

BUDAPESTI MŰSZAKI és GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
TUDOMÁNYOS DIÁK KONFERENCIA
2013.



ÉPÍTÉSZET ÉS ENERGIA: A KÜRTŐHATÁS

BME TDK 2013.



BAGI ALEXANDRA (QJQLYD) - ÉPK

SZEDLÁK BARNABÁS (SFOYHQ) - VIK



KONZULENSEK:

HRABOVSKY-HORVÁTH SÁRA - ÉPK

DR. KISS PÉTER - VIK

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Tudományos Diákköri Konferencia
2013.

Építészet és energia: A kürtőhatás

Bagi Alexandra

Szedlák Barnabás

Köszönet konzulenseinknek:

Hrabovszky-Horváth Sárának és Dr. Kiss Péternek,
valamit

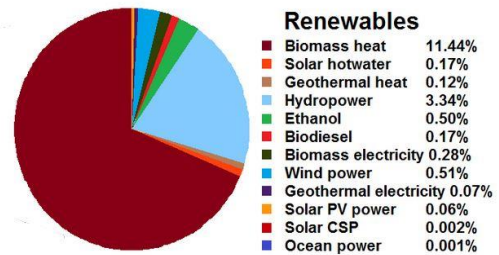
Németh Lőrincnek,
munkánkban való segítségükért.

Tartalomjegyzék

1.	Bevezetés	3
2.	A kürtőhatás ismertetése.....	5
a.	A meleg levegő mindig felszál?	5
b.	Energiatermelés a kéményhatással	6
3.	Építészet.....	9
a.	Bevezetés	9
b.	Történeti fejlődés.....	9
c.	Aktuális trendek	10
i.	Természetes „kürtő-szellőztetés” stratégia.....	10
ii.	Fejlettebb kürtőszellőztetési stratégiák	12
iii.	Ventillátorral gerjesztett kürtőszellőztetés	13
d.	A jövő lehetőségei.....	15
4.	A kürtőhatás vizsgálata	16
a.	A jelenség leírása.....	16
b.	Az ideális eset.....	19
c.	1. épülettípus, ablakkal rendelkező lépcsőház	24
d.	2. épülettípus, ablakkal nem rendelkező lépcsőház	26
e.	Valós példa	27
5.	Konklúzió	30
a.	Összegzés	30
b.	Kitekintés.....	31
6.	Forrásjegyzék	33

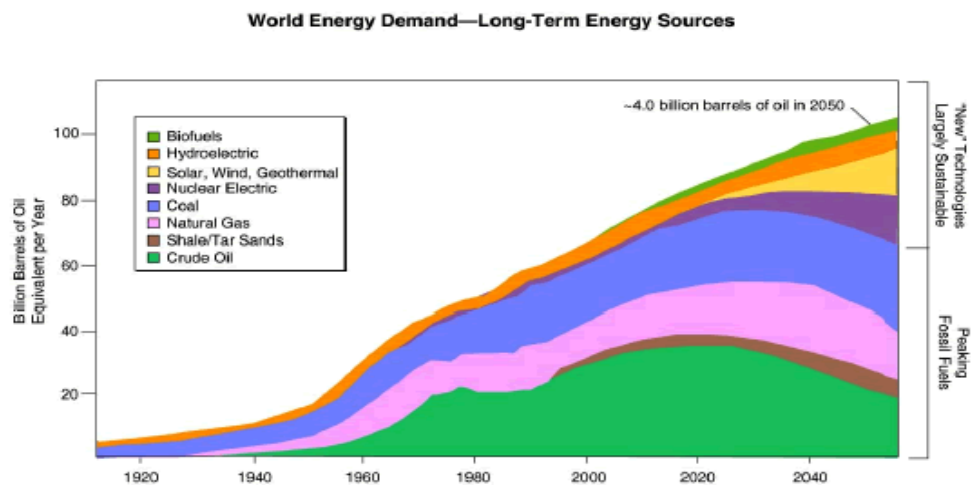
1. Bevezetés

Világunkban folyamatosan nő az igény az energia iránt, amely a hagyományos, fosszilis energiaforrások árának növekedését, végső soron pedig kimerülését eredményezi. Éppen ezért egyre inkább előtérbe kerülnek a megújuló energiaforrások. A nap- illetve szélenergia világszerte elterjedtek, azonban még mindig csak egy csekély részét adják az energiatermelésünknek, ráadásul a költségeik is magasak. A víz, illetve geotermikus energia helyhez kötött, nem mindenhol elérhető energiaforrás. A szél energiához elengedhetetlen a viszonylag magas és állandó szélesség. A napelemek működését pedig alapvetően a napsugárzás intenzitása határozza meg, ami a Föld különböző helyein más és más. Mindezek ellenére ezek jelentik a jövőt, térhódításuk rohamosan növekedni fog.



1-1. ábra: Megújuló energiák felhasználási aránya [14]

Munkánk során a kürtőhatáson alapuló energiatermelés lehetőségeit vizsgáltuk meg. Ahogy a megújuló energiaforrások többsége, ez is a naptól nyeri energiáját, és lényegét azon egyszerű fizikai elv határozza meg, hogy a levegőben hőmérséklet különbség hatására nyomás különbség alakul ki, amely légmozgást eredményez. Sokszor hallani a kifejezést, hogy a meleg levegő felfelé száll. Ez részben igaz is, a későbbiekben erre részletesen kitérünk, mindenesetre jól jellemzi magát a jelenségekört. Már az ősi idők óta kihasználták a levegőnek ezt a tulajdonságát például a kéményekben, de akár házak szellőztetésére is. Sajnos a modern korban, az energiabőségnek köszönhetően az emberiség elkezdett pazarlóan bánni az energiával. Innen kaptuk az ötletet, hiszen az épületek egy város összes energiafogyasztásának közel feléért felelősek. Úgy gondoltuk, szükséges megvizsgálni van-e valamilyen lehetőség arra, hogy valamennyit hasznosítsunk, illetve visszaforgassunk ebből oly módon, hogy ezt megpróbáljunk magával az épülettel megvalósítani.



Sources: Lynn Orr, *Changing the World's Energy Systems*, Stanford University Global Climate & Energy Project (after John Edwards, American Association of Petroleum Geologists); SRI Consulting.

1-2. ábra: A világ várható energiaigénye és fajtái [15]

Először bemutatjuk, hogy általánosan hogyan működik a kürtőhatás, azt milyen tényezők befolyásolják. Ez után egy ilyen elven működő, a valóságban is létező erőművet hoztunk fel példának. Habár még csak egy prototípus, mégis előrevetíti a technológiában rejlő lehetőségeket. A dolgozat írása közben számos olyan cikkbe botlottunk, melyben arról írtak, hogy a világ különböző pontjain tervezik hasonló erőmű felépítését. Ez egyértelműen azt mutatja, hogy egy hatékony, megbízható technológiáról beszélhetünk.

A következő fejezet a jelenség hétköznapi felhasználását elemzi építészeti szempontból. Visszatekint, és az ókortól kezdve sorra veszi a kürtőhatás felhasználását és fejlődését. A manapság használatos trendeket rendszerezi továbbá felvázolja a technológiában rejlő lehetőségeket.

Ezt követően megpróbáltuk részletesebben bemutatni a kürtőhatást a semleges szint fogalmának bevezetésével. Leírtuk az energiatermeléshez alkalmazható egyenleteket, illetve azok változóit, majd egy Matlab szimuláció keretében bemutattuk egy téli és egy nyári nap alatt kialakuló légáramlást. Két különböző épülettípust figyelembe véve megvizsgáltuk, hogyan változtatják meg az áramlási képet a különböző nyílás zárók. Végül ismét egy valós példát mutattunk be, ami két Dél-Koreai épület nyomásviszonyait ábrázolja számos helyszíni mérés, illetve szimuláció együttes alkalmazásának eredményeképpen.

Munkánkat konklúzióval zártuk, ahol értékeltük eredményeinket és javaslatokat fogalmaztunk meg a további kutatásokra a témával kapcsolatban.

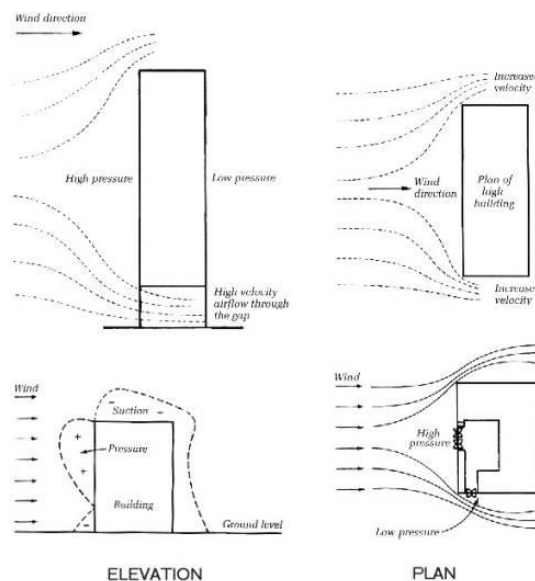
2. A kürtőhatás ismertetése

Ahhoz, hogy a levegő átjárjon egy épületet, nyomáskülönbségre van szükség az épületen belüli illetve kívüli légtömeg között. Ez a nyomáskülönbség többféle képen jöhet létre:

- szél miatt (szél effektus),
- hőmérsékletkülönbség következtében bekövetkező sűrűség különbség miatt (kéményhatás vagy kürtőhatás),
- a kettő kombinációja.

A szél miatt létrejövő nyomáskülönbség hatását nem vizsgáltuk a munkánk során, azonban érdemes megfigyelni a 2-1. ábrát. Ezen jól látszik, hogy szél hatására az épület tetejénél alacsony nyomású légtömeg jön létre. Ez szívó hatást eredményez az épület felett.

Az általunk vizsgált jelenségkör a kéményhatás elvén alapszik. Ennek megértéséhez először vizsgáljuk meg, hogyan viselkedik a levegő különböző hőmérsékleteken. [5]



2-1. ábra: Szél hatása az épületre [5]

a. A meleg levegő mindig felszáll?

Sokszor hallott bölcsesség, hogy a meleg levegő felfele mozog. Ez teljes mértékben igaz. Azonban kevesen tudják, hogy a meleg levegő nem csak felszállhat, de lefele sőt akár még oldalirányban is mozoghat. Mozgását a termodinamika egyenleti írják le, melyek szerint a hő a nagyobb hőmérsékletű helyről a kisebb hőmérsékletű hely felé halad. Tehát a hőmérsékletkülönbség az, ami meghatározza a meleg levegő útját.

Gázok esetében figyelembe kell venni a nyomást és a felhajtó erőt a jelenség megértéséhez. Amikor felmelegítjük a levegőt, például lakásunk felfűtésével, annak molekulái gyorsabb mozgásba jönnek, jobban eltávolodnak egymástól, ezáltal alacsony nyomást hoznak létre. Ha ezt egy nagyobb nyomású légtömeg veszi körül, akkor a nyomáskülönbség miatt az alacsony légnyomású levegő felszáll, és a helyére a magas légnyomású kerül. Ezen az elven működnek például a hőlégballonok. A ballon belsejében lévő meleg, ezért alacsony nyomású így a levegő felemelkedik, és magával viszi az egész szerkezetet. Habár hőmérséklet különbséget mondunk, valójában a nyomáskülönbség az, ami működteti a folyamatot. Ez a jelenség az épületekben is lejátszódik, révén, hogy semelyik épület sem tökéletesen légmentesen zárt. A réseken, repedéseken keresztül a levegő képes ki- bejárni, és így a folyamat magától elindul. [2]

A két legfontosabb befolyásoló tényező:

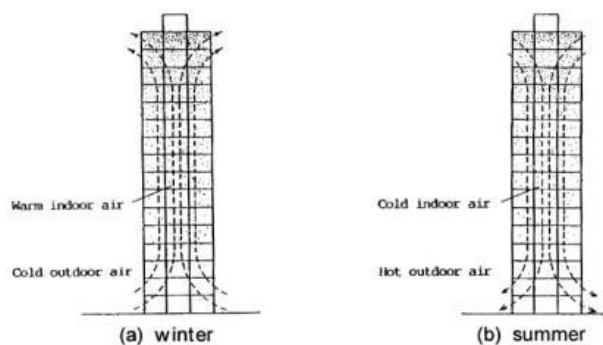
- hőmérséklet különbség a kinti és benti levegő között (tehát a nyomáskülönbség),
- az épület magassága.

Révén, hogy a hőmérsékletkülönbség az egyik befolyásoló tényező, vizsgáljunk meg két szélsőséges állapotot.

Télen a házak belsejében meleg, alacsony légnyomású levegő található, míg kint hideg nagy nyomású levegő van. A hőmérsékletkülönbség következtében vertikális légáramlás indul meg a legkisebb ellenállású útvonal mentén. A folyamat vázlatos leírása:

- a belső hőmérséklet magasabb, mint a külső,
- a melegebb levegő az épületen belül felszáll,
- ez alacsony légnyomást eredményez az épület alján,
- magasabb légnyomás keletkezik az épület tetején,
- a tetőn „kiszökik” a melegebb levegő,
- az épület alján pedig hideg levegő „szökik be”.

Nyáron ennek pont a fordítottja játszódik le. A hideg, lehetőleg légkondicionált levegő a ház belsejében magasabb nyomású, így alul kiszivárog a házból, míg helyére felülről meleg levegő érkezik. Ezek a jelenségek egyértelműen következnek a termodinamika törvényiből. [5]



2-2. ábra: A kürtőhatás [5]

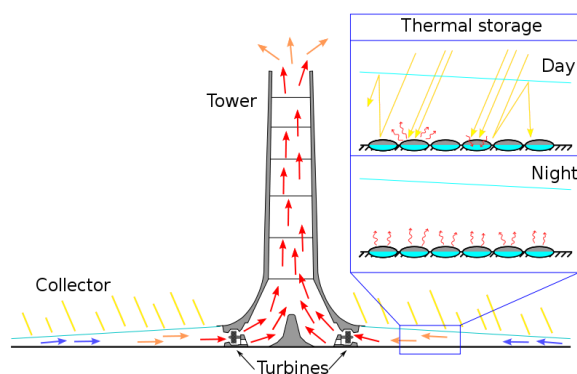
b. Energiatermelés a kéményhatással

A kéményhatással történő energiatermelés egy létező technológia. Az ilyen elven működő erőműveket *Solar Updraft Tower* (SOT), azaz „Légáramlat tornyok” -nak nevezik. Vizsgáljuk meg, ezek hogyan működnek.

A rendszer a nap energiáját alakítja át, amit jelölünk $\dot{Q}$ -val, és nevezzük bemenetnek. Ez nem más mint a G_h , globális horizontális sugárzás, és az A_{coll} , kollektor felület szorzata.

$$\dot{Q} = G_h \cdot A_{coll}, \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (1)$$

A torony, vagy kémény belsejében alakul mozgási energiává a levegő nyomáskülönbsége. Ezt azt jelenti, hogy a torony belsejében a légmozgás, mint egy felfelé irányuló erővektor jelenik meg. A Δp nyomáskülönbség a torony alja és teteje között:



2-3. ábra: Erőművi alkalmazás [3]

$$\Delta p = g \cdot \int_0^{h_{torony}} (\rho_k - \rho_{torony}) \cdot dh, [N/m^2] \quad (2)$$

Ebből egyértelműen látszik, hogy a Δp növekszik a torony magasságával. A SUT esetében az energiát egy turbinával meghajtott generátor biztosítja. Ezért a Δp teljes nyomáskülönbséget ketté kell választani $\Delta p_s + \Delta p_d$ komponensekre. A statikus nyomáskülönbség a turbinán esik, míg a dinamikus jellemzi a levegő kinetikus energiáját.

Amennyiben nem vesszük figyelembe a turbinát, a maximális légáramlási sebességet, vagy egyszerűbben szélsősebességet úgy kapjuk meg, ha feltételezzük, hogy a teljes nyomáskülönbség a levegőt gyorsítja, és eltekintünk a súrlódási veszteségtől. Így a toronyban lévő teljes energia megegyezik a levegő mozgási energiájával.

$$P_{teljes} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v_{torony,max}^2, [W] \quad (3)$$

ahol: $v_{torony,max}$ a maximális sebesség [m/s], $\dot{m}$ pedig a tömegáramlás [kg/s].

A Boussinesq-közelítést felhasználva kifejezhetjük a levegő sebességét:

$$v_{torony,max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_{torony} \cdot \frac{\Delta T}{T_0}}, [m/s] \quad (4)$$

ahol: g a nehézségi gyorsulás, értéke 9.81 m/s^2 , ΔT a hőmérsékletkülönbség a külső és belső levegő között, T_0 a hőmérséklet a torony alján, Kelvinben.

A torony hatásfoka így kifejezhető a következőképpen:

$$\eta_{torony} = \frac{g \cdot h}{c_p \cdot T_0} \quad (5)$$

Ez az egyenlet azért hasznos számunkra, mert megmutatja, hogy a torony hatásfoka alapvetően a magasságtól függ. Minden egyéb paraméter, a beeső fény energiáját illetve a kollektor területet (tehát a Q bemenetet) a c_p változó rejt, melynek mértékegysége $[J/kg \cdot K]$. 1000 méteres magasság esetén az elméleti és a valóságos eredmény közötti letérés, a Boussinesq közelítés következtében, eltűnik. A rendszer kimenete arányos a kollektor területtel és a torony magasságával. Ez azt jelenti, hogy ugyan azt az eredményt kapjuk, ha nagyobb kollektor területünk van egy alacsonyabb toronnyal, illetve ha kisebb terület egy magasabbal. Természetesen ez az ideális esetben igaz, a növekvő kollektor területtel figyelembe kell venni a megnövekedett súrlódást a talaj és a levegő között.



2-4. ábra: Erőmű Manzanaresben [3]

Az első és máig az egyetlen SUT erőművet 1982-ben építették Manzanaresben, Spanyolországban. Ennek fontosabb részleteit az 1. táblázat mutatja be.

Torony magasság	194.6 m
Torony átmérő	5.08 m
Átlagos kollektor átmérő	122.0 m
Átlagos kollektor (tető) magasság	1.85 m
Turbina lapát szám	4
Működési módok	szigetüzem és hálózati üzem
Átlagos hőmérsékletváltozás a kollektor alatt	20 K
Névleges kimeneti teljesítmény	50 kW
Műanyag kollektor felület	40 000 m ²
Üveg kollektor felület	6 000 m ²

1. táblázat: SUT erőmű Manzanaresben [6]

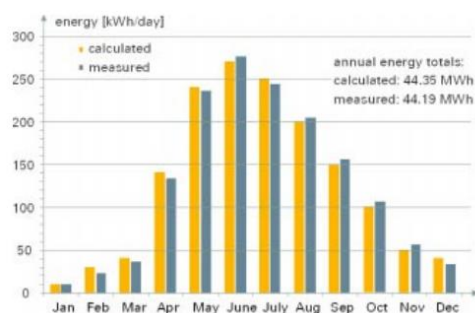
A torony egy 10 m magas gyűrűn áll, melyet 8 vékony oszlop tart. Így a levegő útja a kollektorból a torony felé zavartalan. A turbina független a toronytól, egy 9 m magas acél állványzaton található. 4 lapáttal rendelkezik, melyeknek a dőlésszöge állítható hogy mindig az optimumon működjenek a légnyomás függvényében. 2.5 m/s szélességnél indulnak, és maximum 12 m/s sebességig működnek.



2-5. ábra: 4 lapátos turbina [6]

A kollektor területet beborító kollektor tetőnek megfelelő szilárdságúnak és kimondottan ellenállóknak kell lennie az időjárás viszontagságaival szemben. Emellett fontos tényező az ára is. A SUT nagy előnye a többi megújuló energiát hasznosító erőművel szemben, hogy rendkívül low-tech technológia, fejlett iparra nem rendelkező országokban is könnyen megépíthető. Éppen ezért több anyagot is kipróbáltak. Ezek közül az üveg, és a műanyag tető bizonyult a legjobbnak. Az üveg azért hasznos, mert durvább viharok esetén se sérül meg, emellett az esőzések alkalmával öntisztuló. A műanyag tető ezzel szemben olcsó, azonban oda kell figyelni hő és UV állóságra.

Az építést követő években számos mérést végeztek az erőművön, melyek igazolták az előzetes számításokat. Ahogy a szélesség elérte a minimumot a turbina automatikusan működésbe lépett, és az erőmű rákapcsolódott az elektromos hálózatra. Egy 32 hónapos időszakban átlagosan napi 8.9 órát üzemelt. 1987-ben 3067 órában volt 150 W/m²-nél magasabb a napsugárzás értéke. Az erőmű összességében ebben az évben 3157 órát üzemelt hálózatra kötve, melyből 244 óra éjszaka volt. Az eredmények alapján kijelenthető, hogy a rendszer és az összes komponense megbízható, alkalmas a megújuló energiatermelésre. [1][6]



2-6. ábra: Erőmű éves termelési profilja [6]

3. Építészet

Az emberek régóta felhasználják a kürtőhatás előnyeit, hogy ezzel biztosítsák a kellemes belső környezetet épületeikben. Manapság a sűrűbb beépítésnek köszönhetően ez a szellőztetési stratégia még fontosabbá vált, főleg abban az esetben, ha a természetes keresztbe szellőztetés lehetősége nem adott. Azonban felismerve, hogy ez a jelenség nagyban függ a külső és belső hőmérsékletek közti különbségtől, sok innovatív elemet, eszközt és stratégiát fejlesztettek ki, hogy ezek segítségével felülemelkedhessenek a folyamat gyengeségein, különösen a megbízhatóság és az épületekben való alkalmazhatóság terén.

a. Bevezetés

Ahogy sok tanulmány is kimutatta, a szél hatása sokkal dominánsabb, mint a hőmérsékletkülönbség okozta felhajtóerő (kürtőhatás). Az építészek által preferált választás általában a keresztbe szellőztetés, ha az épületek belső levegőmozgásának serkentéséről valamint a belső hőmérsékleti környezet javításáról van szó.

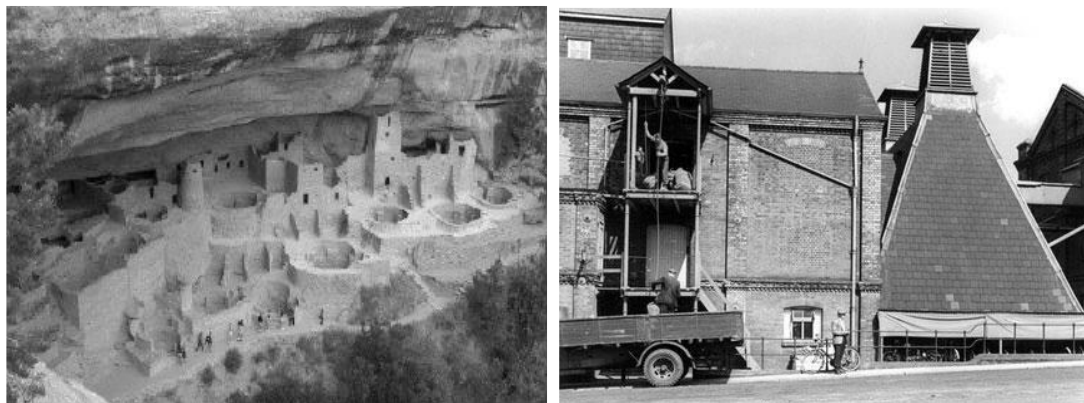
Az olyan épületek, melyeknél a külső falak közötti távolság jóval nagyobb, mint az egyes szintek magassága (deep plan buildings), vagy az összetettebb alaprajzi elrendezések kevesebb megnyitást eredményeznek a keresztbe szellőztetés számára. Ezekben a situációkban megfelelő megoldás lehet, ha az épület tetején biztosítunk egy tényleges kivezető nyílást, és a kürtő hatást használjuk a vertikális levegőmozgás előidézésére.

Ebben a kontextusban a kürtő hatás úgy definiálható, mint a levegő felfelé irányuló mozgása az épület szerkezetén belül, a termikus felhajtóerőnek és/vagy a szél által a tető felett generált negatív nyomásnak a hatására. Ez alapján az említett szellőztetési technika a külső szélviszonyoktól csak részben függ, így válhat még fontosabbá a korlátozott oldalsó megnyitásokkal rendelkező épületek, például a sorházak szellőztetésének esetében. Ezeknek az előnyöknek köszönhetően sok különböző innovatív szellőztetési stratégia jelent meg, melyek így a keresztbe szellőztetés helyébe léphetnek az előbb említett épülettípusok esetében. Ez magában foglalja a passzív szellőztetési eszközök, napenergiával hajtott ventilátorok, és a ventilátor által előidézett kürtő hatás jelenségét. [11]

b. Történeti fejlődés

A kürtőhatás felhasználása az ősidőkig vezethető vissza. A szakirodalom szerint már a minőszi időkben is használtak szél tornyokat, valamint kihasználták az épületek magassága által biztosított függőleges levegőmozgást, miközben a falusiak a Banpo Kínában i.e. 4000-5000 között kéményeket építettek, hogy a sütéskor, világításakor és főzéskor keletkezett égéstermékeltávolítsák házaikból. Ezen felül, az Anasazi Pueblo Kiva-ban kivezető nyílással ellátott ventilációs aknákat használtak arra a célra, hogy eltávolítsák az elhasznált levegőt és a füstöt otthonaikból. Felfedezték továbbá, hogy a Római Birodalom ideje alatt, a lakrészek lapostetőjét is szellőzőnyílással látták el, hogy a belső terekben felgyűlt füst azon

keresztül távozhasson. Ez a megközelítés meglehetősen hasonlít ahhoz a megoldáshoz, ami az indián tipiknél volt használatos. A tipiben a termikus erők és a szél által elegendő szellőzés jön létre ahhoz, hogy a sátor tetején lévő nyíláson távozhasson az elhasznált levegő, és a bejáraton keresztül friss levegő áramoljon be.



3-1. ábra: A kürtőhatás korai alkalmazásai [11]

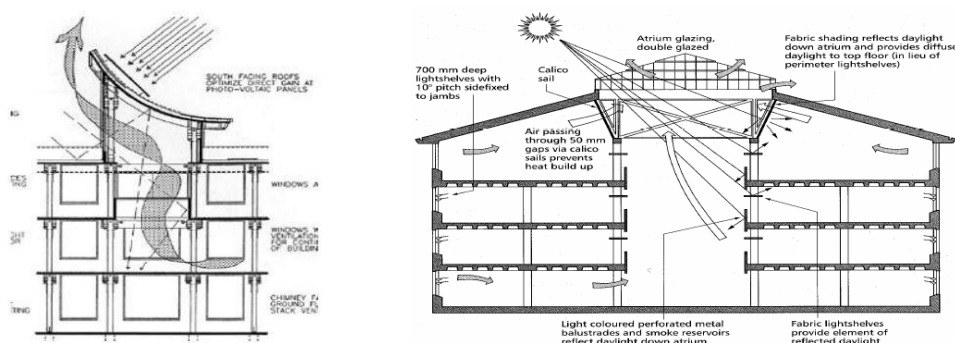
A 19. században a kürtőhatás használatának elterjedését mutatja az angol Képviselőházban megépült rendszer, ahol nyíl tüzet használtak a hőmozgás létrehozásához, ugyanakkor „kipufogó” nyílásokat építettek az épület felsőbb részeibe, hogy ezzel kürtőhatást hozzanak létre és eltávolítsák a forró gázt az épületből.

A 19. századi amerikai házak kupolái is fontos példái a kürtőhatás alkalmazására. Az amerikai házban a kupola, melyet minden oldalról ablakok sorozata keretezett, a lépcsőház felett helyezkedett el, így biztosítva a szellőzést oldalirányban és alulról felfelé, amikor minden ablak és belső ajtó minden szinten nyitva volt. [11]

c. Aktuális trendek

i. Természetes „kürtő-szellőztetés” stratégia

Az előzőekben említett stratégiákon kívül, számos népi építészetből merített szellőztetési technika van használatban manapság is. Az egyik legelterjedtebb módszer a tetőn vagy az épület felső részén képzett nyílás, úgy mint a gerincen vagy tetőablakon át történő szellőztetés, kéménykürtő, tetőszellőző és bevilágító. A legtöbbjük funkciója az, hogy a tető alatt megrekedt forró levegőt kiszellőztessék, és így csökkentsék a belső hőmérsékletet.



3-2. ábra: Természetes szellőztetés; tetőbevilágítás és üvegezett átrium [11]

Néhány esetben a szellőztetés hatékonyságát növelheti átrium, szellőztetési berendezések és szellőzőaknák használata.

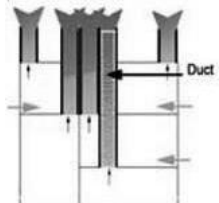
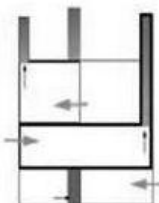
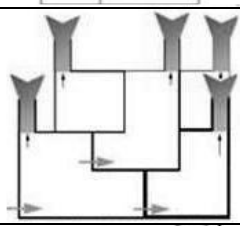
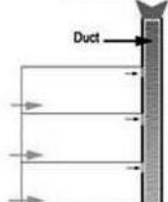
Az átrium egy üvegezett tetővel ellátott tér, amely általában a nagy szintterületű (deep-plan) épületek közepén elhelyezkedve szolgálja a szellőztetést és a világítást is egyben.

Az épület felső részében kialakított üvegezett felületek nagy nyomáskülönbséget segítenek elő. Ez az elem elnyeli a szoláris energiát és így felmelegíti a kivezető nyílás körülötti levegőt, így módon még hatékonyabbá válik a levegőáramlás és a felhajtóerő.

Azonban ennek a megoldásnak számos hátránya is van, például a zaj tekintetében, mely átadódhat a szomszédos helyiségek falán, vagy az üvegfelületek tükröződése és a forró napok során jelentkező erőteljes hőszugárzás problémája.

Másrésről a kürtőhatás elvén működő tornyok, mint szellőztetési berendezések a konvencionális építészeti megoldások egy másik csoportja. A magas, vertikális homlokzattal és az e fölött elhelyezett tetővel ez az elem nem csupán a levegő felfelé irányuló áramlását elősegítő felhajtó erőt hoz létre, de eredményes a többszintes épületek alsó szintjeinek szellőztetésében is.

A tornyokkal ellentétben a szellőző akna egy űr az épület vázán belül, azzal az elsődleges funkcióval, hogy a meleg és elhasznált levegőt összegyűjtse, mielőtt az a megfelelő elemeken (kémény, szél torony) keresztül a szabadba távozik. Mindent figyelembe véve, a szellőztetési berendezéseket három fő kategóriába sorolhatjuk: illeszkedő szerkezet, mellérendelt szerkezet, átfedésben lévő szerkezet.

	Kürtő-szellőztetési stratégia	Kürtő berendezés	Szellőző akna
Geometriától független	Mellérendelt szerkezet (minden helyiség egyénileg szellőztetett)		
	Átfedésben lévő szerkezet (minden helyiség részben egymás fölött helyezkedik el, de mindegyik speciális szellőzési stratégiával rendelkezik)		
Geometriától függő	Illeszkedő szerkezet (hasonló helyiségek egymás fölött)		

2. táblázat: Szellőző berendezések kialakítási lehetőségei [11]

ii. Fejlettebb kürtőszellőztetési stratégiák

Azért, hogy a kürtőszellőzést jelentősebbé tegyék az alacsony külső-belső hőmérsékletkülönbségű területeken is, több kürtőszellőztetési stratégiát is teszteltek, melyek maximalizálják a Napból és a szélből természetesen kinyerhető energia mennyiségét. Ezek magában foglalják napenergia által előidézett szellőztetést, a szél által előidézett kürtőszellőzést valamint a ventilátor által elősegített szellőztetést.

A nap által előidézett szellőztetés stratégiája az elmúlt évek azon tapasztalatára támaszkodik, hogy az épület napsugárzással történő fűtése képes elősegíteni a kürtő hatást. A három épület elem, mely a szellőztetés ezen koncepcióján alapul, a szoláris kémény, a kéthéjú homlokzat és a naptető (üveg tető).

A szoláris kémény működése azon alapul, hogy a napsugárzás és a hőelnyelés nagy nyomáskülönbséget hoz létre az elem külső és a belső tere között, így erősítve a kürtő hatást, és létrehozva a kívánt levegőmozgást. Néhány példa a stratégia alkalmazására modern épületekben: Charles de Gaulle School, Damascus, BRE Office Building, Herfordshire.

A kéthéjú homlokzatok (melyek egyaránt használatosak szellőztetési és világítási okokból) esetében, a belső és a külső üvegezett héj közötti térben a levegőt napsugárzás melegíti fel. A bemeneti nyílás és a felső kimeneti nyílás közötti növekvő nyomáskülönbség elősegítheti a kürtőhatást, így forró levegőt kibocsátva az épületből.

A kéthéjú homlokzatok (melyek egyaránt használatosak szellőztetési és világítási okokból) esetében, a belső és a külső üvegezett héj közötti térben a levegőt napsugárzás melegíti fel. A szerkezet alján elhelyezkedő bemeneti nyílás és a felső kimeneti nyílás közötti növekvő nyomáskülönbség elősegítheti a kürtőhatást, így forró levegőt kibocsátva az épületből.

A napfénytető, vagy kéthéjú tető egy másik példa a napenergiával elősegített szellőztetésre. Ennél az elemnél a hatalmas lejtős tető a napsugárzás elnyelésére szolgál, így felmelegítve a külső és belső tető közötti rést. Ennek eredményeképp, a résben létrejövő növekvő negatív nyomás alkalmas arra, hogy felfelé irányuló légmozgást hozzon létre, és kieresse a levegőt felső kivezető nyíláson.

Sok tanulmány kimutatta, hogy a szél által előidézett kürtőszellőzés technikáját alkalmazó „szél kémény”, szél torony, szélfogó és ventilátor turbina mind képesek elősegíteni a függőleges levegőmozgást, és így jelentős mértékben segíteni a kürtőszellőztetést. Ez alapján időnként szél által indukált szellőztetésnek vagy szél által segített kürtőszellőztetésnek is nevezik.

Az előbb felsorolt stratégiák között jelentős a „szél kémény”, mely megfelelő lehet a nagy szélsébségű régiókban való használatra (mérsékelt övi területek). Az általánosan használt "kipufogó" kéménnyel ellentétben, ez a forgó szél kémény bizonyítottan hatásosabb a függőleges légmozgás létrehozásában, mivel maximalizálni tudja a külső szél erejét. A technológia lényege, hogy a nyílást a szélárnyékos oldalra helyezve negatív nyomás keletkezik, mely által az elem képes nagy sebességgel kibocsátani a levegőt.

Egy másik szél által létrehozott szellőzési technológia, amely elősegítheti a kürtő hatást, a szél torony vagy más néven „badghir” (a Közel Keleten). Ez a szellőztetési stratégia képes befogni a szelet és kibocsátani a levegőt egy ugyanazon elemen keresztül.

Mint a szél torony modern megfelelője, a szélfogó az előzőekkel nagyjából megegyező stratégia szerint működik, befogja a szelet a szélnek kitett oldalon, és mielőtt kibocsátja a szélárnyékos oldalon, lefelé vezeti a belső térbe. Egy tanulmány szerint ez az eljárás képes a belső használt tér hőmérsékletét akár 6 °C-kal csökkenteni.

Más részről, a ventilátor turbina, amely olcsó és technológiailag egyszerűen működtethető, egy másik szél által irányított szellőztetési stratégia, főként szél hiányában alkalmazandó. Korábbi kutatások alapján ez az eszköz hatásosnak bizonyult a szellőzés mértékének növelésében, a padlás és a belső terek hőmérsékletének csökkentésében és a belső levegőminőség javításában.

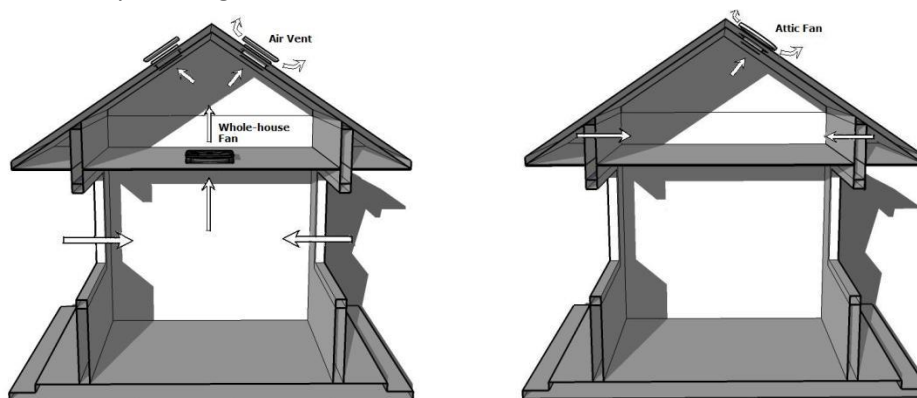
iii. Ventilátorral gerjesztett kürtőszellőztetés

Az előzők alapján könnyen belátható, hogy a napenergia által indukált és a szél által irányított szellőztetési technika ígéretes energia hatékony stratégiák, mivel a természet erejét használják. Azonban egy modern épület esetén – főként, ha forró-párás trópusi környezetben található -, ahol a biztonság és a hatékonyság elvárható, az aktív vagy mesterséges szellőztetés tűnik a legmegbízhatóbb eszköznek, mellyel felülemelkedhetünk a természetes szellőztetés időszakos alkalmatlanságán.

Ezeket a stratégiákat megfelelő alternatíváknak tartják a természetes szellőztetés kiegészítésére, főként azokban az esetekben, amikor a kürtőszellőztetés korlátozott az alacsony helyiségmagasságoknak, a magas kivezetések hiányának köszönhetően, valamint amikor a kürtő hatás létrehozásához szükséges elemek, mint a nyitott szakaszok, vagy a szellőző kémény nem kialakíthatók. Ezen felül, ez a stratégia akkor is jelentős, amikor a külső és belső hőmérséklet közötti különbség túl alacsony, és a szélesebbesség túl gyenge ahhoz, hogy negatív nyomást hozzon létre a kürtőhatás kialakulásához.

Hálózatról működtetett kürtőszellőztetés

Általánosan két alaptípusa van a ventilátor által létrehozott szellőztetésnek, melyek csökkentik az épület légkondicionálásának költségét: teljes-házra alkalmazott ventilátor, padláson elhelyezett légszívó ventilátor.

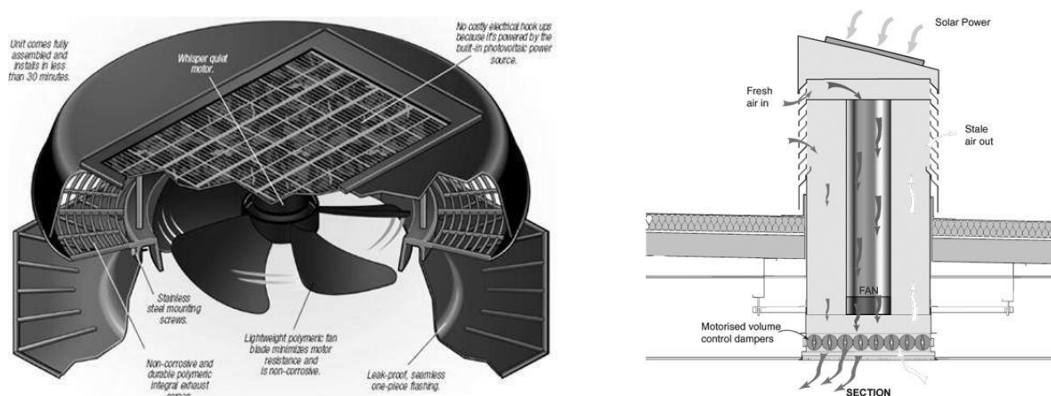


3-3. ábra: Hagyományos szellőztetés: teljes házra alkalmazott és padláson elhelyezett ventilátor [11]

A teljes házra alkalmazott ventilátor, amely egy nagy levegőtérfogatot áteresztő és kis sebességgel működő ventilátor, amelyet a plafonon helyeznek el. Az ablakoktól egy központi helyre vezeti és kiereszti a levegőt a padlástérbe, majd onnan a kültérbe egy kürtön keresztül, így elősegítve a légcserét. Habár, ez az eszköz jelentős légmozgást hozhat létre, és csökkentheti a házban a belső hőmérsékletet, számos hátrányos tulajdonsággal rendelkezik a zaj, a beépítés összetettsége és a magas villamos energia felhasználás tekintetében.

Szoláris energiával működtetett kürtőszellőztetés

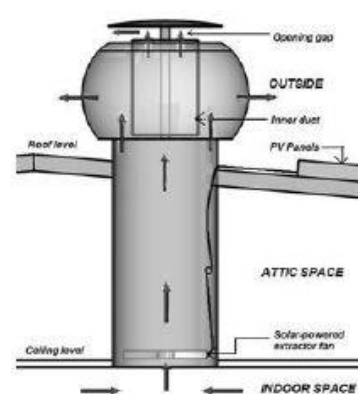
Habár a kibocsátó ventilátor bizonyítottan hatásos a kürtőszellőztetés létrehozásában, a nagy mennyiségű energiafelhasználás (kb. 250 Watt) okozta hátrány miatt a napenergiával működő padláson elhelyezett ventilátor jobb választásnak bizonyulhat. Kutatások kimutatták, hogy, ez az alkalmazás sikeresen csökkentette a hőmérsékletet és a páratartalmat az épületen belül, főleg akkor, amikor a nyílások zárva voltak, a belső térben létrejövő légsebesség nagyon minimális volt, és a szerkezet teljes napfénytől való függősége a működést kizárólag a nappali órákra korlátozta.



3-4. ábra: Napenergiával hajtott ventilátor [11]

Azért, hogy meghosszabbítsák a működést és növeljék a szellőztetés hatékonyságát, néhány újító kürtőszellőztetési stratégiát dolgoztak ki, melyben kombinálták a napenergiával működő belső ventilátort egy széllal működő eszközzel, mint például a szélfogó vagy a ventilátor turbína.

A fejlesztések eredményeképp készült egy prototípus, amely a hagyományos, szél által hajtott ventilátort ötvözi a belső, napenergiával működtetett ventilátorral. Tanulmányok alapján ez az eszköz sikeresen növelte a szellőztetési arányt és optimálisan működött az alacsony szélesebességű régiókban is. [11]



3-5. ábra: Hibrid ventilátor [11]

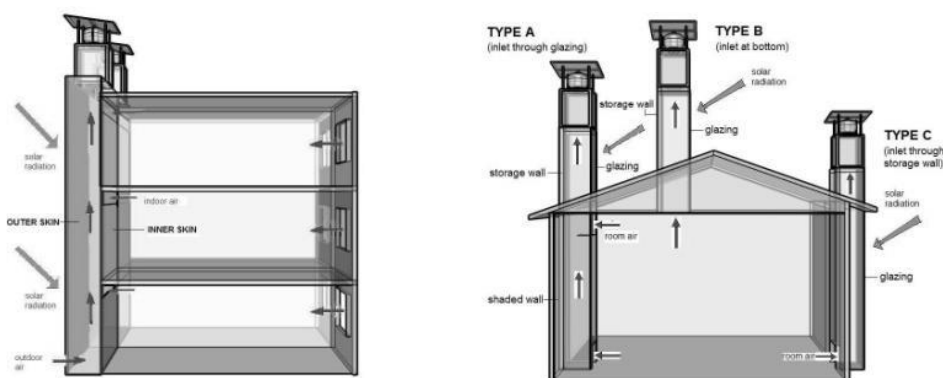
d. A jövő lehetőségei

Mint ahogy az az előbb leírtakban is szerepel, a kürtőszellőztetési stratégiákkal azért kísérleteztek, fejlesztették őket, hogy a szellőzés ezen módja megbízhatóbbá, hatékonyabbá válhasson. Az egyik legígéretesebb szellőztetési koncepció az a ventilátor által elősegített szellőztetési technika, amely a Napból és a szélből származó természetes energiákat maximalizálja. Ez magában foglalja néhány hibrid szellőztetési eszköz, például a napenergiával működtetett ventilátorturbina prototípusát (hybrid turbine ventilator-HTV).



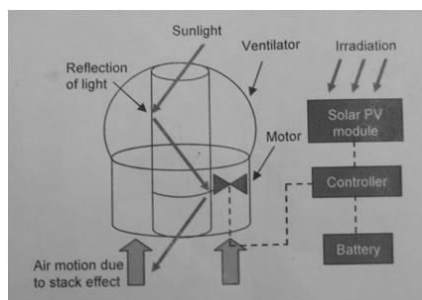
3-6. ábra: Hibrid ventilátor kialakítási lehetőségei [11]

Beépítése a szellőztetési berendezések beépítésénél említett kategóriák szerint történhet.



3-7. ábra: Hibrid ventilátor berendezés beépítése [11]

Ezen felül várható, hogy a közeljövőben ezt a kürtőszellőztetési technikát nem csupán az épület szellőztetésének céljából fogják használni, hanem világítási és egyéb esztétikai funkciókat is ellátnak majd. Annak érdekében, hogy ez a rendszer egy valóban hasznos, multifunkcionális eszközzé válhasson, folyamatos kutatások és fejlesztések folynak, melyek egyik eredménye a Napelemes Világító Szellőztető rendszer (Photovoltaic Lightning Ventilation-PVLV). Ez az elem a hagyományos ventilátor turbinát egy fénycsővel kombinálva biztosítja a napfény bejutását a belső térbe és megoldja a szellőztetést is egyben. [11]



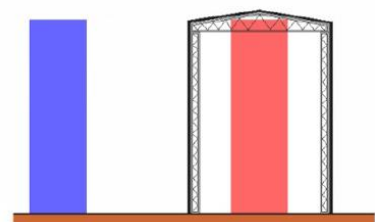
3-8. ábra: Ventilátor továbbfejlesztés [11]

4. A kürtőhatás vizsgálata

a. A jelenség leírása

Munkánk során azt a célt tűztük ki magunk elé, hogy a korábban ismertetett jelenséget megpróbáljuk valamilyen módon egy valós épület adatait felhasználva leírni. Ehhez két jellegzetes paneltípust választottunk. A számítások menete nagyon hasonló a már korábban részletezett SUT-éhoz, azonban, réven hogy az épületek eredetileg nem energiatermelési céllal épületek, be kell vezetnünk egy új fogalmat.

Ehhez vizsgáljuk meg a következő esetet. Tekintsük az épületet először egy zárt doboznak. Ilyenkor a föld felszínére helyezett, légmentesen zárt doboz magassága h , a külső levegő hőmérséklete t_k , a belső pedig t_b , akkor a levegő nyomása a h magasságban elképzelt felületre bárhol egy adott atmoszférikus értékkel egyenlő, hiszem e sík felett mindenhol ugyanolyan magasságú, t_b hőmérsékletű levegőoszlop van. Így a nyomásviszonyokat elegendő a h magasságban elképzelt sík és a talajfelszín között vizsgálni. A sík és a felszín között a dobozon kívül egy h magasságú, t_k hőmérsékletű levegőoszlop van, amelyből a felszínre jutó nyomás:



4-1. ábra: „doboz” példa [13]

$$p_k = h \cdot \rho_k \cdot g \quad (6)$$

ahol: h a magasságkülönbség [m], ρ_k a t_k hőmérsékletű levegő sűrűsége [kg/m^3], g a nehézségi gyorsulás [m/s^2].

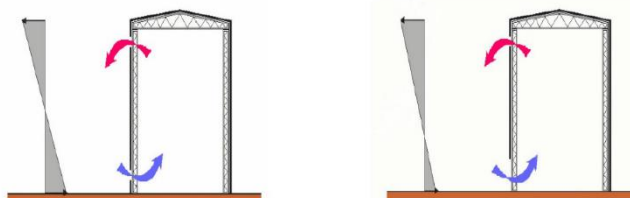
Ugyan így írható fel a dobozon belüli, t_b hőmérsékletű levegőoszlop nyomása a felszínre. Végül a h magasságban a dobozon kívül és belüli nyomások különbsége:

$$\Delta p = h \cdot g \cdot (\rho_k - \rho_b) \quad (7)$$

Ha a dobot alján és tetején egy-egy azonos méretű nyílást alakítunk ki, akkor a nehezebb külső levegő az alsó nyíláson át lép be. Az egyensúly feltétele nyilván az, hogy amennyi levegő a dobozba bejut, ugyanannyi távozik is onnan. Ahhoz, hogy ez a légkörzés fennmaradjon, természetesen szükség van a dobozban egy olyan hőforrásra, amely a dobozon belüli hőmérsékletet továbbra is a korábbi értéken tartja. A levegő mozgását a Δp nyomáskülönbség hozza létre. Ha az alsó és felső nyílás mérete, és kialakítása azonos, akkor az áramlási ellenállásaik is gyakorlatilag azonosak: a rendelkezésre álló nyomáskülönbség fele fordítódik arra, hogy a levegő az alsó nyíláson át a dobozba jusson, a másik fele pedig arra, hogy a felső nyíláson keresztül a környezetbe távozzon. A nyomáseloszlás nagysága a magassággal egyenesen arányos.

Az alsó nyílás, ahol a külső nyomás a nagyobb és a felső nyílás, ahol a belső a nagyobb között van egy olyan sík, ahol külső és a belső nyomás egyenlő. Ezt nevezik semleges szintnek ($NPL = \text{Neutral Pressure Level}$). Ez ebben az esetben a $h/2$ magasságban alakul ki. A számítások során általában ezt a semleges zónát veszik alapul, ehhez viszonyítják a

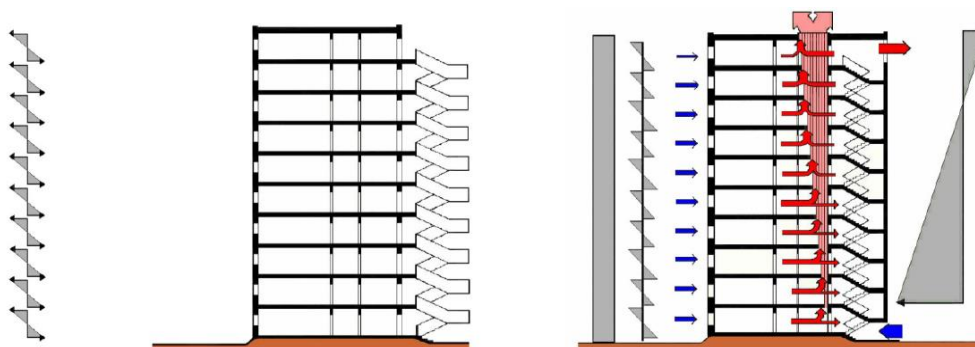
nyomáskülönbségeket. A SUT toronyhoz képest ez a legfontosabb eltérés, ha épületekben vizsgáljuk a kéményhatást. Az erőművi alkalmazásban nem alakul ki ilyen semleges nyomás szint, hiszen a kollektor felületnek köszönhetően a torony alján már meleg levegő jut be. Az épületek esetében nincsen kollektor, maga az épület melegíti az alul beáramló, hideg levegőt.



4-2. ábra: Semleges szint alakulása [13]

Azonban ez a zóna nem feltétlenül a magasság felénél alakul ki. Ha a beömlő és a kiömlő nyílások mérete nem egyforma, akkor a semleges zóna a nagyobb méretű nyíláshoz van közelebb, amelynek az áramlási ellenállása kisebb, tehát a rendelkezésre álló nyomáskülönbség kisebb hányada elegendő a levegő átáramlásának biztosításához. A kisebb méretű nyílás áramlási ellenállásának legyőzésére viszont a rendelkezésre álló nyomáskülönbség nagyobb hányada fordítódik.

Többszintes épületek esetén, az egyes szinteken belül a nyomáseloszlás, amennyiben a szinteket egy zárt cellának tekintjük, megegyezik a korábban említett doboz nyomáseloszlásával. Azonban egy sokkal összetettebb problémával találjuk magunkat szemben, ha az épületben különböző magasságú helyiségek kerülnek egymás mellé. Ilyen épület például egy tízeleteres panelház, ahol egyaránt előfordulnak szintmagasságú helyiségek pl. a lakások, közlekedők és épületmagasságú terek pl. lépcsőház, liftakna. A számítás első lépése itt is abból áll, hogy a szintmagasságú helyiségekre és az épületmagasságú terekre is külön-külön, mint önálló dobozokra meghatározzák a nyomáseloszlást. Az egész épület aerodinamikájának leírásához azonban figyelembe kell venni azt is, hogy a különböző terek között az egyes légáteresztő elemek, pl. lakásbejárati ajtók rései összeköttetést biztosítanak. Révén hogy a különböző terekben különböző nyomáseloszlás uralkodik, a nyomáskülönbség hatására köztük levegőáramlás alakul ki. Ennek iránya és mértéke az azonos geodetikus magasságban lévő síkokban érvényes nyomáskülönbségek algebrai összegéből számítható ki. Általánosságban megállapítható, hogy az alsóbb szinteken lakásból lépcsőházba, a felsőbb szinteken lépcsőházból lakásba mutató áramlás alakul ki. [7][13]



4-3. ábra: Teljes áramlási kép [13]

Bernoulli törvénye alapján közeg áramlásakor a sebességnövekedés nyomáscsökkenéssel jár. Pontosabban áramló közegben egy áramvonal mentén a különböző energia összetevők összege állandó. Ez összenyomhatatlan közeg esetén:

$$\frac{v^2}{2} + g \cdot h + \frac{p}{\rho} = \text{konstans} \quad (8)$$

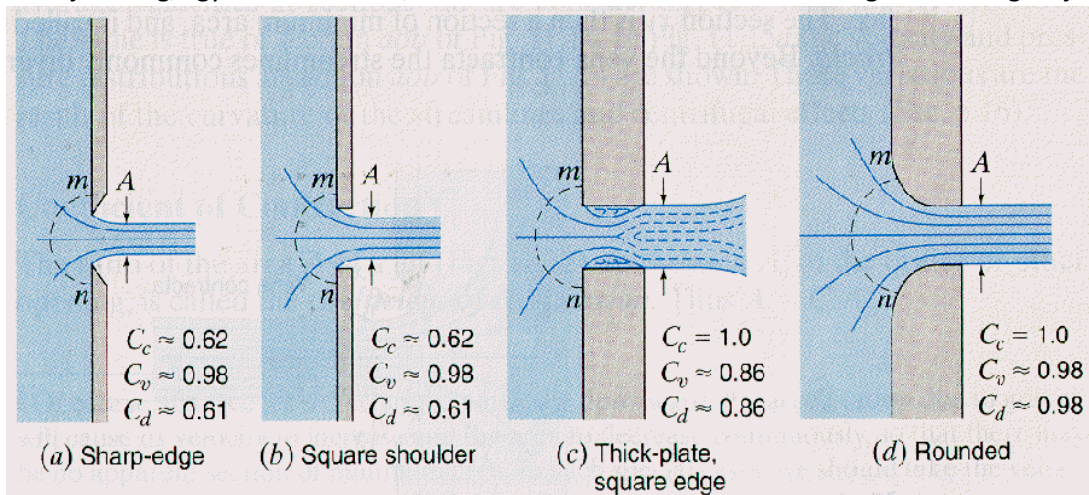
ahol: v a közeg sebessége az áramvonal mentén, g a nehézségi gyorsulás, h a magasság tetszőleges ponttól a gravitáció irányában, p a nyomás az áramvonal mentén, ρ a közeg sűrűsége.

A Bernoulli törvény segítségével könnyedén lehet szemléltetni a nyomás és sebességviszonyokat az lépcsőház nyílásai közt. A levegő sebességének meghatározására a következő képletet alkalmaztuk, ami a Boussinesq-közelítés segítségével, a SUT-nál bemutatott (4) képlet egy kibővített alapja. Ez a téli esetekre igaz, amikor a benti hőmérséklet magasabb, mint a kinti. Nyáron, amikor fordított a helyzet a T indexei felcserélődnek.

$$Q = C \cdot A \sqrt{2 \cdot g \cdot h \cdot \frac{T_i - T_0}{T_i}}, \quad (9)$$

ahol: Q a légtömeg [m^3/s], A beömlő nyílás területe [m^2], g a nehézségi gyorsulás = 9,81 [m/s^2], h az épület áramlástanilag magasság [m], T_i a belső, T_0 külső hőmérséklet [K].

A képletben található még egy C változó. Amennyiben összehasonlítjuk a SUT-ban áramló levegő sebességének egyenletével, látszik, hogy ott ez a C hiányzik. Ez azért van, mert ideális esetet feltételeztünk, azaz elhanyagoltuk a veszteségeket. A valóságban ezt azonban nem tehetjük meg, így a C nem más, mint a különböző áramlási veszteségek összefoglalója.



4-4. ábra: Áramlási ellenállások [8]

A fenti ábra szemlélteti C tényező alakulását a különböző áramlási ellenállású keresztmetszeteken. Azért van 3 minden egyes ábra mellett, mert megkülönböztetünk összehúzódnási – c , sebesség – v és kiáramlási – d tényezőket. Ezeknek a bevezetésével különíthetjük el számításainkat az ideális esettől, és közeledhetünk a valóság felé.

Ideális esetben a Q légáram:

$$Q_i = A_i \cdot V_i = A_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h} \quad (10)$$

A valóságos esetben:

$$Q = A \cdot V = C_c \cdot A_0 \cdot (C_v \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}) \quad (11)$$

vagy egyszerűbben:

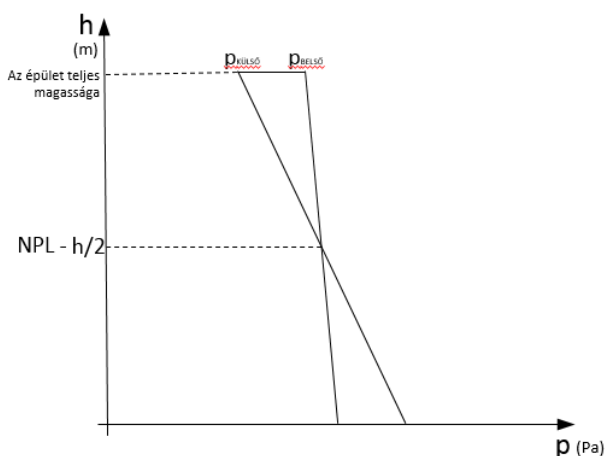
$$Q = C_d \cdot Q_i \quad (12)$$

C értékét munkánk során 0.65-nek vettük. [4][9]

A következőkben a fenti ismereteket felhasználva bemutatunk pár lehetségesen előforduló esetet egy lépcsőházban. A kialakuló teljes aerodinamikai kép meghatározására nem teszünk kísérletet, mert az még a legegyszerűbb esetekben is rendkívül bonyolult lenne. Emellett az itt bemutatott esetek is a valóságban többnyire egyszerre fordulnak elő, egymást erősítve illetve gyengítve. Célunk pár szemléletes példán keresztül bemutatni a levegő áramlásának alapjait.

b. Az ideális eset

A legegyszerűbb eset, az ideális eset, amikor a lépcsőházat egy homogén szélcsatornának tekinthetjük, aminek egy bejárata, és egy kijárata van, a kettő között pedig légmentesen zárt. Ha feltételezzük a nyílászárók közelítőlegesen tökéletes szigetelését, akkor ez az eset azt jelenti, hogy a lépcsőházban minden ajtó és ablak zárva van. Ilyenkor a nyomásmagasság görbe megegyezik a már korábban bemutatott „doboz példa” görbéjével.



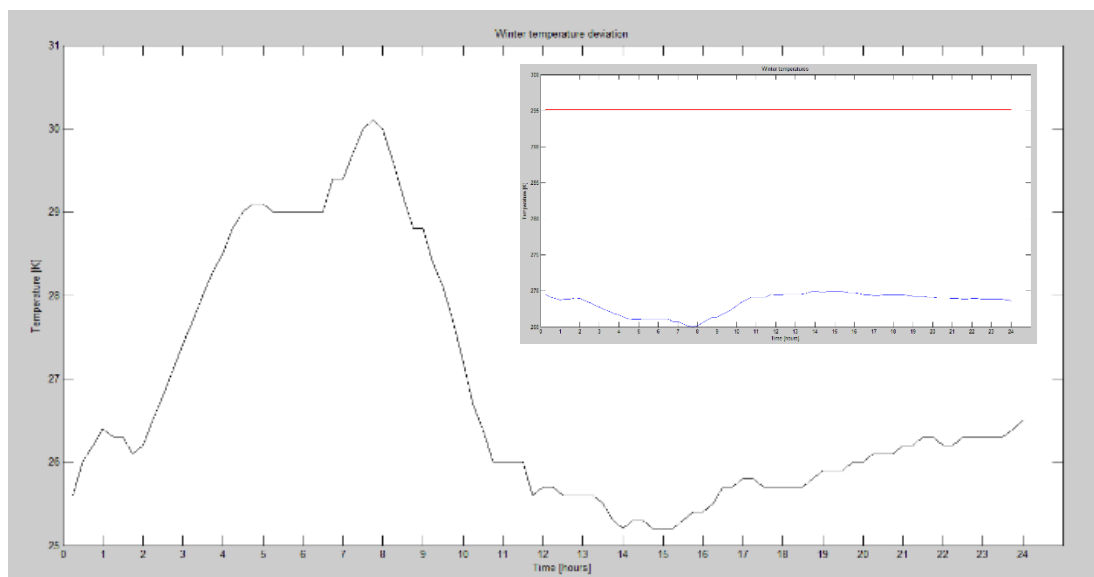
4-5. ábra: Ideális eset

Mivel ideális esetet feltételezve a be-, és kiömlő nyílások kialakítása és mérete azonos, ezért áramlási ellenállásuk is megegyezik. A semleges zóna az épület magasságának felénél alakul ki. A képletben a h változó helyére az épület magasságának felét kell tehát írni.

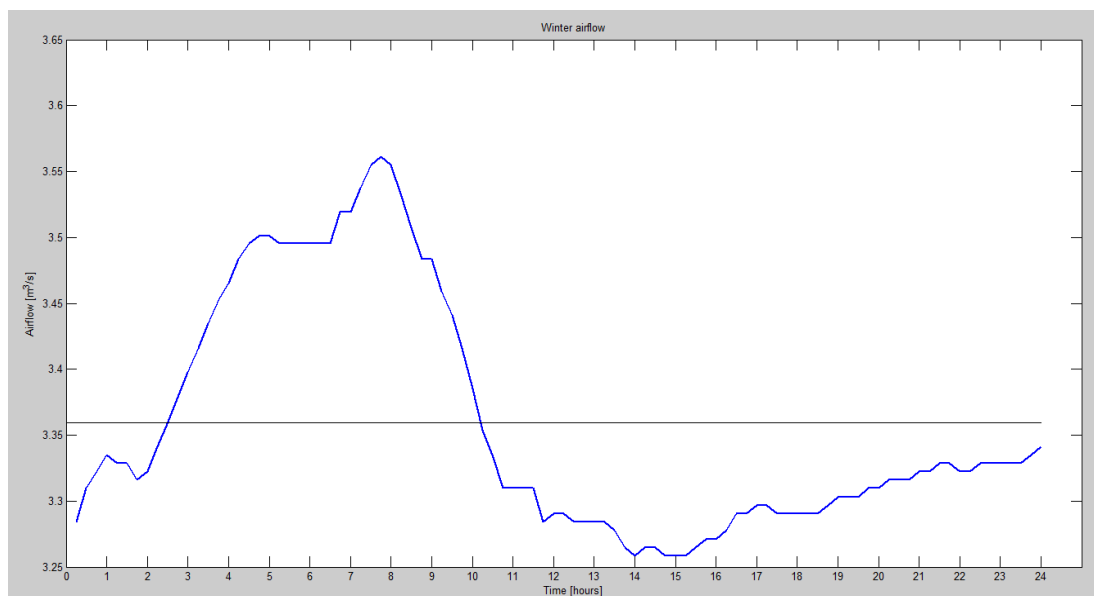
A következőkben bemutatjuk, hogy ebben az esetben hogyan alakulna egy nyári és egy téli nap szellőzése. A Q légáram kiszámítását a fenti képlettel végezzük, Matlab segítségével. A vizsgált épület egy 30 m magas panelház, így az NPL 15 m magasságban alakul ki. Az A keresztmetszetre 1 m²-t választottunk. Minkét esetben valós kinti hőmérsékletadatokat vettünk figyelembe. A benti hőmérsékletet télen 22, nyáron 23 foknak tekintettük.

A téli nap eredményei:

- A 4-6. ábrán kicsiben a benti (piros) és kinti (kék) hőmérsékletet ábrázoltuk.
- A 4-6. ábra ennek a két hőmérsékletnek a különbségét, tehát a Δt értékét mutatja. Ennek értéke a nap folyamán változik, de körülbelül 30 K.
- A 4-7. ábra a légáramlás [m^3/s] mértékét mutatja a nap folyamán. Ennek alakja összefügg az előző grafikonon található Δt -vel. Ez nem meglepő, hiszen az alkalmazott képletben egyedül a hőmérsékletek változnak.
- Az 4-7. ábrán berajzoltuk egy vízszintes vonallal az átlagos értéket. Ez ilyen bemeneti feltételek mellett $3,36 \text{ m}^3/\text{s}$ lett.



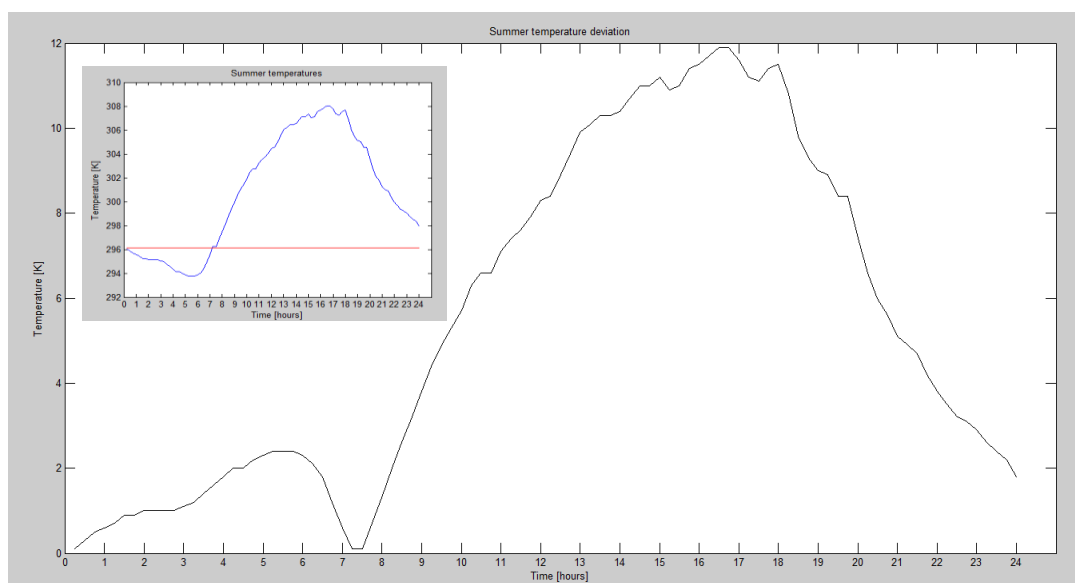
4-6. ábra: Téli hőmérsékletkülönbség diagram



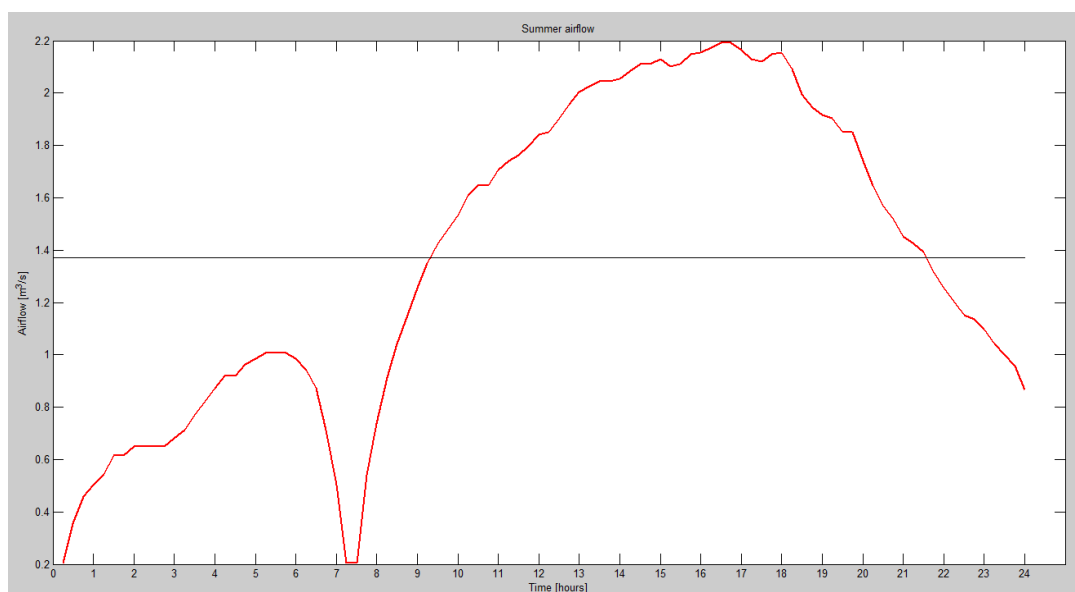
4-7. ábra: Légáramlás téli napon

A nyári nap eredményei:

- A 4-8. ábrán kicsiben a benti (piros) és kinti (kék) hőmérsékletet ábrázoltuk.
- A 4-8. ábra ennek a két hőmérsékletnek a különbségét, tehát a Δt értékét mutatja. Ebben az esetben egy kimondottan meleg nyári napot választottunk, így Δt értéke nagy.
- A 4-9. ábra a kialakuló légáramlás ábrázolja.
- A 4-9. ábra egyenes vonala szintén az átlagos érték, ami itt $1,37 \text{ m}^3/\text{s}$.



4-8. ábra: Nyári hőmérsékletkülönbség diagram

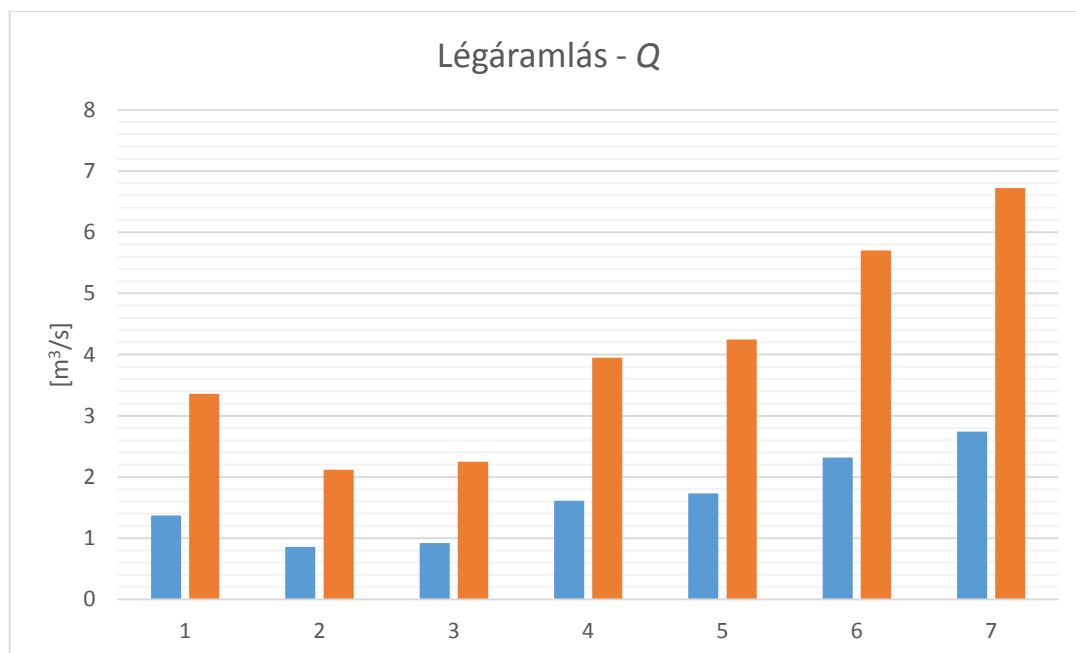


4-9. ábra: Légáramlás nyári napon

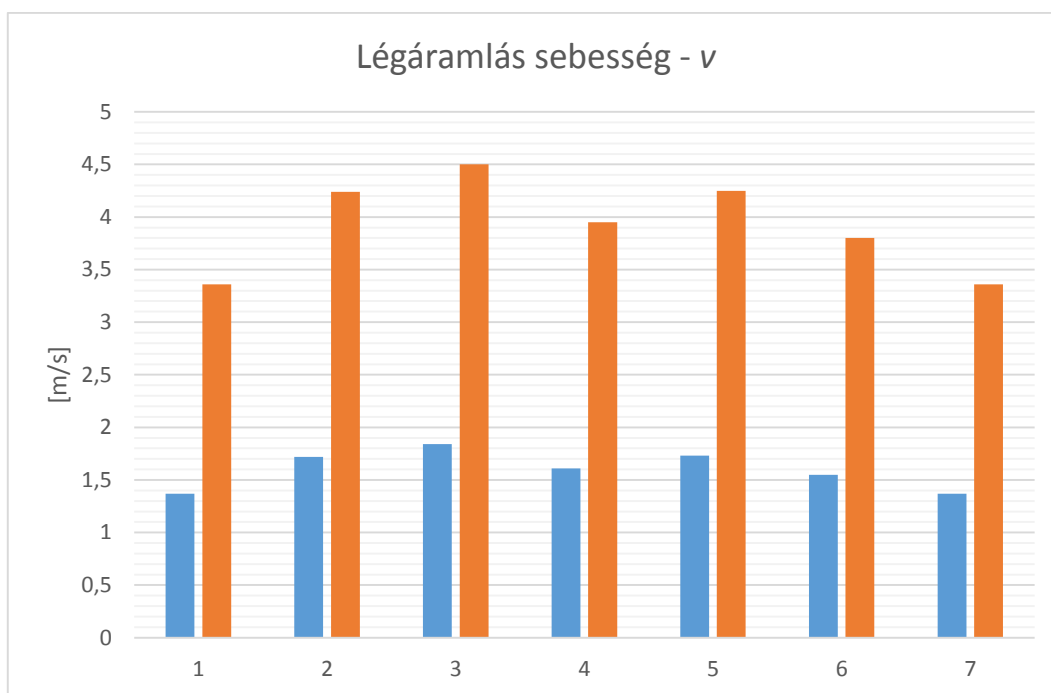
A fenti grafikonok azt az esetet mutatják, amikor a be és kiömlő nyílás azonosan 1 m^2 nagyságú. Ennek azokban nem feltétlenül kell így lennie. Feltételezzük, hogy az épületbe annyi levegő áramlik be, amennyi onnan ki is megy. Így ha a felső nyílás keresztmetszete kisebb, mint az alsóé, azon a levegő gyorsabban kell, hogy áthaladjon. Természetesen a megnövekedett áramlási ellenállás miatt a semleges zóna már nem az épület magasságának felénél alakul ki. A levegő sebességét úgy kapjuk meg, ha a Q -t elosztjuk az A felülettel. A következő táblázat a különböző nyílás keresztmetszet párokhoz tartozó Q légáramot, és a felső nyílásnál mérhető v szélességet mutatja a korábban bemutatott hőmérséklet adatokkal:

	Alsó nyílás [m ²]	Felső nyílás [m ²]	NPL [m]	Q (nyár, tél) [m ³ /s]		v (nyár, tél) [m/s]	
1	1	1	15	1,37	3,36	1,37	3,36
2	1	0,5	6	0,86	2,12	1,72	4,24
3	1,5	0,5	3	0,92	2,25	1,84	4,5
4	1,5	1	9,23	1,61	3,95	1,61	3,95
5	2	1	6	1,73	4,25	1,73	4,25
6	2	1,5	10,8	2,32	5,7	1,55	3,8
7	2	2	15	2,74	6,72	1,37	3,36

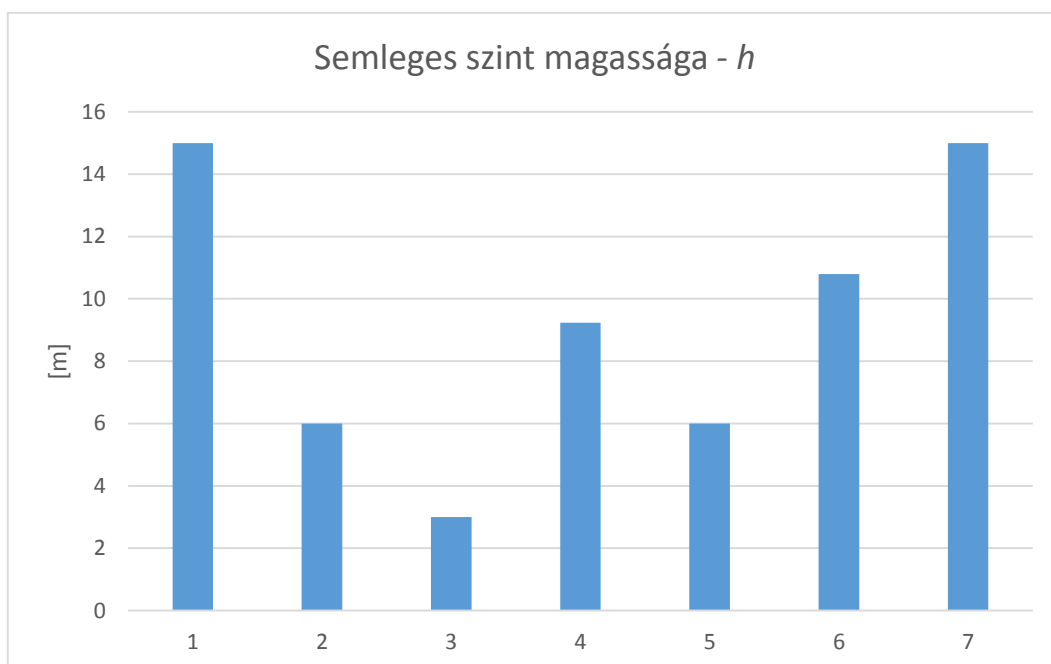
3. táblázat: Nyílás variációk



4-10. ábra: Légáramlás diagram



4-11. ábra: Légáramlás sebesség diagram

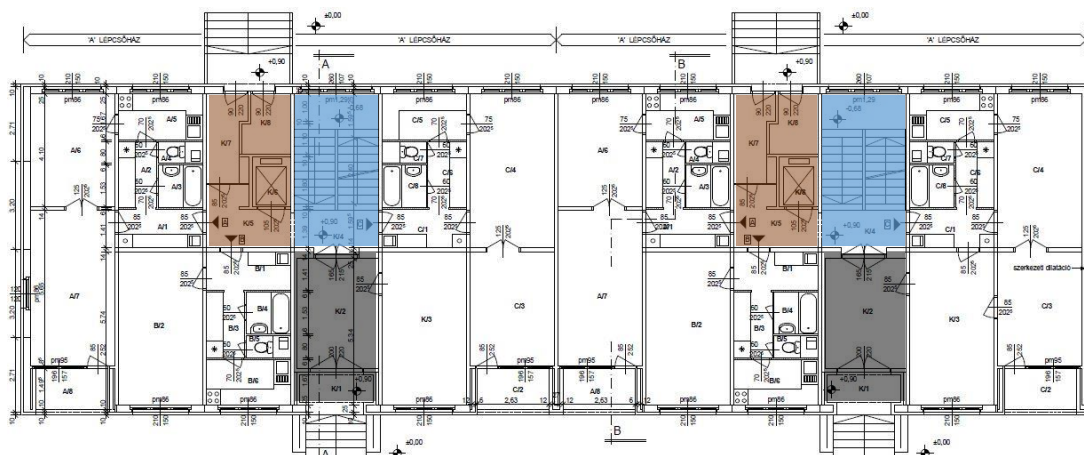


4-12. ábra: Semleges szint magasság diagram

A nyílások méretét két négyzetméterben maximalizáltuk. Ennél nagyobb nyílást nem célszerű kialakítani, hiszen ezek a falon és tetőn képzett lyukak folyamatosan nyitva vannak, a lépcsőház pedig korlátozott mennyiségű levegőt képes felmelegíteni, illetve nyáron lehűteni.

c. 1. épülettípus, ablakkal rendelkező lépcsőház

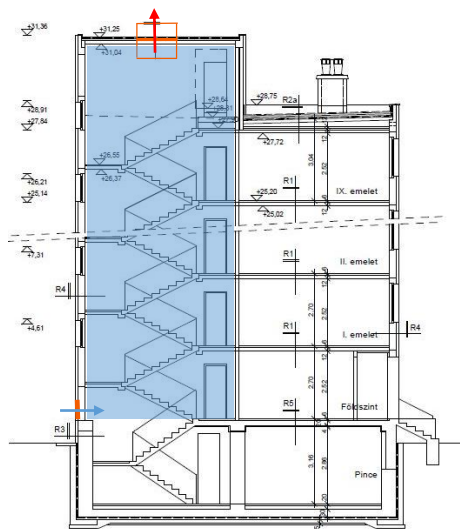
A következő esetben egy olyan épületet vizsgálunk, melynek lépcsőháza rendelkezik ablakkal, így közvetlen összeköttetésbe kerülhet a kinti levegővel a teljes magasságában. Attól függően, hogy hol nyitnak ki egy ablakot, három esetet különböztethetünk meg. Ezek az esetek mind eltérnek az ideálistól, és értelem szerűen kisebb áramlási értékeket szolgáltatnak annál.



4-13. ábra: 1. épülettípus alaprajz

A 4-13. ábrán a Budapest XI. Etele út 2-24. sz. alatti társasház alaprajzát láthatjuk, mely egy tizenkét egységből álló társasház első két egységét mutatja. Az épület magASFöldszintes, így a bejárat 0,90 méterrel a terepszint felett helyezkedik el, és lépcsősor vezet fel hozzá. A szürkével jelölt terület a bejáratot (szélfogó) és az előteret foglalja magában, ezekkel a vizsgálat során nem számolunk, ugyanis belmagasságuk azonos a szint magasságával, így a szintek nincsenek egymással kapcsolatban, a levegő függőleges mozgása nem biztosított. A kékkel jelölt terület a lépcsőház. A helyiség 17,11 négyzetméter alapterületű (5,59*3,06 méter oldalú téglalap), a szintkülönbséget egy 1,50 méter karszélességű, kétkarú lépcső hidalja át, 1,595 méter mélységű pihenőkkel. A vizsgálat során ezt a helyiséget vehetjük figyelembe, hiszen levegő függőleges áramlása itt jön létre. A lépcsőház külső határoló fallal rendelkezik, közvetlen kapcsolatban áll környezetével, a levegőt bevezető nyílás ezen a falon elhelyezhető. A közös terekhez tartozik még a barnával jelölt közlekedő és liftakna is, ám ezeket a vízszintes födémek valamint a lift jelenléte és mozgása miatt figyelmen kívül hagyjuk. Az épület pincszinttel is rendelkezik, így a függőleges közlekedő teljes magassága ~33 méter, azonban a bevezető nyílás a talajszint felett helyezkedik el, így 30 méteres teljes magassággal számolhatunk.

Az első és legegyszerűbb eset, ha pont az épület magasságának felénél nyílik ki egy ablak, ami megegyezik a semleges zóna magasságával. Mivel nincsen nyomáskülönbség az ablakon keresztül

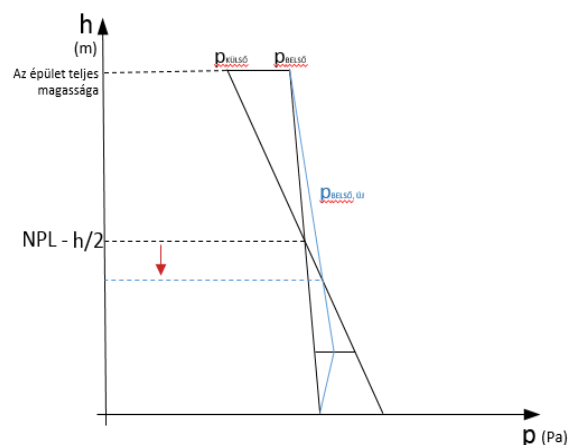


4-14. ábra: 1. épülettípus metszet

nem indul meg légáramlás, és a semleges zóna is marad a helyén. Azonban hőátadás következtében a kéményhatás gyengül, hatásfoka romlik.

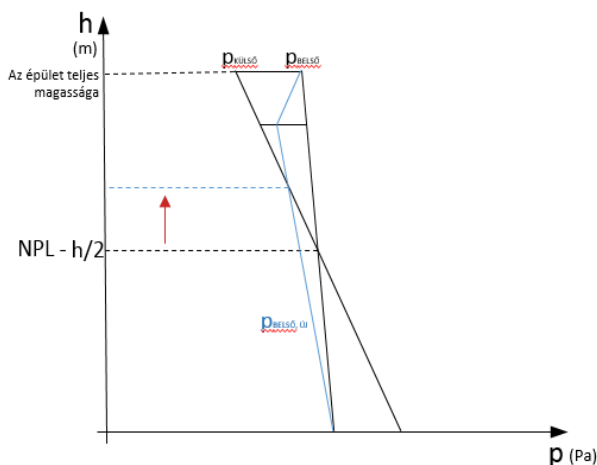
A másik két esetet a szerint különböztetjük meg, hogy az eredetileg középen lévő semleges szint alatt vagy felett történik az ablaknyitás. Ez azért fontos, mert a korábban bemutatottak értelmében megállapítható, hogy az alsóbb szinteken lépcsőházba befele, a felsőbb szinteken lépcsőházból kifelé mutató áramlás alakul ki. Ha kinyitunk egy ablakot, akkor abban a magasságban közelítjük a benti nyomást a kintihez, de nem egyenlítjük ki a kettőt, a nyomáskülönbség továbbra is megvan. Ez a Bernoulli törvény értelmében a közeg sebességére hat, ezért áramlás indul meg.

Ha alul nyitunk ki egy ablakot, akkor a p - h görbe a következőképpen alakul. Látható, hogy a semleges szint lejjebb került az eredetihez képest. Ez azért van, mert alul lecsökkentettük a beáramló levegő útjába kerülő áramlási ellenállást, így kisebb nyomás elegendő annak leküzdésére. Amikor felül nyitnak ki egy ablakot hasonló görbét kapunk, de azon semleges szint emelkedést tapasztalunk, hiszen a felső nyílás ellenállását csökkentettük le az alsóéhoz képest.



4-15. ábra: Ablaknyitás alul

A képlet értelmében a h helyére mindig a be-, kiömlő nyílás távolságát kell írni a semleges szinttől. Érdekes megfontolni, hogy mikor melyiket vesszük figyelembe. Az első esetben többlet hideg levegőt juttattunk a rendszerbe, de közben nem növeltük annak hőmérsékletét, így ugyanakkora befektetett energia mellett több hideg levegőt kellene felmelegítenie. Ilyenkor tarthatatlan az ideális esetben leírt hőáramlás, tehát egyértelműen rontottunk a hatásfokon. Hogy ez matematikailag is megjelenjen, ilyenkor a beömlő nyílás távolságát kell figyelembe venni, hiszen így kapunk kisebb h értéket.



4-16. ábra: Ablaknyitás felül

A második esetben a semleges szint emelkedett, és ha továbbra is az alsó nyíláshoz néznénk a magasságát, akkor az ideális esethez képest egy nagyobb h értéket, tehát nagyobb légáramlást kapnánk. Ez azonban ellentmondana a fizikai folyamatnak, hiszen azzal hogy fent kinyitottunk egy ablakot, a már felmelegített levegő egy részét úgy engedjük ki a szabadba, hogy nem haladt át az épület tetején elhelyezett turbinán. Így itt is rontottuk a rendszer hatásfokát. Most a fenti nyílás távolságát érdemes figyelembe venni, hiszen az eredményez kisebb h értéket.

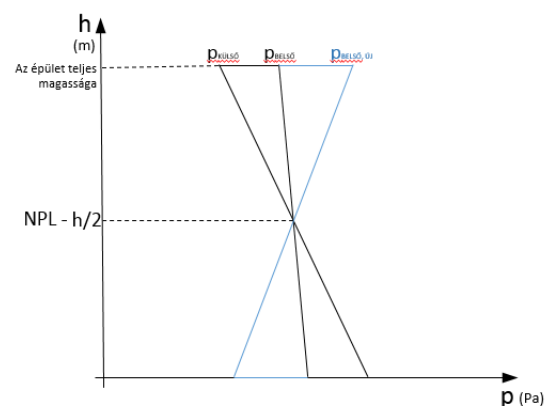
d. 2. épülettípus, ablakkal nem rendelkező lépcsőház



4-17. ábra: 2. épülettípus alaprajz

A második példa Budapest XIV. kerületében, a Gvadányi utca 64. szám alatt található pontház. A magassíkföldszintes épület fő- és hátsó bejáratral is rendelkezik (szürkével jelölt terület), az itt található lépcsők vezetnek fel a lépcsőházba (kék terület). A barnával jelölt lift és tároló a vizsgálat szempontjából lényegtelen. A lépcsőház 9,61 négyzetméter alapterületű (5,25*5,39 méteres téglalap), egy 1,25 méter karszélességű, kétkarú lépcsővel és 1,30 méter mélységű pihenővel. Kb. 32 méteres magassággal számolhatunk, pinceszint nincs. A lépcsőházi helyiség nem rendelkezik külső határoló fallal, így nincs közvetlen kapcsolata a környezettel. A levegő bevezetése a kerti tároló helyiségen keresztül megoldható (narancssárgával jelölt terület).

Ablakkal nem rendelkező lépcsőház esetén élünk azzal a feltételezéssel, hogy a lépcsőházból nyíló helyiségek, folyosók, lakások ablakai is be vannak zárva, a kinti levegővel nem érintkeznek. Így ezekben egy belső légkörzés figyelhető meg, és amikor kinyílik a lépcsőház ajtaja, a nyomáskülönbség hiányában nem indul meg számottevő légáramlat. A valóságban természetesen ez egy ritkán előforduló eset. Ami általában a valójában történik, azt a 4-3. ábra szemlélteti. Azonban, ha elfogadjuk ezt a közelítést, jelentősen egyszerűsödik a $p-h$ görbe. Mivel a benti nyomást feltételezésünknek megfelelően sehol sem közelítettük a kintihez, így sem a görbe alakja, sem a semleges szint nem változik. Viszont a



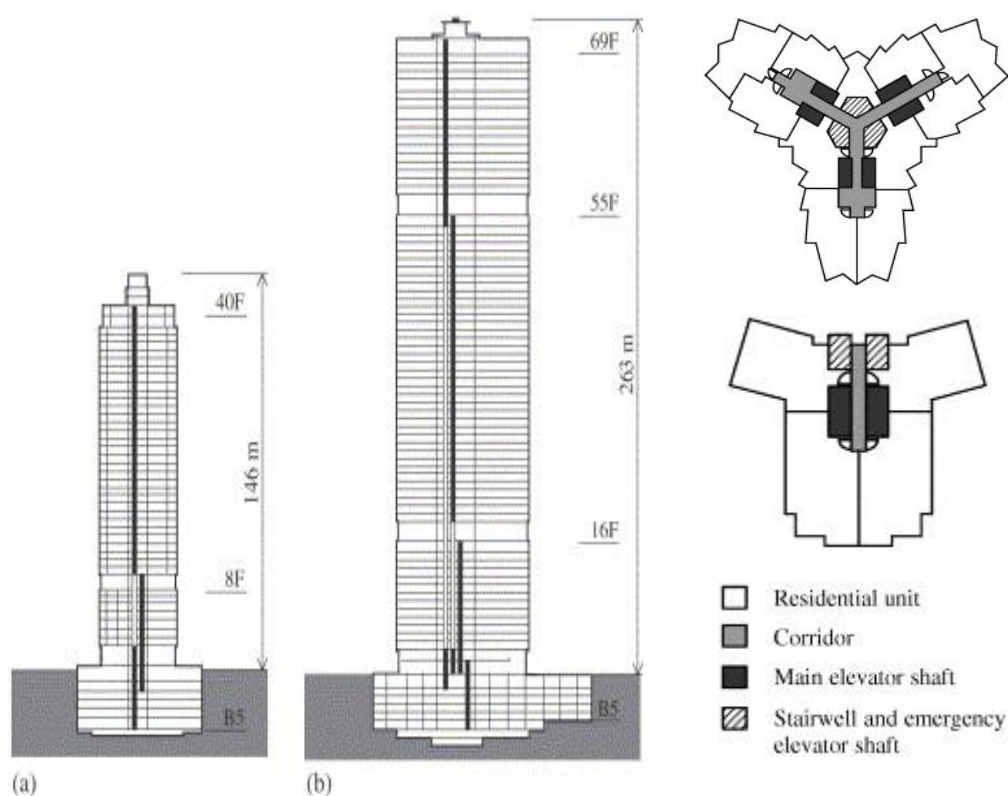
4-18. ábra: Ajtó nyitása

lépcsőházon kívül, a környező helyiségekben szintén meleg van, ha kinyitunk egy ajtót a hőátadásnak köszönhetően a rendszer energiája növekszik. Ez azokban az esetekben igaz, ahol a lépcsőház nem, vagy kevésbé van fűtve, mint az azt körülvevő lakások. A rendszer belső energiájának növekedését a T_b hőmérséklet növekedésével vehetjük figyelembe. Ezáltal megnövekszik a ΔT , és gyorsul a légáramlás. Ebben az esetben teljesen mindegy, hogy a semleges szint alatt vagy felett történik az ajtónyitás.

e. Valós példa

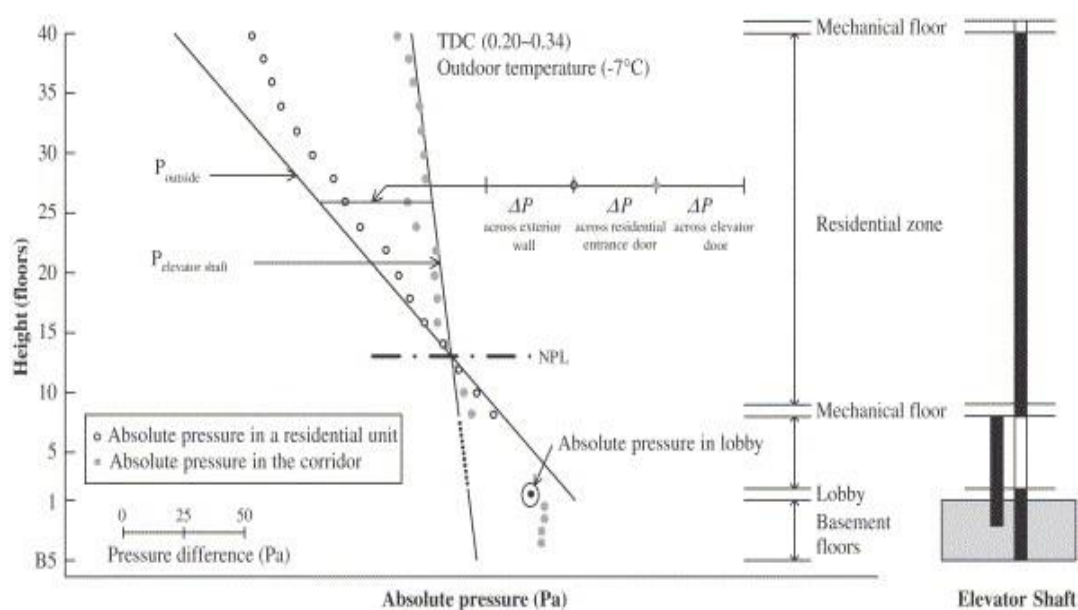
Ebben a fejezetben bemutatjuk, hogy hogyan néz ki a valóságban a nyomáseloszlás egy épületben. Helyszíni mérések, és/vagy különböző speciális szoftverek szükségesek ahhoz, hogy az adatokból reális képet kaphassunk az épületről. Ebben a példában a CONTAMW nevű szoftvert használták, amit a National Institute of Standards and Technology fejlesztett ki, kimondottan épületek áramlási viszonyainak modellezésére.

A két vizsgált toronyház Szöulban, Dél-Koreában található, és mindegyik az ezredforduló környékén épült.

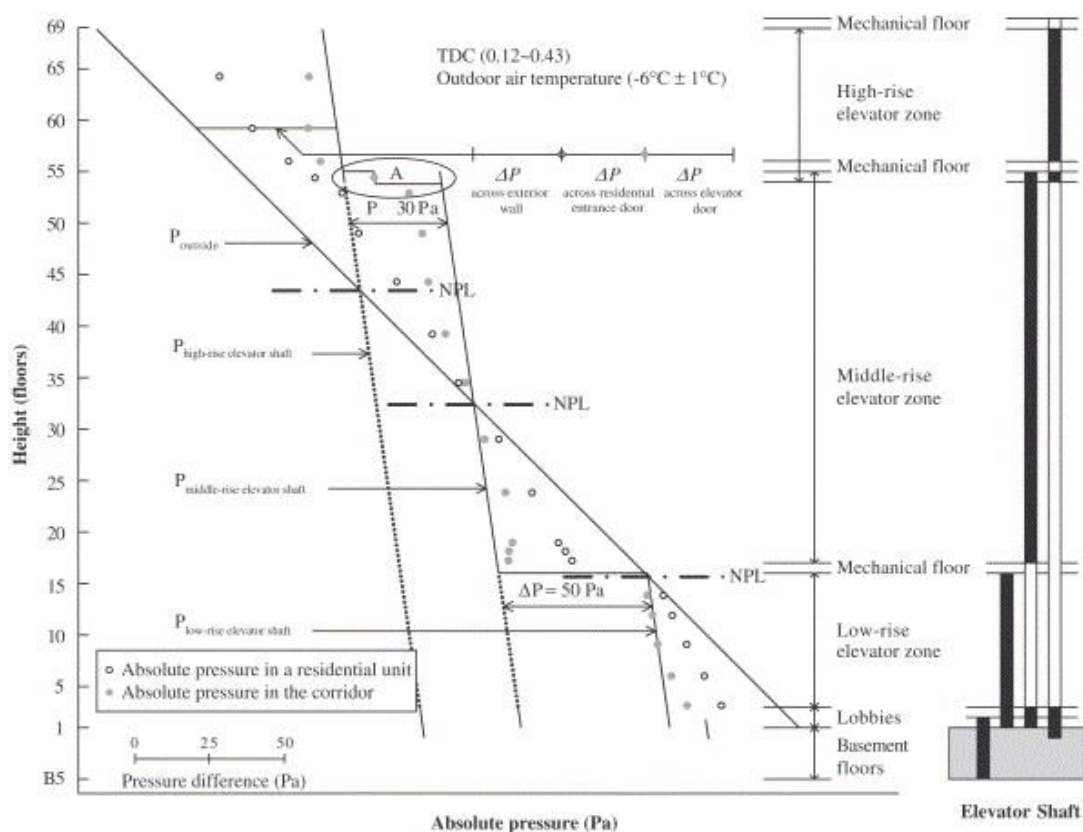


4-19. ábra: Dél Koreai példa [10]

A mérési eredményeket a következő ábrák mutatják. A 4-20. az alacsonyabb, (a) jelű épülethez tartozik, míg a 4-21. a magasabb (b) jelűhöz.



4-20. ábra: (a) épület [10]

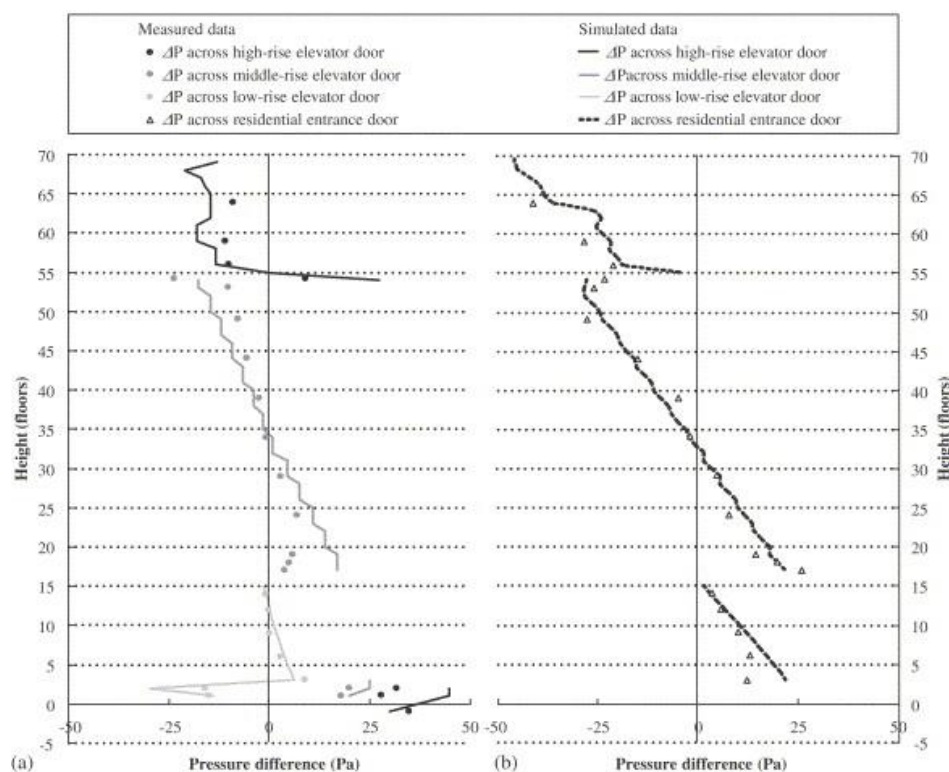


4-21. ábra: (b) épület [10]

A folytonos vonalak a kinti, illetve a liftaknában lévő nyomást jelzik. Ezeket folytonosan lehet mérni egy barométerrel az épület teljes magasságában. Ezzel szemben a pöttyök az egyes szinteken előforduló nyomásértékeket mutatják. A 4-21. ábrán több semleges szint is megfigyelhető, ez azért van, mert több, különböző magasságú liftaknával rendelkezik az

épület. Végül ezen mérési adatok alapján szimulációval is elkészíthető az épület teljes nyomáseloszlása a magasság függvényében.

A 0 értéket, tehát a közép vonalat, a semleges szintnél jelölték, a vízszintes tengely az ahhoz képesti nyomáseltérést jelöli a magasság függvényében. A bal oldali a mért érték, a jobb oldali a szimulált. Ahhoz, hogy a mért adatokhoz ennyire hasonlító szimulált értékeket kapjunk, elengedhetetlenek helyszíni mérések, tehát a szimuláció önmagában nem képes ennyire pontos eredményre. Számos bemeneti változót, és peremfeltételt kell definiálni a program használata során, melyek pontos ismerete szükséges. A 4-22. ábrán a (b) jelű épület eredményei láthatóak. [10]



4-22. ábra: Mért és szimulált nyomáskép [10]

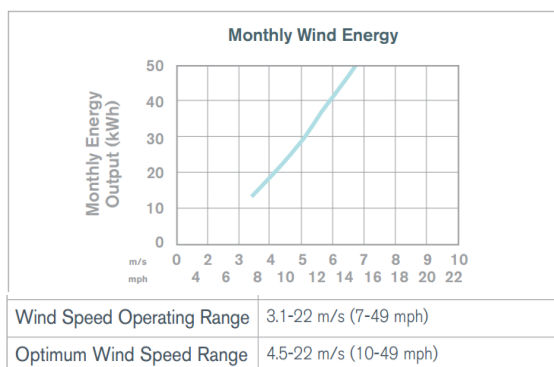
5. Konklúzió

a. Összegzés

Eredeti célunknak megfelelően szeretnénk volna megnézni, hogy az épületek, a bennük kialakuló kürtőhatás révén létrejövő légáramlással mennyire képesek energiát termelni. Ehhez megfigyeltük, hogy milyen szélesség adatokat kaphatunk egy 10 emeletes panelház esetén. Ha az épület tetejére egy szélturbinát helyezünk, ami egy generátort hajt meg, elengedhetetlen a termelés előrejelzéséhez a szélesség pontos ismerete. Ez a kifejezetten energiatermelési célra fejlesztett szélerőművekre is igaz. A szélturbiná teljesítménye a szélesség harmadik hatványával arányos.

Az mai szélturbinák önszabályozóak, ami azt jelenti, hogy különböző szabályozási folyamatokkal igyekeznek fordulatukat mindig a névleges fordulatszám közelében tartani. Azonban mindegyik turbinának szüksége van egy minimális szélességre, hogy elindulhasson. Értelem szerűen a névleges teljesítményt a névleges fordulatszámon adják le. Általában 2,5-3,5 m/s körüli szélességnél indulnak, és 12-15 m/s körül érik el a névleges fordulatszámot, szolgáltatják a legtöbb energiát.

A pontosabb kép érdekében nézzük meg egy kisteljesítményű, kereskedelemben kapható szélturbiná teljesítmény-szélesség görbáját (5-1. ábra). Az energia dimenzió miatt a vízszintes tengelyen a szélességek havi átlagát kell érteni. Az alatta lévő táblázat mutatja a működési tartományát, illetve az optimális szélesség tartományát. Ezekből az adatokból az látszik, hogy az eredményes működtetéshez legalább 4,5 m/s-os szélesség szükséges. Ezek



5-1. ábra [12]

az adatok hagyományos, vízszintes tengelyű, három lapátos szélturbinákhoz tartoznak. A SUT-ból kiindulva, ha a kéményhatás energiáját szeretnénk hasznosítani másfajta turbinára van szükség. Az eltérés rögtön megmutatkozik a lapátok számában. Minél több lapáttal rendelkezik egy szélkerék, annál kisebb szélességeknél képes elindulni, de ezzel a teljesítménye is csökken. Azonban a 2. fejezet alapján még a SUT-ban elhelyezett turbiná indítási sebessége is 2,5 m/s.

A szimuláció során kapott eredményeinket a 3. táblázat mutatja. Nyári nap esetén semmilyen nyílaskialakítással sem értük el a 2 m/s-os értéket, míg a téli nap esetében átlagosan 3,5-4,5 m/s-os értékeket kaptunk eredményül. Azonban érdemes megfigyelni, hogy ezen átlagos érték mögött milyen a napi ingadozás (4-7. ábra). A délelőtti nagyobb sebességet egy gyengébb délutáni periódus követte. Ez egyértelműen meglátszana a turbiná teljesítményén is, ezért nem szabad csak az átlagos értékekre hagyatkozni, fontos megnézni az attól való eltéréseket is.

Többször hangsúlyoztuk a munkánk során, hogy a szimulált értékek egy ideális esetre vonatkoznak, amikor a lépcsőház lényegében egy szélcsatorna. Ez mondjuk elképzelhető közelítés lehet éjszaka, amikor mindenki alszik a házban, és minden ajtó vagy ablak a lépcsőház körül tartósan zárva van. Azonban minden más eset, melyet a 4. fejezet c. és d. pontjában részleteztünk, rontja az ideális esetben kapott eredményünket. Emellett a nyílások geometriai kialakítása sem feltétlenül egyezik az ideális esettel. Míg a tetőn elhelyezett kivezető nyílás kör alakú lenne, addig az oldalfalon ez a megoldás nem célszerű. Helyette valószínűleg egy vízszintesen elnyújtott téglalap alakú lyuk kerülne kialakításra, így a két nyílás áramlástanilag ellenállása és a rajtuk eső veszteség nem lenne azonos.

Szintén kiemeltük, hogy a valóságban az áramlási kép és a nyomásviszonyok meghatározása rendkívül összetett, és bonyolult feladat. Éppen e miatt, számos egyszerűsítéssel és feltételezéssel éltünk munkánk során.

Egy átlagos téli, és nyári nap hőmérsékleteinek a segítségével dolgoztunk. Ezt vehetjük két szélsőséges helyzetnek is, hiszen a benti, és a kinti hőmérséklet ilyenkor tér el a legjobban egymástól. Tavasszal, illetve ősszel sokkal kisebb a hőmérsékletkülönbség, ezáltal a kürtőhatás intenzitása is. Szintén fontos feltételezés volt részünkről, hogy a vizsgált épületben télen és nyáron is konstans hőmérsékleteket mérhetünk az egész nap folyamán.

A fentiek értelmében megállapítható, hogy az általunk kapott 3,5-4,5 m/s-os téli szélsősebesség értékek a valóságban kisebbek lennének. Ugyan ez igaz a nyáriakra is, de ott gyakorlatilag nem sikerült olyan értéket elérni, ami már hasznosítható lenne energiatermelés szempontjából. A téli eredmények speciális szélturbinát feltételezve hasznosíthatóak lennének, azonban a turbina itt sem tudna felpörögni a névleges fordulatszámmra. Emellett figyelembe kell vennünk, hogy a telek egyre enyhébbek, és ha esetleg tartósan van nagy hideg, az is csak az év napjainak töredékét teszi ki. Így mindent összevetve megállapíthatjuk, hogy az általunk definiált körülmények között a kürtőhatás energiatermelésre nem használható.

b. Kitekintés

Ez azonban nem jelenti azt, hogy a maga a jelenség energiatermelésre alkalmatlan lenne. Ahogy a mi szimulációnkból is kiderült, nincs szükség extrém nagy hidegekre ahhoz, hogy elfogadható szélsősebesség értékeket kapjunk. Sokkal fontosabb, hogy ez a sebesség folyamatosan meglegyen, azaz tartósan hosszú legyen a tél. Emiatt ez a fajta energiahasznosítás olyan északi országokban, ahol tartósan hideg van és ezért a házakat folyamatosan fűtik, sokkal jobb eredményekkel járhat. A másik szélsőséges helyzet, amikor a környezeti hőmérséklet nagyon magas, megköveteli a benti levegő légkondicionálását. Amennyiben ezek a feltételek fennállnak, szintén jó eredménnyel járhatunk. Éppen ezért javasoljuk a szimuláció elvégzését ezeknek a helyeknek a hőmérsékleti adataival is.

Szintén fontos figyelembe venni az épületmagasság és a kiáramló levegő sebességének összefüggését. Míg a SUT esetét megvizsgálva láthattuk, hogy közel 200 méteres magasságú toronyban kialakuló légáram komoly energiatermelésre használható, addig a mi esetünkben használatos épületmagasság 30 méter, amely ennek töredéke.

Problémás lehet a be- és kiszellőző nyílás építészeti kialakítása is, hiszen ezek folyamatosan nyitott, az épület környezetével kapcsolatban lévő lyukak a külső határoló szerkezeten. Általánosságban igyekszünk az épületeket úgy kialakítani, hogy a környezeti hatásoktól hő- és vízszigetelt módon elzárjuk, azonban egy ilyen nyílás létrehozásával a hő- és vízszigetelés folytonosságát szakítjuk meg, így ezen a felületen az épület gyakorlatilag védtelenné válik az esővel, széllel és hőmérsékleti hatásokkal szemben. A tetőn képzett nyílás megoldása könnyebben elképzelhető a már bemutatott üvegezett tető/bevilágító logikai kialakítását követve (3-2. ábra). Kéthéjű üvegtető beépítése esetén a tető alatt felhalmozódott levegőt a napenergia is tovább melegíti. Az oldalfalon található nyílás kialakítása több korlátba ütközik. A tetőnyílással ellentétben ez utóbbi abban a magasságban helyezkedik el, ahol maguk a lakók is mozognak, ezért az így rájuk ható hideg levegő beáramlását nem hagyhatjuk figyelmen kívül. Mivel a levegő bevezetése a minél nagyobb használható magasság elérése érdekében a talajszinthez a lehető legközelebb kerül kialakításra, a hóhatár és a csapóeső jelenségével is foglalkoznunk kell. A közvetlenül a külső térből történő levegő bevezetése nem egy egyedi és eddig megoldatlan problémakör, hiszen a zárt égésterű gázfogyasztók is a külső térből nyerik az égéshez szükséges levegőt. Kialakításuk logikáját követve eredményre juthatunk az általunk vizsgált problémában is, de természetesen más itt más léptékben kell gondolkodnunk.

A kürtőhatás jelensége nem csupán a magas épületek lépcsőházaiban, kéményeiben léphet fel. A téma teljes körű kifejtéséhez hozzátartozik a kéthéjű homlokzat működésének vizsgálata, és az így fellépő energia megtakarítási lehetőségek elemzése. A kéthéjű üvegszerkezetek alkalmazása esetén körültekintő tervezéssel a homlokzat az épület légtechnikai rendszerébe integrálható, ezáltal az egyszerű hőszigetelő térelhatároló funkció túl összetettebben is hozzájárulhat az épület energiafogyasztásának csökkentéséhez, például a bevezetett friss levegő előmelegítésével. Emellett lehetőséget biztosítanak a természetes szellőzésre – ezáltal szintén csökkentve a működési költségeket – olyan körülmények között is, ahol akusztikai szempontból, vagy a nagy épületmagasság miatti nagy szélnyomás miatt nem lenne erre lehetőség. [16]

A munkánk során feldolgozott téma rendkívül sokrétű, sokféle nézőpontból vizsgálható. Ennek ellenére bízunk benne, hogy sikerült egy általános, átfogó képet adni a kürtőhatásról.

6. Forrásjegyzék

- [1] Renewableenergyworld.com
Solar Updraft Towers: Variations and Research
<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2008/10/solar-updraft-towers-variations-and-research-53742>
- [2] Energy Vanguard Blog
Heat Rises...and Falls – Stack Effect, Air Movement, & Heat Flow
<http://www.energyvanguard.com/blog-building-science-HERS-BPI/bid/50616/Heat-Rises-and-Falls-Stack-Effect-Air-Movement-Heat-Flow>
- [3] Wikipedia.com
Solar updraft tower
http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_updraft_tower
- [4] Wikipedia.com
Stack Effect
http://en.wikipedia.org/wiki/Stack_effect
- [5] The University of Hong Kong
Air Movement and Natural Ventillation
<http://www.arch.hku.hk/teaching/lectures/airvent/sect03.htm>
- [6] Journal of Solar Energy Engineering
Design of Commercial Solar Updraft Tower Systems—Utilization of Solar Induced Convective Flows for Power Generation
http://vortexengine.ca/Links/SBP_2005.pdf
- [7] Youtube.com
Stack effect problem
<http://www.youtube.com/watch?v=UvKzuKCCicY>
- [8] Wayne State University
<http://www.eng.wayne.edu/legacy/forms/4/coefficient.gif>
- [9] Wordpress.com: Hydraulic Structures (PARTII)
<http://mag1343.files.wordpress.com/2013/04/revision-notes-on-bernoullis-application.pdf>
- [10] Building and Environment
Characteristics of pressure distribution and solution to the problems caused by stack effect in high-rise residential buildings
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132305002751>
- [11] Arpapress.com
Stack ventilation strategies in architectural context: A brief review of historical development, current trends and future possibilities
http://www.arpapress.com/Volumes/Vol11Issue2/IJRRAS_11_2_14.pdf

- [12]** Southwest Windpower
http://www.soselectronic.hu/a_info/resource/j/AIR40.pdf
- [13]** Zöld András
Épületenergetika jegyzet
Debreceni Egyetem
- [14]** One in a Billion Blog
Expensive energy
<http://oneinabillionblog.com/summary-2/collapse/expensive-energy/>
- [15]** Wikipedia.com
Total Energy Consumption by Source
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Total_World_Energy_Consumption_by_Source_2010.png
- [16]** Gelesz Adrienn
A kéthéjű üveghomlokzatok vizsgálata