60%-os torony nyitásintenzitással mellett. Megjegyzendő, hogy a tornyok döntő többségben a 30%-os torony nyílászáró nyitásintenzitással üzemeltek. A nagyon rövid idő intervallumokban (kb. 2-5 perc) üzemelő szomszédos raktárcsarnokból és lépcsőházakból utánáramló indirekt belső légutánpótlás ilyen méretű légátöblítést nem képes utánáramoltatni, ezért felmerült a hipotézis, hogy a megfelelő utánáramlás az épület földalatti, ismeretemen szerint hazánk legnagyobb geotermikus levegő-föld hőcserélő talajkollektorán keresztüláramlik a termelési csarnoktérbe. Ez az alapesetben a mesterséges légtechnika beszívó földcsatornájaként működő, frisslevegőt beszívó és azt kb. 3 m talajmélységben előtemperáló rendszer nem rendelkezik a termelő csarnok terében lévő légcsatorna csatlakozásban zárózsuzszattal, így a földcsatornában keletkező, nyomásesésből adódó légáramlás ellenállást le képesek győzni a földcsatornával ezúton kapcsolatban álló üzemcsarnok szellőzőtornyai, a tornyok kürtőhatásából származó szívóhatás, valamint szél esetén a kürtőhatást erősítő a 'Venturi' - tányérszerkezetek toronytetőkön kialakított alacsonynyomású légterének szívóhatása. Tehát a vizsgált csarnokteret át képes szellőztetni a toronyszellőzőses rendszer a földalatti légcsatornahálózaton keresztül.

A termelőcsarnok nyitott homlokzati kapui mellett történő toronyszellőztetéskor három féle nyitásintenzitás (30%, 60% és 100%) szerint vizsgáltam a tornyok teljesítményét. Ebben az esetben is hogy a tornyok döntő többségében a 30%-os torony nyílászáró nyitásintenzitással üzemeltek, mely időszakban az előző esethez képest kétszeres légcsereszám keletkezett.

Mindkét esetben (zárt homlokzati és nyitott homlokzati kapuk melletti toronyszellőzés) a középű, uralkodó szélirány esetén szélárnyékban elhelyezkedő torony lényegesen alacsonyabb szellőztető teljesítménnyel rendelkezik, mint a szélső tornyok, melyet nagyobb nyitásintenzi-

tással lehet kompenzálni. A kis torony nyitásiintenzitás, a középső „gyenge” torony és a gyakori homlokzati kapuk zárása arra következtet, hogy a tornyok bizonyos mértékben túlméretezettek (tervezés folyamán biztonságra való törekvés).

A mérési eredményeket a szélcsatornában végzett modellkísérlettel is összehasonlítottam. 30%-os torony nyílászáró nyitás mellett az értékek validálták a szélcsatorna modellkísérlet által előrejelzett teljesítményértékeket. Ezek az eredmények megalapozottá teszik a döntést, miszerint az energetikai épülettervezésnek szerves részei legyenek a szélcsatornában végzett kísérleti mérések. 60%-os torony nyílászáró nyitáskor nagyobb különbségek keletkeztek, a tornyok nagyobb átöblítést végeztek a valóságban a tornyok számára legkedvezőbb szélirányokból érkező széláramlás esetében (keleti torony-délkeleti, nyugati torony délnyugati, nyugati szélirányok). Ezek az eltérések a kevesebb számú mérési mintából eredhetnek, ugyanakkor felmerül a hipotézis, mely alapján a toronynyitó nyílászáró geometria áramlásszűkítő formájával gyorsítja a kiáramló légsebességet, növeli a légtérfogat áramot. 100 %-os toronynyitás nagyon ritkán történt, ekkor a kapott értékek korrelálnak a szélcsatornában mértekhez. A következő hipotézis szerint az alacsonyabb szélintenzitás mellett 100%-os toronynyitó üzemeltetés szükséges (épületfelügyelet illetve a manuális beavatkozás növeli a toronynyitást, ha a belső hőmérséklet növekszik, mert az uralkodó alacsony szélintenzitás kisebb üzemcsarnok légátöblítést és így hűtést okoz). Azonban magasabb szélintenzitás mellett 60%-os torony nyitás az optimális (épületfelügyelet illetve a kézi beavatkozás csökkenti a toronynyitást, ha a belső hőmérséklet csökken, mert az uralkodó magas szélintenzitás nagyobb torony átöblítést és hűtést okoz).

Az eredményeket és a hipotéziseket további mérésekkel szükséges ellenőrizni, finomítani.

7.4. Általánosítások

A mérési tapasztalatok alapján általános következtetéseket lehet levonni, mely segíti az ilyen léptékű és arányrendszerű csarnokok szellőzőrendszereinek tervezését. A kutatás rámutat a mikroklíma sajátos viselkedésére a szélviszonyok szempontjából, kihangsúlyozza, hogy az igazán körültekintő tervezés során adott helyspecifikus méréseket kell végezni, a szellőrendszer helyes méretezése és tájolása végett. Ha kizárólag szellőztető célokra akarunk tornyokat tervezni egy csarnokba, akkor egy ilyen arányokkal rendelkező rendszer túlméretezett lesz. További funkció, a tornyok éjszakai szellőző hűtésre való alkalmazásával viszont a nagyobb toronydimenziók indokolhatók. A tornyok elhelyezésénél különösen fontos az egymás közti távolság, egymáshoz viszonyított elhelyezkedés és magasság pontos méretezése és szerkesz-

tése, ezek egymáshoz viszonyított méretei, az úgynevezett „szélárnyékolt szellőzőtorony” telepítés elkerülése végett. A tornyokból kiáramló levegő, illetve a tornyokat körbeáramló levegő tudatosan tervezett, irányított vezetése segítségével optimális toronykonstelláció hozható létre. Jellegzetes szélirányok kialakulása esetén a szellőző tornyok felső szellőzőnyílásait, szélterelő szerkezeteit speciális kialakítással lehet tervezni, érdemes tájolni az optimális irányba a hatékonyabb ki – és beszellőző működés érdekében. Az után áramlási pontok szerkesztése és a nyitásintenzitás finom módon történő szabályozása nagyon fontos az általános, illetve az aktuális szélsébség és széliránytól függő huzathatás kezelhetősége végett.

7.5. A kutatás jövője

A jövőben elsőként továbbra is folytatnám a méréseket, melyek segítségével tisztáznám az eddig felmerült eltéréseket a szélcsatornában mért értékektől. A prototípus épületről elkezdtem készíteni egy CFD modellt, melyet az eddigi mérések alapján kalibrálni lehetséges, majd lehetőség szerint egy olyan szimulációs módszer kifejlesztése a cél, mely akár teljes mértékben pótolni képes a költséges szélcsatornában végzett modellkísérleteket is. A kutatás eredményeit felhasználhatónak tartom egy átfogó tervezési módszer fejlesztésére, mely a kalibrált CFD modell segítségével kitér a szellőző tornyok elhelyezésének geometriájára; az optimális keresztmetszet-magasság arányára; a szélterelő tetők speciális geometriájának meghatározására; a tornyok szükséges számára, szellőző nyílások pozíciójára, méretére. Emellett fejlesztési potenciált rejt magában ipari funkciójú csarnokok gépészeti szellőzőrendszerének helyettesítése utólagosan elhelyezhető szellőzőtorony rendszerrel. Az eredmények rámutatnak arra, hogy a szellőzőrendszerbe érdemes integrálni földalatti a levegőt geotermikus módon előmelegítő, illetve előhűtő légcserélőrendszereket, mely koncepció vizsgálataihoz és optimális kifejlesztéséhez hőtechnikai mérésekre és termikus illetve áramlástani szimulációkra van szükség. A kutatás egyik lehetséges folytatásában a kísérleti épület mobilis komplex mérésadatgyűjtő rendszerének (MMS, mobile monitoring system) köszönhetően a szellőzőrendszerek energetikai vonatkozását is lehetséges és érdemes kivizsgálni. Hogy számszerűsítve mennyi idő alatt képesek a passzív toronyszellőző rendszerek lehűteni és milyen mértékben a térhatároló és egyéb hőtároló épületszerkezeteket, illetve azok milyen gyorsan melegednek újra: hiánypótló jelleggel, a mért eredmények segítségével egyszerűsített képlet és összefüggésrendszer hozható létre a passzív hűtőhatású szellőzés és a hőtároló tömegek kapcsolatáról, energetikai vonzatatról.

8. Kitekintés

8.1 CFD modellvalidáció

A kutatással párhuzamosan már elkezdtem egy numerikus áramlástan modell CFD (computational fluid dynamics) szimuláció sorozat modellező előkészítő munkáit. A CFD modell kialakítása és a rajta elvégzendő szimulációs tesztek eredményeivel egyrészt nagymennyiségű tapasztalatot nyerhetek a számítógépes modellezés megvalósítása során felmerülő problémák kezelésében, másrészt lehetőségek tárulnak fel a CFD szimulációk és a szélcsatornában végzett kísérletek közötti különbségek beazonosítására, hangsúlyosságának mérlegelésére és az eltérések ok-okozati összefüggéseinek feltárására, kiküszöbölésére a valós eredmények függvényében.

A valós épületen mért adatok alapján a modellezési beállítások igazításával, megfelelő felületi és végelem térháló megépítésével, alkalmas turbulenciamodellek megválasztásával a valós prototípus épületben mért eredmények értékeivel, görbéivel konvergens CFD elméleti modell eredményeket, úgynevezett kalibrált „hitelesített” modellt kaphatunk. Hosszútávon lehetőséget nyílik egy olyan hatékony CFD szimulációs tervezési módszer kidolgozására, mely alkalmazása olyan megbízható eredményeket nyújt, hogy a költséges szélcsatornában végzett méréseket elhagyhatjuk a tervezési folyamatból.

8.2 Komplex szellőzési rendszer tervezési módszerének kidolgozása

A konkrét eredményekre támaszkodva egy „kalibrált” numerikus áramlástan CFD modell megalkotásával hasonló geometriai arányú csarnoképületek olyan toronytipológiáját lehetséges kifejleszteni, mely az aerodinamikailag magas áramlási hatékonyság (energiahatékonyság) és a megfelelő komfortszínvonal optimalizált arányát biztosítja. A valós mérésekkel kalibrált CFD modellen különböző kísérleteket szándékozom végezni:

- A toronykeresztmetszetek és magasságaik változtatásával a tornyok optimális paraméterekkel történő működését (légátöblítés, huzathatás, vízszintes hőmérséklet eloszlás, függőleges hőmérséklet grádiensek) lehetséges a CFD szimulációkban kifejleszteni. A tudásbázis általánosítható hasonló geometriai karakterrel, arányokkal rendelkező (könnyű) ipari épületekre.

- Érdemes kísérletezni a tornyok elhelyezésének variálásával egymáshoz képest, kiszámítani az ideális távolságokat, melyek következtében a szél a teljes melegebb, passzív szellőzésre alkalmas évben, minden tornyot maximális teljesítménnyel képes működtetni, különös tekintettel a tájolás szerinti szélexponált széltorony helyzetek kialakítására.
- A tornyok magasságának egymáshoz képest történő igazításával, megváltoztatásával felvetődik a lehetőség egymástól vagy szomszédos épületektől, építményektől szélárnyékolt tornyok teljesítményét javítani. A szomszédos tornyok vagy épületrészek által modifikált légáramlatok karakterére (megváltozott különböző nyomás és szívóhatással rendelkező áramlási zónákra) reagálni lehet a szomszédos tornyon, épületrészen áthaladó szelek irányított kiáramoltatásával vagy a torony, épületrész körbeáramoltatásával újra lehet hasznosítani a széláramlatok energiáit a következő, eddig szélárnyékolt torony intenzív légátöblítő szellőzéséhez.
- Toronynyílások záró mechanizmusainak, és szélterelő szerkezeteinek a fejlesztésében is nagy potenciál rejlik, mivel az év jelentős részében uralkodó szélirányok esetében például domináns szélirány alapján tervezhetőek a szélterelő nyílások speciális szerkezetei, különböző alacsony és magas nyomású zónák kialakításával, a légbeengedő és légkiengedő nyílások variációjaival.
- Fejlesztési potenciál rejlik a nagy teljesítményű tornyok alapján, olyan már megépült ipari csarnokok felújítására, ahol különösen nagy hőterhek képződnek a belső térben, vagy a gyártási technológiai folyamatok során rendkívül gyorsan használódik el a levegő. Ezen ipari létesítményekben nagymértékű energiamegtakarítást lehetne elérni, ha akár utólagosan is elhelyezhető torony jellegű, illetve szélgyorsító felépítményekkel a gépészeti megoldásokat kiváltanánk, egyben a munkahelyek komfortkörnyezetét az épületbelsőben javítanánk.
- A huzathatás elkerülése illetve kontrolálható létrehozása érdekében az utánáramlási pontok elhelyezésére, méretére és számára az áramlástani szimulációs modell segítségével kidolgozható egy általánosítható tervezési koncepció. Lehetőség van a sok kis keresztmetszetű és a nagy egybefüggő beszellőzési pontok közötti ideális arányok kikísérletezésére.

8.3 Komplex szellőzési rendszer moduláris épületszerkezeti rendszerének kidolgozása

A fentiekben említett és részletezett passzív épületszellőzési rendszer épületszerkezeteinek szerkezeti megtervezése, egy moduláris épületszerkezeti rendszer kidolgozása, lehetővé teszi

a megoldás rugalmas, de gazdaságos alkalmazhatóságát különböző új és felújítandó, fejlesztendő csarnokjellegű épületek esetében.

8.4 Felesleges légtérfogat áramok kezelése, hasznosítása

A tornyok magas légátöblítő teljesítménye plusz alkalmazási lehetőségeket rejt magában. Követhető az a koncepció, mely egy fojtó szerkezet beépítésével redukálja a légtérfogat áramot a tornyokban. Ezt például egy megfelelően kialakított szélturbina segítségével is meg lehet valósítani. A tornyokban függőleges tengelyű szélkerekek elhelyezésével a szélturbinák fojtóhatást képesek kifejteni a nagy sebességű csarnok belső légáramlására, mellyel a huzathatás is csökkenthető és a komfortszint is megnövelhető. Továbbá éjszakai intenzív átszellőztetés esetén a nappalinál nagyobb nyitásintenzitás függvényében akár teljes (100%) toronynyitások mellett lehetséges a légátöblítés a csarnokban és a tornyokban, miáltal a turbina a villamos energiát termelhetné, és azt a költségesebb nappali áram helyett tudná az épület felhasználni, például éjszakai termo aktív fűdém szerkezetek (hőtároló tömeg) előhűtésével, illetve a HMV (használati melegvíz) előtermelésével a következő munkanap igényéhez szabva. Ezúton a tornyokban energiafelhasználás szempontjából ígéretes tulajdonságú áramtermelést biztosító szélkerék szerkezet kísérletezhető ki, figyelembe véve azt is, hogy az éjszakai szellőzés hűtőhatása még érvényesüljön, illetve egy megfelelő kompromisszumot kapjunk a rendszerek között.

Ahhoz, hogy a felvázolt hipotézis és további vizsgálatok megbízható, sikeres eredményeket és következtetéseket tegyenek lehetővé elengedhetetlen, hogy a mérésadatgyűjtés folytatódjon, és ezúton még nagyobb mennyiségű adatbázis alapján lehessen továbbdolgozni. A kutatás folytatásaként pedig egy a fentiekben leírt fojtó-áramtermelő rendszer tervezését és modellezését lehetne végigvinni, további tudományágak bevonásával is.

8.5 Földalatti utánáramlási rendszerek kifejlesztése

A földalatti légcsatorna hálózat lehetséges szerepvállalása a szellőzésben arra ad lehetőséget, hogy az elkövetkező tervezések során, célirányosan építsünk ki ilyen jellegű szellőzőrendszereket. A kialakítási módok lehetőségeinek mérlegelésére és a földalatti szakaszok összetettségének és optimális hosszának meghatározására új tervezési tipológiát lehet kialakítani a már említett, validált CFD szimulációk futtatásával és elemzésével. Fontos figyelembe venni,

hogy a CFD modellbe a kiépült valós talajkollektor földcsatornát is integrálni kell, hogy a talajkollektor csatorna mérésekkel (hőmérséklet, légsebesség) és az épület mérései segítségével igazolt elméleti áramlástanit modellt kapjunk.

8.6 Passzív szellőzés technika hűtőhatásának meghatározása és tervezése

Az MMS, épület megfigyelő rendszer méri a léghőmérséleteket, felületi hőmérséleteket, sugárzási hőmérsékletet, relatív páratartalmat, aktív mennyezet és padlólátési gépészeti előremenő és visszajövő hőmérséleteket, az aktív illetve passzív hűszivattyú villamos energiafogyasztást és üzemidőket, hőmennyiségeket, valamint a légsebességeket és a levegő CO₂-tartalmát a kísérleti épületben. Ez az adatbázis lehetővé tesz egy egyszerűsített képlet és összefüggés rendszer kialakítását, mellyel általános számításokat végezhetünk az átszellőztetett légköbméter áram és a lehűtött határoló szerkezetek hűtőroló tömege közötti viszonyokkal kapcsolatban, a szellőzés intenzitás hűtőhatásának meghatározásához, energetikai vonzataihoz. Egy ilyen képlet alkalmazása megkönnyítené a passzív (éjszakai) szellőzéssel történő szerkezet temperálás módszerének szakszerű és pontos tervezését, az épületenergetikai és épületfizikai szabványokban való integrálását és alkalmazását.

8.7 Légsebesség komfortmérések a termelőcsarnokban

Három további anemométer segítségével 2015 elejétől lehetőség nyílik légsebesség komfortmérésekre a kísérleti épület üzemcsarnokában, különböző stratégiai fontosságú helyeken. A tornyok alsó nyílása alatt, illetve a csarnokban dolgozók munkahely állomásai mentén tervezett mérésekkel a huzathatás regulálását lehetséges nagyobb felbontásban vizsgálni, és a toronyszellőzés mértékét, használatát fejleszteni megfelelő épületbelső légsebesség komfortszint kialakítása mellett. Ezen kívül ezek az eredmények a tornyok és a homlokzat geometriáját és nyílásának paramétereit, a tornyok elhelyezéseit is befolyásolhatják.

9. Szakirodalmi hivatkozások

- [1] Gerhard Hausladen, Petra Lidl, Mike de Saldanha: Building to Suit the Climate – A Handbook, 2012, Birkhäuser, Basel, 7-16.pp., ISBN 978-3-0346-0728-5
- [2] Gunter Pültz: Bauklimatischer Entwurf für moderne Glasarchitektur, 2002, Ernst & Sohn, Berlin 11 p., ISBN 3-433-02841-9
- [3] Kistelegdi István: Pluszenergia potenciál egy ipari és irodaépületben, 2013, Pécsi Tudományegyetem, Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar, Energiadesign Tanszék, ISBN 978-963-7298-50-9
- [4] Ben Richard Hughes, John Kaiser Calautit, Saud Abdul Ghani: The development of commercial wind towers for natural ventilation: A review, 2011, Applied Energy 92 (2012) 606-627, Elsevier Ltd. 623 p., doi:10.1016/j.apenergy.2011.11.066
- [5] Ken Yeang: Ecodesign – A Manual for Ecological Design, 2006, Wiley, Hoboken, USA, 221-219 pp.
- [6] Arie Bitan (Ed.): Climate-Building-Housing, Proceedings of the third International Symposium on „Climate- Building-Housing, University of Karlsruhe, 1986, Elsevier Sequoia S.A., Lausanne, 33-39 pp., 149-156 pp., ISBN 0-444-75069-X
- [7] Naghman Khan, Yuehong Su, Saffa B. Riffat: A review on wind driven ventilation techniques, 2008 Energy and Buildings 40 (2008) 1586-1604 pp., doi:10.1016/j.enbuild.2008.02.015
- [8] Ben Richard Hughes, Hassam Nasarullah Chaudhry, Saud Abdul Ghani: A review of sustainable cooling technologies in buildings, 2011, Renewable and sustainable Energy Reviews 15 (2012) 3112-3120 pp., doi:10.1016/j.rser.2011.03.032
- [9] Klaus Daniels: Technologie des ökologischen Bauens, 1995, Birkhäuser, Basel, 65-121 pp., ISBN 3-7643-5229-9
- [10] Ben Richard Hughes, Mak Cheuk-Ming: A study of wind and buoyancy driven flows through commercial wind towers, 2011, Energy and Buildings 43 (2011) 1784-1791 pp., doi:10.1016/j.enbuild.2011.03.022

- [11] Benjamin M. Jones, Ray Kirby: Quantifying the performance of a top-down natural ventilation Windcatcher™, 2009, Building and Environment 44 (2009) 1925-1934 pp., doi:10.1016/j.buildenv.2009.01.004
- [12] H. Montazeri, F. Montazeri, R. Azizian, S. Mostafavi: Two-sided wind catcher performance evaluation using experimental, numerical and analytical modeling, 2010, Renewable Energy (2010) 1424-1435 pp., doi:10.1016/j.renene.2009.12.003
- [13] Shichao Liu, C.M. Mak, JianLei Niu: Numerical evaluation of louver configuration and ventilation strategies for the windcatcher system, 2011, Building and Environment 46 (2011) 1600-1616 pp., doi:10.1016/j.buildenv.2011.01.025
- [14] M.N. Bahadori, M. Mazidi, A.R. Dehghani: Experimental investigation of new designs of wind towers, 2008, Renewable Energy 33 (2008) 2273-2281 pp., doi:10.1016/j.renene.2007.12.018
- [15] Sophia und Stefan Behling: Sol Power – Die Evolution der solaren Architektur, 1996, Prestel, München, New York, 64-65 pp. ISBN 3-7913-1651-6
- [16] Thomas Herzog (Ed.): die Halle 26 für die Deutsche Messe AG Hannover, 1996, Prestel, München, New York, 29 p., ISBN 3-7913-1741-5
- [17] Klaus Daniels, Ralph E. Hammann: Energy Design for Tomorrow, 2009, Axel Menges, Stuttgart, 216-217 pp., ISBN 978-3-936681-25-3
- [18] http://news.bbc.co.uk/local/leicester/hi/people_and_places/history/newsid_8937000/8937396.
- [19] www.wales.gov.uk/assemblybuilding/development/keyfeaturesflash.htm.
- [20] Richard Rogers + Architects – From the House to the City, 2010, Fiell, 136-141 pp., ISBN 978-1-906863-11-1
- [21] Kristin Feireiss, Lukas Feireiss (Eds.): Architecture of Change, Gestalten, 86-91 pp., ISBN 978-3-89955-211-9
- [22] http://www.archdaily.com/395131/ch2-melbourne-city-council-house-2-designinc/51cc7249b3fc4b214200007d_ch2-melbourne-city-council-house-2-designinc_23_bioclimatic_section_night_-_designinc-png/
- [23] Philip Jodidio: PIANO – Renzo Piano Building Workshop 1966 to today, 2008, Taschen, Köln, 270-291 pp., ISBN 978-3-8365-0322-8
- [24] Dirk u. Hindrichs, Klaus Daniels (Eds.): plusminus 20°/40° latitude – Sustainable building design in tropical and subtropical regions, 2007, Axel Menges Stuttgart, London, 442-445 p., ISBN 978-3-930698-83-7

- [25] Kristin Feireiss, Lukas Feireiss (Eds.): Architecture of Change 2, Gestalten, 128-135 pp., ISBN 978-3-89955-263-8
- [26] <http://inhabitat.com/xeritown-new-sustainable-urban-complex-for-dubailand/>
- [27] Masdar City, Klimagerechte Planung (Masdar város, klímatudatos tervezés), 2010, ARCH+ 196/197, Arch+, Aachen, 46-51 pp.
- [28] <http://it.detail-online.com/architettura/temi/istituto-masdar-ndash-cellula-geminale-di-una-visione-urbana-008283.html>
- [29] A kísérleti épület generáltervezője: Kistelegdi 2008 Kft. Pécs
- [30] István Kistelegdi: Roadmap für einen Climadesign Entwurf, 2010, Master's Thesis, ClimaDesign Mesterképzés Diplomamunka, nem publikált
- [31] István Kistelegdi, István Háber: Gebäudeaerodynamische Untersuchungen einer Plusenergie-Produktionsstätte mit passiven Lüftungstürmen in Sikonda (Südungarn), 2012, Bauphysik 34 (2012), Heft 3, Ernst & Sohn, Berlin, 107-120 pp.
- [32] István Kistelegdi, Bálint Baranyai: Windkanaluntersuchungen zwecks Qualifizierung und Validierung der Wirkung von Windinduktion und thermischen Auftriebskräften auf die natürliche Lüftung eines industriellen Innovationszentrums, 2012, Bauphysik, 34 (2012), Heft 5, Ernst & Sohn, Berlin, 229-237 pp.
- [33] Kistelegdi István: Plusenergia potenciál egy ipari és irodaépületben, Ph.D értekezés téziszfüzete, 2013, Pécsi Tudományegyetem, Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar, Energiadesign Tanszék és Breuer Marcel Doktori Iskola
- [34] A Pécsi Tudományegyetem, Pollack Mihály Műszaki és Informatikai Kar, Energiadesign Tanszék fotóarchívuma: fotók a szélcsatorna vizsgálatokról, Dr. Theurer Áramlástan Intézetében, Hahnhofen, Németország.
- [35] A Rati Kft. ipari és irodaépülete, kiviteli tervdokumentáció, generáltervező Kistelegdi 2008 Kft. Pécs, épületgépészeti tervfejezet H & V Bt. Pécs, Szellőzés Awadukt rendszer terv, méretezéssel
- [36] Bálint Baranyai, István Kistelegdi: Energy Management Monitoring and Control of public Buildings, 2014, Pollack Periodica Vol. 9, No. 2, Akadémiai Kiadó, Budapest, 77–88 pp.
- [37] Bellot, G. C. (1976), Hot-wire anemometry, Annual Reviews of Fluid Mechanics, 209–231 pp.
- [38] Lothar Dietze: Frei Lüftung von Industriegebäuden, 1987, VEB, Berlin, 79-84 pp., ISBN 3-345-00178-0

[39] Berhard Bauhofer, Gesellschaft für Aerophysik GmbH: Windkanalstudie (Szélcsatorna tanulmány), Rati Kft., Komló, 2011, 29 p.

[40] MMS, mobile monitorin system. A PTE, PMMIK, Energiadesign Tanszék mobilis épületmonitoring mérésadatgyűjtő rendszere, - folyamatban lévő kutatási program keretében, jelenleg a Rati Kft. kísérleti ipari és irodaépületében elhelyezve és beüzemelve.

[41] Lásd jelen OTDK dolgozat „3. A kutatás célja” fejezetét: Az eredetileg kiépített PV napelemes rendszer megvalósításával érhető el a pluszenergia mérleg a komlói kísérleti épületben.

[42] http://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/altalanos_eghajlati_jellemzes/szel/