



---

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDÁSDÁSTUDOMÁNYI EGYETEM  
ÉPÍTÉSZMÉRNÖKI KAR

**ASPECTS OF THE IMPROVED THERMAL MODELING OF  
TRADITIONAL DOUBLE-SKIN BOX TYPE WINDOWS**

**Kéthéjű történeti ablakok pontosabb hőtechnikai modellezésének  
egyres kérdései**

Tézisfüzet

Bakonyi Dániel  
okl. építészmérnök, tanársegéd

Témavezető:  
Dr. Becker Gábor

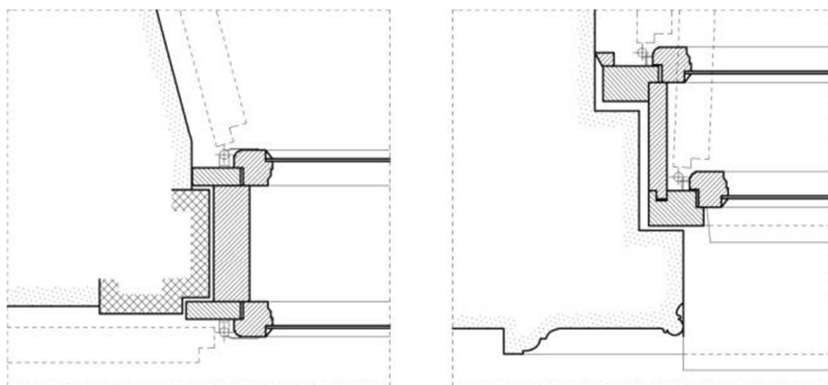
Épületeszerkezetani Tanszék

Csonka Pál Doktori Iskola

2016

## 1. Bevezetés

A legtöbb Közép-európai ablak a 19. század második felétől a 20. század közepéig kéthéjú, úgynevezett kapcsolt gerébtokos, esetleg pallótokos szerkezet (német szakkifejezéssel Kastenfenster). Jellemzően fából készültek, szárnyaikban egyrétegű üvegezéssel, melyek egy kb. 10-20 [cm] vastag légrést zárnak közre, ezzel növelve a hővezetési ellenállást. Ezek a szerkezetek egy több száz éves organikus szerkezetfejlődés eredményei és hatalmas előrelépést jelentettek a korábbi teljesen egyhéjú ablakokhoz képest mind hőszigetelés, mind hőkomfort tekintetében. Sok alváltozat ismert az ország, régió vagy akár az építés évtizede függvényében. A két rétegben elhelyezkedő szárnyaik nyílhatnak kifelé-befelé (pallótokos vagy külön külső-belső tokos ablakok) vagy csak befelé (kapcsolt gerébtokos ablakok), de a szerkezeti alapképlet (két széthúzott ablakréteg közé bezárt nagyméretű légrést) és a magas színvonalú kézműves technika, amit képviselnek, azonos.



1. ábra – tipikus 19. századi kéthéjú ablakok – sematikus vízszintes metszet

Az energiatakarékossági-klimavédelmi trendek kapcsán a közép-európai meglévő épületállomány nagyszámú ablakának korszerűsítése nehéz döntés elé állítja a szakembereket. A történeti ablakok ugyanis jelentősen hozzájárulnak ezen épületek építészeti karakteréhez így megtartásuk az esetek többségében preferált a cseréjükhöz képest. Hangsúlyossá tesz a témát a fenntarthatóság aktuális alapelvei, melyeket legegyszerűbben a három R (reduce-recycle-reuse) betűvel szokás jellemezni. Különösen így van ez a műemlékek esetében, ahol a formai szempontokon kívül a szerkezetében és anyagában is hiteles megőrzés követelménye párosul az energetikai teljesítmény növelésének szükségességével. Megjegyzendő, hogy a kéthéjú ablakok alkalmazása nemcsak a meglévő épületek, hanem – sajátos előnyeik miatt – az új fejlesztések fókuszában is megjelenik.

Az elmúlt évtizedekben a történeti ablakok felújítása számos kutatás és publikáció témája volt mind Közép-Európa szerte, mind másutt a világban. A 19. századi ablakok legfontosabb szerkezeti megoldásai, jellemző tönkremeneteli módjai és a felújításuk technikai mára már jól dokumentáltak különböző munkákban, lásd Neumann et al. [22], Gärtner et al. [16], Schrader [25] vagy Holste et al. [17], hogy csak néhányat említsünk. Azonban az ablakfelújításokat tervezők, még ha a legtöbb esetben specializálódott szakemberek is, jellemzően ökolétszabályokra és általános irányelvekre (mint a német “HO.09 Runderneuerung von Kastenfenstern aus Holz” [27] vagy [11]) alapozzák a munkájukat. A leegyszerűsítő alapszabályok és irányelvek szükségszerűen csak a legáltalánosabb esetekkel foglalkozhatnak és adhatnak közelítő megoldásokat. Továbbá, bár majd mindegyik ablakfelújítással foglalkozó publikáció érinti valamilyen módon a hőtechnika kérdéskörét is, ezt általában kissé elnagyoltan, nem rendszerszerűen teszi. A tervező sokszor csak néhány konkrét megoldást

talál a hőtechnikai felújításra, ami nem teszi lehetővé az adott szituációra történő optimalizálást.

A meglévő értékes ablakszerkezetek megőrzésének egyik előfeltétele, hogy felújításukat vagy átalakításukat ugyanolyan pontossággal és részletességgel legyünk képesek megtervezni, mint az új nyílászárókat. Az épületfizika területén ez olyan feladatokat jelent, mint a pontos hőátbocsátás számszerűsítése, a téli vagy éves energiamérleg vizsgálata, vagy éppen az üvegek közötti kondenzáció veszélyének megítélése. Ezek egyike sem egyszerű feladat, mivel nagyon kevés jól dokumentált mérési eredmény áll rendelkezésünkre, és a legtöbb széles körben használt hőtechnikai ablakmodell és számítási módszer a kortárs iparosított ablakgyártás egyhéjú és hőszigetelő üvegekkel ellátott szerkezeteire lett kidolgozva. Ezek az ablakok jelentősen eltérnek a történeti kéthéjú szerkezetektől, ami legalábbis megkérdőjelezi a rájuk kidolgozott modellek pontosságát egy teljesen más szerkezetcsoportra történő alkalmazás esetén.

Ahhoz hogy ellenőrizzük a meglévő hőtechnikai és higrotermikus ablakmodelleket, ill. ahol szükséges, ott új modelleket vezessünk be, a kéthéjú történeti ablakok számítására egy átfogó és szisztematikus vizsgálatra van szükség, amelynek az alább felsorolt összes pontra ki kell térnie:

- a) meg kell vizsgálni az egydimenziós üvegek közötti hőtechnikai modellek hitelességét a hőszigetelő üvegekénél sokkal nagyobb vastagságú és alacsonyabb karcsúságú légrések esetén,
- b) meg kell vizsgálni az ablak-komponens hőtechnikai modellek képességét olyan ablakok pontos számítására, amelyek üvegek közötti légrésekben erősen többdimenziós konvektív és sugárzásos hőtranszport jelenségek alakulnak ki,
- c) meg kell vizsgálni az ablakszintű hőtechnikai jellemzőket az üvegezés és komponens részeredményekből számító egyenletek képességét kéthéjú ablakok pontos számítására,
- d) létre kell hozni és validálni kell olyan modelleket, amelyekkel számítható a nem hermetikusan zárt légrésekű kéthéjú ablakokban a transzmissziós hőátbocsátás és a konvektív hőtranszport egymásra hatása,
- e) meg kell vizsgálni, hogy milyen modellekkel és számítási eljárásokkal lehetséges az ablakbeépítési hőhíd pontos számítása, eltérő ablak opciók megbízható összehasonlítása,
- f) meg kell vizsgálni, hogy milyen modellek szükségesek a kéthéjú ablakok és beépítési hézagaik higrotermikus viselkedésének megbízható számításához,
- g) meg kell határozni az ablak energiamérleg számításnak a kéthéjú ablakokhoz és történeti épületekhez leginkább megfelelő módszertanát és meglévő hőtechnikai épületmodellekben el kell végezni az előző pontok alapján esetlegesen szükségessé váló korrekciókat.

A leírt átfogó vizsgálatok sikeres elvégzése nyomán olyan eszköztár állna rendelkezésünkre, mely lehetővé tenné a kéthéjú történeti ablakok felújításának tervezése során a lehetséges koncepciók között hiteles adatok alapján való objektív döntést és stratégiaalkotást. Mivel a kapcsolt gerébtokos és pallótokos ablakok csak egy adott európai régió jellemző szerkezetei, és a hőtechnikai modellezésük is viszonylag kevés kutató számára vonzó terület, így az előbbihez hasonló komplex vizsgálat eddig még nem készült. Több különálló tudományos munka foglalkozott már kéthéjú ablakok hőtechnikájával, de egyikben sem található a hőtechnikai ablakmodellek ilyen szerkezetekre való használatának tudományos alaposságú elemzése. Két munka, Holste et al. [17] és [24] is bemutat hőátbocsátás méréseket, de azokat nem használja fel validációra, és azok nem kellő részletességgel dokumentáltak ahhoz, hogy

felhasználhatóak lennének. Homb et al. [18] talán az egyetlen forrás, ahol egymás mellett szerepelnek mérési és számítási eredmények kéthéjú ablakokra. A szerzők igen jó egyezéstről számolnak be modell és mérés között, de sajnos publikációjuk szintén nem elég részletes ahhoz, hogy eredményeik reprodukálhatóak legyenek. A kéthéjú európai ablakokkal analóg szerkezet az angolszász „storm window”, melyekre Smith et al. [26] mutat be méréseket Homb et al.-al hasonló eredményekkel és hiányosságokkal. Egy rövidebb módszertani útmutató kéthéjú ablakok hőtechnikai modellezésére Laustsen et al. [20] publikációjában található, amely azonban semmilyen validációt és részletes elméleti levezetést nem tartalmaz. Brandl és Ruisinger CFD modell vizsgálatai [21] szintén említésre méltóak, de csak kvalitatív jellegűek és ugyancsak nélkülözik a validációt. Szinte az összes többi publikáció az ablakfelújítás szerkezeti megoldásaira, a felújítással elérhető energia megtakarításokra vagy a műemlékvédelem kérdéseire koncentrál, és mint ilyen, az ablakok hőtechnikai modellezését nem teszi vizsgálat tárgyává, hanem eszközként használja.

A kéthéjú történeti ablakok hőtechnikai modellezésének vizsgálatához, pontosságának esetleges javításához olyan átfogó elemzésre van szükség, mely felhasználja a szakirodalomban fellelhető minden eszközt és meglévő eredményt, és a nyílászáró hőtechnikai modellezés elméletének céltudatos elemzésével egészíti ki azokat. Az összes korábban felsorolt kérdéskör vizsgálata messze meghaladja egyetlen doktori dolgozat kereteit. A feladatot több kezelhető méretű és egymásra épülő szakaszra kell bontani. Ennek a dolgozatnak a célja csak az első lépések megtétele lehetett. A disszertáció részletesen foglalkozik az a) b) és c) pontokkal, az ablak hőátbocsátási tényező számítás fő lépcsőivel valamint az e) és g) pontokkal, vagyis a beépítési hőhidak figyelembevételével és az energiamérleg számítás és koncepcióalkotás módszereivel. A d) és f) lépések, tehát a nem hermetikusan zárt légrések és a higrotermikus viselkedés kérdései, csak érintőlegesen szerepelnek. Ezek részletes feldolgozása a jövő feladata, amire azonban nem lenne lehetőség, ha az a) b) c) pontok előzetes áttekintése nem történt volna meg.

## 2. Az értekezés új tudományos eredményei

### I. Tézis: Ablakok termikus modelljei és almodelljei, a szabványos számítási módok érvényességi körének vizsgálata kéthéjú ablakok esetében

Az ablakok számítására számos hőtechnikai tervező eszköz (modellek, szoftverek, stb.) áll a tervezők rendelkezésére, amelyek alapvetően két, egy európai<sup>1</sup> és egy észak-amerikai<sup>2</sup>, szabványsorozaton nyugszanak. Az ezekbe foglalt modelleket azonban kortárs egyhéjú ablakokra fejlesztették ki, hiszen ezek kaphatók ma a piacon, ezek kerülnek nagy számban betervezésre. Annak érdekében, hogy ezek a modellek, számítások minél egyszerűbbek és jól kezelhetők legyenek, egy sor egyszerűsítés van bennük, amiket a kortárs ablakszerkezetek hőtechnikai működésének ismerete tesz lehetővé. Az így előálló egyszerűsített számítási eljárások tehát számos implicit feltételezést tartalmaznak, amelyek nem lelhetőek fel teljes körűen a szabványokban, mint ahogy a megalapozó tudományos kutatásokra sincs bennük utalás. Mivel a szabványok nem határolják le ezen számítások érvényességi körét, jogosan merül föl az a kérdés, hogy alkalmazhatók-e egyáltalán kéthéjú ablakok számítására?

A kérdés megválaszolása érdekében a szabványban alkalmazott modellek gondos elemzése, valamint a vonatkozó szakirodalom alapos áttekintése alapján feltártam, hogy a szabványos egyszerűsített hőtechnikai ablakmodellek fő feltételezései a következők:

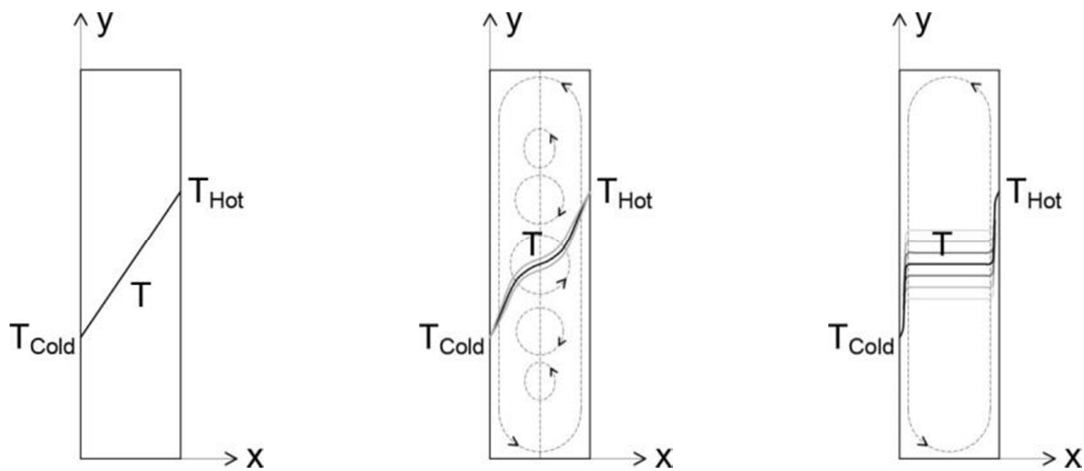
- az ablakok üvegezett részén az üvegezés légréseiben a hőátadás jó közelítéssel egydimenziós,
- az üvegezés légréseiben a természetes áramlás az úgynevezett hővezetési vagy átmeneti zónákban van,
- a hőmérsékletretegződés az üvegezés légréseiben – ha jelentkezik egyáltalán – minimális, a légrés legtetejére és legaljára koncentrálódik, és a konvektív hőátadást nem befolyásolja olyan mértékben, hogy a hőáramok többdimenziós modellezése válna szükségessé,
- a hőmérsékletmező az üvegezés légréseiben közelítően kielégíti a Laplace egyenletet,
- az oldalirányú hővezetés az üvegezés, a légrés, valamint a keret/szárny szerkezet között minimális és az üvegerem keskeny zónájára koncentrálódik.

Mindezeket összevetve a kéthéjú ablakok közismert jellemzőivel a következő tézisértékű megállapításokra jutottam melyeket a Bakonyi és Becker [3] valamint a Bakonyi és Dobszay [7] cikkekben publikáltam:

***I. a) A vonatkozó szabványokban foglalt modellek és a szakirodalom részletes elemzése alapján feltártam, hogy melyek azok az implicit feltételezések (és ezek tudományos alapjai), amelyekre az ablakok termikus modellezésére vonatkozó szabványokban foglalt egyszerűsítések épülnek, és hogy ezek döntőnek tekinthetők a számítások érvényességi körének szempontjából.***

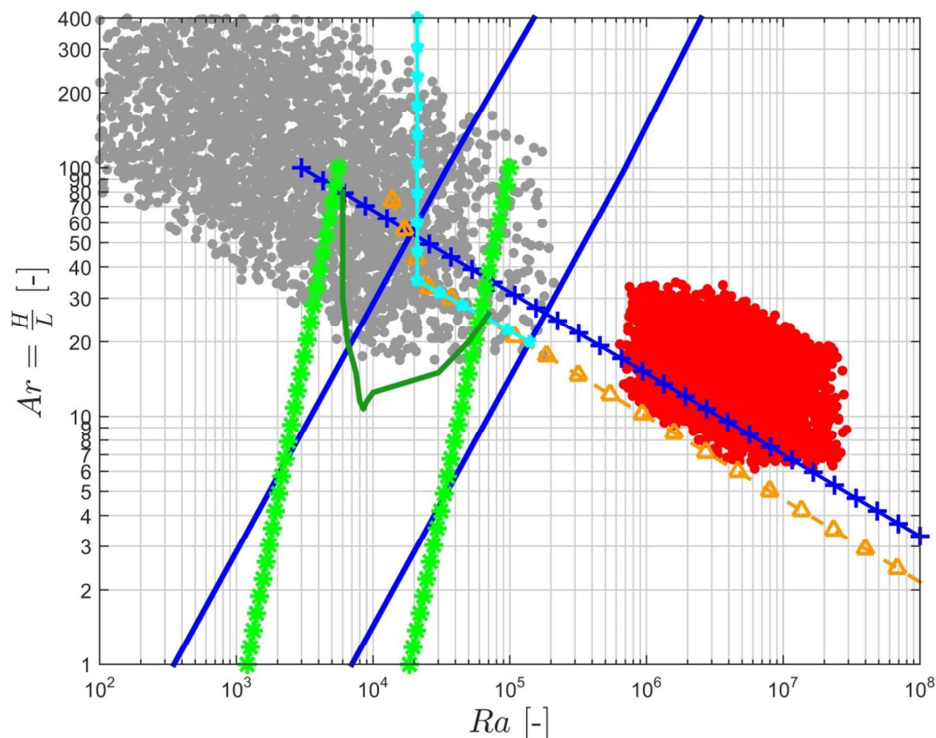
<sup>1</sup> EN 410 [12], 673 [13], 1077-1 [14], 1077-2 [15]

<sup>2</sup> ISO 15099 [19], NFC 100-2010 [23]



2. ábra – a természetes konvekció és hőmérséklet mező a hőszigetelő üvegekre jellemző hővezetés (balra) és átmeneti (középen), valamint a történeti kéthéjú ablakoknál várható határreteg (jobbra) zónáinak sematikus reprezentációja

*I. b) Összevetve a kéthéjú ablakok jellemzőit (elsősorban a légréteg eltérő mérete és függőleges karcsúsága következtében kialakuló turbulens határreteg-áramlás a zömében lamináris hővezetési, vagy átmeneti zónás áramlás helyett,) az előző pontban leírt implicit feltételezésekkel megállapítottam, hogy a kéthéjú ablakok kívül esnek a szabványos számítások elméleti érvényességi körén, és ez a tény a számítási módszerek fejlesztését, pontosítását teszi szükségessé.*



3. ábra – a közel téglalap alakú függőleges légrésekben kialakuló természetes áramlás típusa a Rayleigh-szám és a függőleges karcsúság függvényében

## II. Tézis - Új, dedikált korreláció kéthéjú ablakok légrésében lezajló konvektív hőcsere Nusselt-számának meghatározására a jellemző karcsúságok és Rayleigh-szám összefüggésében

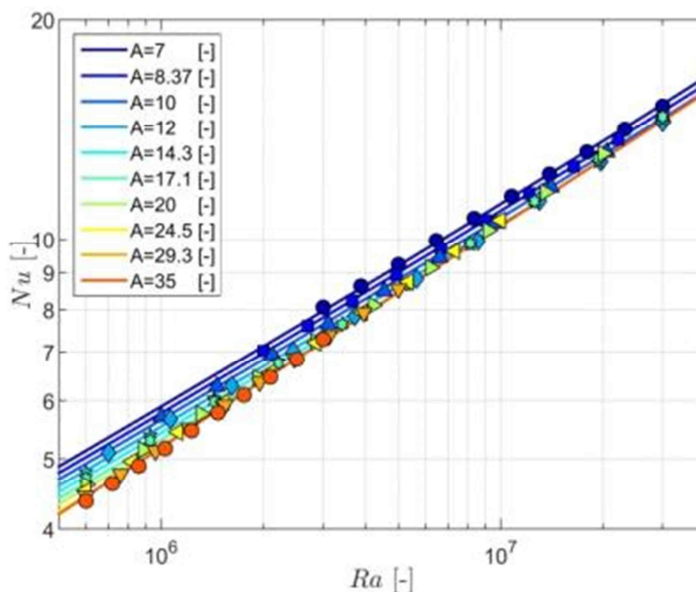
Monte Carlo-szimuláció segítségével meghatároztam, hogy mely függőleges karcsúsági és Rayleigh-számok fordulnak elő leggyakrabban a kéthéjú ablakok üvegek közötti légréseiben. Megvizsgáltam, hogy a szakirodalom szerint mely turbulencia-modellek a legalkalmasabbak ezen esetek CFD modellezésére. A többféle modell kipróbálása után kiválasztott  $k-\omega$  SST modell segítségével, annak szakirodalmi és saját mérési eredményekkel való összevetése után, paraméter vizsgálatot végeztem az ablaktípus légréseiben várható Nusselt szám karcsúság- és Ra-szám-függésének meghatározásához, egy olyan Nusselt szám korreláció megállapítása érdekében, ami kifejezetten az ilyen légrésekre optimalizált. A paraméter-vizsgálat nyomán megvizsgáltam a hőmérséklet rétegződést is a légrés tengelyében, az Ra-szám és a karcsúság függvényében, és kiderült, hogy a kapott eredmények segítségével további következtetést lehet levonni a vizsgált ablaktípus hőtechnikai viselkedéséről.

A Bakonyi és Dobszay [8] cikkben a következő eredményeket publikáltam:

**II. a) A kapcsolt gerébtokos ablakok jellemző karcsúság és Ra-szám tartományára, az erre leginkább alkalmas CFD modell segítségével elvégzett paraméter-vizsgálat eredményeihez illesztve az alábbi új empirikus korrelációt vezettem le az ablaktípus üvegek közötti légréseiben a Nusselt-szám közelítésére, amely a szakirodalomból ismert több hasonló összefüggéshez képest sokkal pontosabban kifejezi a Nu-szám karcsúság-függését adott Ra-szám mellett:**

$$Nu = \max \begin{cases} Nu_1 = 0.0776 Ra^{0.3041} \\ Nu_2 = 0.0193 (1 + Ra^{0.0897} Ar^{-0.0382})^{3.9826} \end{cases}$$

ahol: Nu [-] – a Nusselt szám  
Ra [-] – a Rayleigh szám a légrés vastagság (L) alapján számolva  
Ar [-] – a függőleges légrés karcsúság (Ar=H/L)



4. ábra – az új, kifejezetten a kéthéjú ablakok üvegek közötti légréseinek számítására optimalizált, Nusselt-szám korreláció, a levezetéséhez használt paramétervizsgálat eredményeivel összevetve

**II. b) A légrés tengelyében létrejövő hőmérséklet-rétegződés vizsgálata alapján megállapítottam, hogy a kéthéjú történeti ablakok légrései a határréteg zónán belül a rétegződés szempontjából egy átmeneti zónát képviselnek a közel négyzetes és a magas-keskeny légrések között: amíg az alacsony, kis függőleges karcsúságú légrésekben a dimenziótlan magassággal ( $y/H$ ) közel lineáris függőleges hőmérséklet-rétegződés alakul ki, addig a karcsúság növekedésével erősen csökken a rétegződés a középső szakaszon, és a légrés aljára-tetejére korlátozódik ( $0.1 < y/H$  és  $0.9 > y/H$  zóna). Az eredményeket az alábbi új, a dimenziótlan hőmérsékletre bevezetett korreláció közreadásával összegeztem, amelynek segítségével a továbbiakban egyszerűen becsülhető a történeti ablakok légréseiben létrejövő hőmérsékletmező és hőmérséklet-rétegződés:**

$$f = 0.5 + 0.8963 \cdot b + 0.0159 \cdot b^2 - 1.5771 \cdot b^3 - 0.0341 \cdot b^4 + 5.2452 \cdot b^5 \dots$$

$$- 0.0238 \cdot Ar \cdot b - 0.0010 \cdot Ar \cdot b^2 + 0.1176 \cdot Ar \cdot b^3 + 0.0025 \cdot Ar \cdot b^4 - 0.1282 \cdot Ar \cdot b^5$$

$$b = \left( \frac{y}{H} - 0.5 \right)$$

ahol:  $f$  [-] – a dimenziótlan hőmérséklet a légrés közepén:  $f = (T - T_{s,hideg}) / (T_{s,meleg} - T_{s,hideg})$   
 $Ar$  [-] – a dimenziótlan függőleges karcsúság ( $Ar = H/L$ )  
 $y$  [m] – az adott pont magassága a légrés alja felett  
 $H$  [m] – a légrés teljes magassága

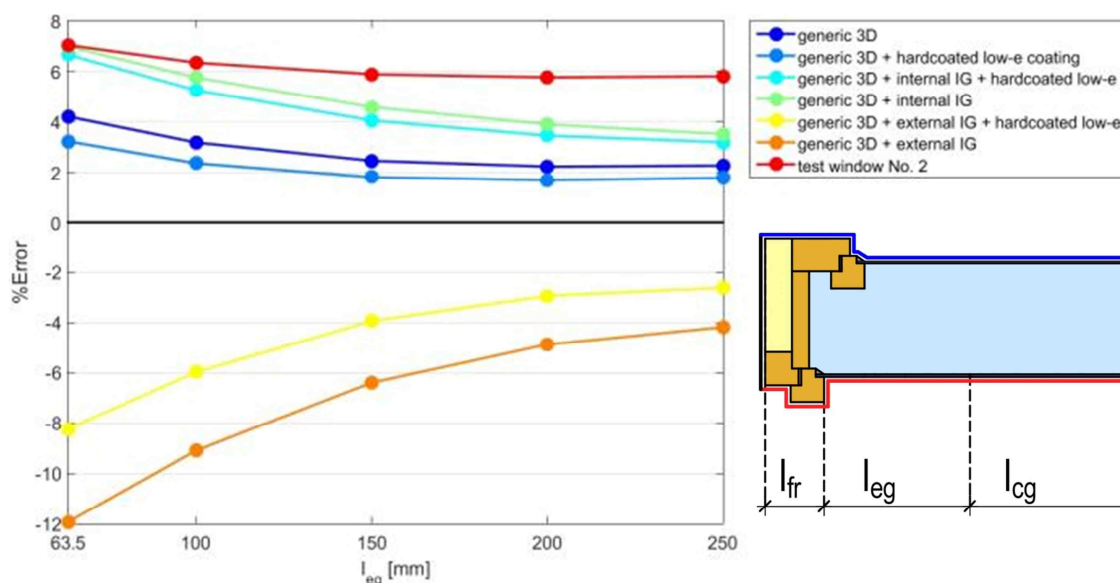
Ezt követően a paramétervizsgálathoz használt légrés CFD modellt kiegészítettem a teljes üvegezési rendszer figyelembe vételével (3 mm vtg. normál síküveg feltételezésével), a korábbi vizsgálatokhoz használt izoterm határfelületek helyett. Így az üvegezés felületén is lehetővé vált a hőmérsékletmező tanulmányozása ugyanannak a paraméterkészletnek a függvényében. Az eredmények azt mutatták, hogy a légrésben létrejövő hőmérséklet-rétegződés az üvegfelületen is erősen változó felületi hőmérsékleteket okoz. A felületi hőmérséklet-rétegződés a hideg oldalon a teljes dimenziótlan hőmérsékletkülönbség (az üvegnek a légrés felőli átlagos felületi hőmérsékletei közötti különbség)  $\pm 10\%$ -át is elérte (tehát leghidegebb pontja akár a teljes hőmérsékletkülönbség  $10\%$ -val alacsonyabb lehet a felület átlagánál), míg a meleg oldalon a  $\pm 20\%$ -ot. Ennek nagy jelentősége van az üvegek közötti felületi kondenzáció veszélyének megítélésére szempontjából.

**II. c) Bemutattam, hogy történeti kéthéjú ablakoknál az egy-dimenziós üvegezés hőtechnikai modellek által jóval átlagos üveg felületi hőmérsékletek akár az üvegek közötti légrés teljes hőmérsékletkülönbségének a hideg oldalon akár  $\pm 10\%$ -ával, a meleg oldalon akár  $\pm 20\%$ -ával eltérhetnek a valós minimum és maximum hőmérsékletektől, ami döntőnek bizonyulhat az üveg felületén kialakuló kondenzáció veszélye megítélésére szempontjából. Ez alapján megállapítottam, hogy az általánosan használt egyszerű egydimenziós üvegezés hőtechnikai modellek a függőleges hőmérséklet-rétegződés hatásának elhanyagolása miatt nem alkalmasak a kéthéjú ablakok megítélésére, mivel nem képesek meghatározni a felületi hőmérséklet minimum értékeit.**

### III. Tézis - A kéthéjú ablakok $U_w$ értékének számítási pontossága (szabványos 2D-s számítások, és valós 3D-s CFD szimulációk eredményeinek összehasonlítása)

A szakirodalomban közölt és szabványokba foglalt, a hőátbocsátás számítására szolgáló nyílászáró hőtechnikai modellek nem veszik figyelembe az üvegek közötti légrésekben a sugárzásos és konvektív hőátadás, valamint a bizonyos típusú természetes áramlásoknál létrejövő jelentős hőmérsékletretegződés eredendően többdimenziós jellegét. Az elhanyagolás hatásának vizsgálatára háromdimenziós modelleket készítettem több leegyszerűsített, valamint kontrollként egy valódi komplex, kapcsolt gerébtokos ablak geometriára. A geometriai modellek felhasználásával összehasonlítottam a szabványos hőátbocsátás számításokat, a szabvány módszerét 3D-s modellezéssel kiegészítő számításokat, valamint 3D-s CFD szimulációk eredményeit felújítatlan, és módosított üvegezéssel esetekre egyaránt. A szabványos számításokat mind eredeti formájukban, mind a II.a) pontban bemutatott javított Nusselt-szám korrelációval is elvégeztem. A szabványos számítás, mely pusztán 1 és 2D-s szimulációk eredményéből számít egy képlet segítségével 3D-s  $U$  értéket nem képes nagy hibák nélkül visszaadni a 3D-s hőáramokat. A számítási eredmények pontosságát úgy lehetett növelni, hogy a 2D ablak-komponens szimulációkban megnöveltem az üvegerem mező szélességét, ezzel jobban lekövetve legalább a 2D-s hőáramokat az üvegerem mező hőátbocsátási tényezőjében. Az üvegerem mező szélességét változtatva megállapítható, hogy melyik az a minimális szélesség ahol a számítás már a mező szélességtől független eredményt ad.

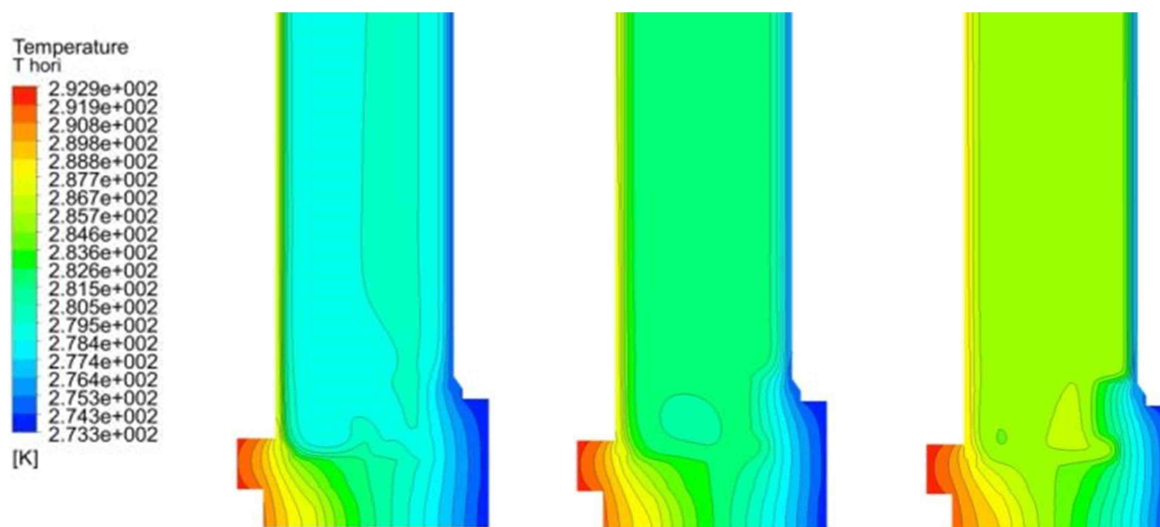
A szabványos számítások és a CFD szimulációk eredményeinek összevetésénél az előbbieknél hibája erősen függ az ablak üvegezésének felépítésétől: módosítatlan üvegezés esetén relatíve jobb, míg hőtechnikailag javított (keménybevonatos low-e vagy vékony hőszigetelő) üvegezés használata esetén rosszabb egyezést lehet tapasztalni. A Nusselt-szám számítására használt korrelációt lecserélve a szabványos számítási módszerben a pontosság nem minden esetben növekszik. Az a tény, hogy a  $Nu$  korreláció, mint egyik potenciális hibaforrás eltávolítása esetén a számítási hiba bizonyos esetekben még növekszik is, egyértelműen arra utal, hogy több tényező együttesen okozza az egyszerű számítási módszer hibáját. A szabványos módszer ezért nem pontosítható kéthéjú történeti ablakok számítására pusztán az üvegek közötti légrések egyenértékű hővezetési tényezőjét számító algoritmus módosításával.



5. ábra – hiba % kéthéjú ablakok számított  $U_w$  értékében 2 és 3D hőtechnikai számítások között különféle üvegezések esetében,  $l_{eg}$ , az üvegerem mező szélességének függvényében

A Bakonyi és Becker [9] cikkben a következő eredményeket publikáltam:

**III. a) Elvégeztem a szabványos, csak hővezetés modellezésre épülő, ennek háromdimenziós kiterjesztése, valamint a komplex térbeli CFD és hőtranszport ablak hőátbocsátás modellek összehasonlítását mind leegyszerűsített, mind realizisztikus kapcsolt gerébtokos ablak geometria esetére, a szabványos és az előző pontban javasolt javított Nusselt szám korrelációk mellett. Ennek alapján megállapítottam, hogy a kéthéjú ablakok esetében az NFRC 100-2010 / ISO 15099 szabványban definiált üvegperem mező szélesség nem alkalmas a 2D-s hőáramok lekövetésére sem, ami nagy hibákat eredményez a 3D-s számításokkal összehasonlítva. Megállapítottam, hogy az üvegperem mező szélességét a szabványos 63.5 [mm]-ről legalább 200 [mm]-re kell megnövelni, hogy az üvegperem szélességétől független eredményt kapjunk.**



6. ábra – CFD szimulációk: hőmérséklet mező az ablak vízszintes metszetei mentén különböző magasságokban ( $y/H=0.1, 0.5, 0.9$  [-])

**III. b) Az előző pontban említett hőátbocsátási tényező számítási módszerek összehasonlításával megállapítottam, hogy:**

- Az NFRC 100-2010 / ISO 15099 szabványokra épülő számítási módszerek alkalmazásával kapott hőátbocsátási tényező kéthéjú történeti ablakokra korábban ismeretlen pontossága  $\pm 10\%$ -on belüli a valós (3D-s CFD szimulációval nyerhető) értékekhez képest. A szabványok alkalmazása tendenciózusan a hőátbocsátás túlbecsüléséhez vezet.
- A számítás pontossága a 2D komponens modellek és  $U_w$  egyenlet alkalmazása helyett 3D-s hőtechnikai modellezéssel jelentősen javítható.
- Az NFRC 100-2010 / ISO 15099 szabványokra és a javított Nusselt-szám korrelációra épülő számítási módszer felújított ablakok esetén pontosabb számításokat tesz lehetővé; azonban felújított, jobb hőszigetelésű üvegezési variációk esetén jellemzően alulbecsüli a hővesztéseket. Az, hogy a CFD szimulációk konvektív hőátadását jól visszaadó javított Nusselt-szám korreláció alkalmazása csak bizonyos esetekben vezet a hiba csökkentéséhez egyértelműen mutatja, hogy más hibaforrások is jelentősek a számításban. Ennek alapján megkérdőjelezhető, hogy a számítási módszerben pusztán a légrés egyenértékű hővezetési tényezőjének korrekciójával tovább növelhető lenne a számítási pontosság.

#### IV. Tézis - Az ablak beépítési módjának figyelembevétele a külső falak nemismétlődő hőhidjainak egyszerűsített számítása során

Az ablakok beépítési hézaga mentén a külső falazattal való csatlakozás miatt kialakuló hőhidak erős összefüggésben vannak az ablak szerkezetével és hőtechnikai tulajdonságaival. Eltérő ablak opciók energetikai összehasonlításánál elengedhetetlen a beépítési hőhidak miatti hőveszteségek számítása, mivel az eltérő tendenciákat is mutathat, mint magának az ablaknak az  $U_w$  értéke (lásd Bakonyi és Becker [1]). Az ablakbeépítési hézag hőhidjának és a többi jellemző, nemismétlődő hőhidnak a teljes külső tételhatároló szerkezet (homlokzat) hőátbocsátására való hatása elemzéséhez létrehoztam egy új, egyszerűsített empirikus modellt a jól tipizálható homlokzatú épületekre. Ennek során egy jellemző épület-geometriai szituációkat generáló algoritmus segítségével lefuttatott, több százezer automatizált, részletes hőtechnikai számítást tartalmazó sorozat eredményeképpen kimutattam, hogy a hőhidak egyszerűsített figyelembevételéhez használt hőátbocsátás-korrekciós tényező a hőhidak fajlagos hosszával az adott épülettípusra, szerkezeti megoldásra, és hőszigetelés vastagságra jellemző lineáris összefüggést mutat. A jelenlegi nemzeti hőtechnikai rendelet [10] a nemismétlődő hőhidak egyszerűsített figyelembevételét lehetővé tévő, diszkrét értékeket előíró módszere képes jelentősen alul-, de akár felülbecsülni is ezen hőhidak hatását. Mivel a meglévő épületek hőszigetelését segítő állami támogatásokra irányuló pályázatok jelenleg nem ritkán ezzel a meglehetősen pontatlan közelítéssel vannak alátámasztva, nemzetgazdasági érdekként merül föl egy olyan új hőhidkorrekciós tényező létrehozása, ami egy adott épülettípus esetén a szerkezet és a geometria részletes ismerete nélkül is megbízhatóan pontos eredményekkel szolgál.

A megfelelően pontos egyszerűsített számítási módszer létrehozásának feltétele a legfontosabb befolyásoló tényezők azonosítása, így a szükséges számítási paraméterek számának, és a számítás nehézségének a minimalizálása a részletes számításokhoz képest. Ennek alapján megvizsgáltam az új javasolt számítási módszer finomításának lehetőségét, az ablak- és beépítés típus hatását a hőhidkorrekciós tényező értékére és azt jelentősnek találtam. Az ablakbeépítési hőhid hatása a nagy számú lehetséges szerkezeti variációnak köszönhetően túlzottan megnehezíti bármilyen egyszerűsített, mégis elfogadható pontosságú hőhidkorrekciós módszer bevezetését. További probléma, hogy az ablak- és az ablakbeépítés típus matematikailag nehezen leírható paraméter (ellentétben például a hőszigetelés vastagságával), és nem lehetséges egyszerű interpoláció az egyes esetek között. Ez a felismerés vezetett a javaslatomhoz, hogy az ablakbeépítés hőhidat érdemes eltávolítani a falazat hőhidkorrekcióját befolyásoló elemek közül, és azt az ablak ún. beépített állapotban vett hőátbocsátási tényezőjében célszerű figyelembe venni.

Eredményeimet a Bakonyi [2], Bakonyi és Dobszay [4] valamint a Bakonyi és Dobszay [6] cikkekben tettem közzé, és a következő pontokban foglalhatóak össze:

***IV. a) Létrehoztam és demonstráltam egy új egyszerűsített módszert a jól tipizálható homlokzatú és szerkezetű épülettípusok nem ismétlődő homlokzati hőhidjainak egyszerűsített figyelembevételére, mely a jelenlegi nemzeti épületenergetikai jogszabály egyszerűsített módszerénél sokkal nagyobb pontosság elérésére képes a számítás összetettségének csekély mértékű növekedése mellett. A módszer alapján megalkotott összefüggéseket 3 különböző korszakra jellemző, széles körben elterjedt épülettípusra vezettem le és teszteltem (eklektikus belvárosi "bérház", kertvárosi "kockaház", 60'-as évekbeli nagyblokkos társasház).***

**IV. b) Az előző pontban leírt új, egyszerűsített módszer nagyszámú alkalmazásának kiértékelése nyomán rámutattam, hogy az ablak beépítési hőhidjait nem a külső falak  $U$  értékének korrekciójával, hanem az ablakot és beépítési hőhidjait együttesen tartalmazó  $U_{w,inst}$  értékkel célszerű figyelembe venni. Csak így biztosítható, hogy az eltérő ablak opciók közötti tényleges hőátbocsátásbeli különbség nagy számítási hibák nélkül kimutatható legyen a teljes homlokzat hőhidakkal korrigált  $U$  értékének újraszámítása nélkül, valamint hogy az előző pontban javasolt egyszerűsített módszer pontossága és bemenő paramétereinek száma optimális maradjon. Az előző pontban bemutatott 3 jól tipizálható épülettípuson demonstráltam, hogy az így továbbfejlesztett módszerrel jelentős mértékű további számítási egyszerűsítés és pontosság érhető el.**

$$U_{w,inst} = \frac{A_w U_w + \sum_{i=1}^n l_i \Psi_{install,i}}{A_w}$$

ahol:  $U_{w,inst}$  [W/m<sup>2</sup>K] – a beépítési hőhidakkal korrigált hőátbocsátási tényező  
 $A_w$  [m<sup>2</sup>] – az ablak felülete  
 $U_w$  [W/m<sup>2</sup>K] – az ablak szabványos hőátbocsátási tényezője  
 $l_i$  [m] – az  $i$ -edik beépítési hőhid hossza  
 $\Psi_{install,i}$  [W/mK] – az  $i$ -edik beépítési hőhid vonalmenti hőátbocsátási tényezője

$$\dot{Q}_{trans} = \sum_{p=1}^z A_p U_p \left( 1 + \chi_{new,p} \left( \frac{\sum l_{tb}}{A_p}, \dots \right) \right) + \sum_{k=1}^q A_{w,k} U_{w,inst,k} + \sum_{j=1}^m l_j \Psi_j$$

ahol:  $\dot{Q}_{trans}$  [W/K] – a termikus épületburok teljes transzmissziós hőátbocsátási tényezője  
 $A_p$  [m<sup>2</sup>] – a  $p$ -edik opak térelhatároló szerkezet felülete  
 $U_p$  [W/m<sup>2</sup>K] – a  $p$ -edik opak térelhatároló szerkezet hőátbocsátási tényezője  
 $\chi_{new,p}$  [-] – a  $p$ -edik opak szerkezet hőhidkorrekciója az új módszer szerint számolva  
 $A_{w,k}$  [m<sup>2</sup>] – a  $k$ -edik ablak felülete  
 $U_{w,inst,k}$  [W/m<sup>2</sup>K] – a  $k$ -edik ablak beépítési hőhidakkal korrigált hőátbocsátási tényező  
 $l_j$  [m] – a  $j$ -edik lábazat/pincefal csomópont hossza  
 $\Psi_j$  [W/mK] – az  $j$ -edik lábazat/pincefal vonalmenti hőátbocsátási tényezője

## V. Tézis - Kéthéjú történeti ablakok felújítási koncepciójának optimalizálását alátámasztó energiamérleg számítások

A történeti épületek kéthéjú ablakainak felújítása során gyakori probléma, hogy a szóba jöhető beavatkozások közötti tervezői döntések nincsenek megfelelő pontosságú energiamérleg számításokkal alátámasztva. Egy valós tervezési feladat kapcsán elvégzett vizsgálatok, kifejlesztett saját szoftver és további tervezési tapasztalatok eredményeit a Bakonyi és Dobszay [5] cikkben publikáltam. A szakirodalom vizsgálata alapján meggyőződtem arról, hogy legalább helyiség léptékű dinamikus szimulációk szükségesek ahhoz, hogy a történeti ablakok felújítási koncepciója során a lehetséges alternatívák energetikai összehasonlítása releváns eredményeket szolgáltatson. Egy teljesen új program létrehozására meglévő szoftverek használata vagy módosítása helyett a dolgozat eddigi eredményei, valamint a jövőbeni kutatási eredmények könnyű integrálhatósága, valamint egy dedikált történeti nyílászáró tervező program fejlesztésének megalapozása miatt volt szükséges. Eredményeim a következő pontokban foglalhatóak össze:

*V. a) Ablak energiamérleg számítások futtatása és egyedi algoritmusok tesztelése céljából létrehoztam egy új egyzónás dinamikus épületenergetikai szimulációs programcsomagot, EPICAC BE, mely kifejezetten történeti épületek és kéthéjú ablakok modellezésére optimalizált. A programot a kéthéjú ablakok viselkedésének előző tézisekben ismertetett modelljeire építettem, és az IEA BESTEST termikus épületmodellezési teszt szimulációk és különböző nemzetközileg elismert analóg programok eredményeivel való összehasonlítással validáltam. Az új program teljesítette a validációs teszt összes vonatkozó előírását.*

*V. b) Az új program segítségével bemutattam, hogy a konkrét szituációktól függően lehetséges olyan alternatív termikus ablakfelújítási csomagok kidolgozása (például nagyobb hőátbocsátású, de nagyobb g-értékű üveg használata dinamikusan vezérelt üvegek közötti árnyékolókkal kombinálva), amelyekkel a hőszigetelő üvegezéssel elérhetőnél is jobban csökkenthetjük mind az éves, mind a szezonális (fűtési és hűtési) energiaigényt. Ez a módszer lehetővé tette egy konkrét magyar műemléki épület ablakfelújításának tervezése során olyan koncepció kialakítását, amely jobban ki tudta elégíteni a műemlékvédelem és a hőtechnikai optimalizálás csatolt követelményeit, mint a korábban megszokott megoldások.*

*V. c) Az előző pontban említett tervhez készített modellek részletes szenzitivitás vizsgálatával kimutattam, hogy mind a fűtési, mind a hűtési számított hőigény erősen függ a szerkezeti és környezeti hatásokon túl több, az épülethasználatot és felhasználói szokásokat leíró paraméter bizonytalanságától. Bár ez a tény erősen korlátozza az igazán pontos energiaigény számítások készítésének esélyeit, a bizonytalan tényezők hatásának közel-lineáris és monoton volta mégis lehetővé teszi az egyes felújítási scenáriók közötti relatív sorrend és a nettó energiaigény megtakarítás százalék konzisztens meghatározását.*

*V. d) Az előző pontokban leírtak felhasználásával létrehoztam egy új módszertani útmutatót értékes és megtartandó történeti ablakok komplex felújításának előkészítési, tervezési, valamint kiértékelési fázisára, mely az általános gyakorlaton túlmenően többek között tartalmazza az energetikai számítások javasolt metodikáját, és a számítások pontosításához szükséges adatok felmérését is. Rámutattam, hogy a hazánkban és nemzetközileg eddig legtöbbször használt tervezési módszerek és elvek nem vezetnek szükségszerűen optimális megoldások létrejöttéhez. A megfelelő tervezési módszertan használata és az épületenergetikai szimulációk lehetőségének kihasználása olyan új, kedvezőbb felújítási módok kidolgozását is eredményezhetik, amelyek elkerülhetővé tehetik a meglévő ablakállomány akár csak részleges irreverzibilis károsítását is.*

### 3. Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretnék köszönetet mondani minden kollégámnak minden segítségükért és támogatásukért, különös tekintettel témavezetőmnek Dr. Becker Gábornak, valamint Dr. Dobszay Gergelynek.

Szintén köszönet illeti Dr. Várfalvi Jánost és Orbánt Tamást az egyik tanszéki ablakon végrehajtott higrotermikus monitoring mérésért, mely bár végül tartalmilag nem fért bele ebbe a konkrét dolgozatba, segített elindítani a kutatásaimat, és jövőbeni publikációk tárgyát fogja képezni.

A CFD szimulációkkal kapcsolatos segítségéért Dr. Veress Árpádnak tartozom köszönettel a BME Vasúti Járművek, Repülőgépek és Hajók Tanszékén.

Az ÉMI Minőségellenőrző Innovációs Nonprofit Kft.-nél Papp Imrének és Sólyomi Péternek köszönöm a lehetőséget az Épületszerkezeti és Épületfizikai laborban végzett mérésekre, valamint az azokhoz adott sok segítséget. A próbatest ablakokért valamint a mérőberendezés szerkezeti elemeinek megépítéséért Vigh Károlynak és a Hofstädter Kft.-nek, az anyagi háttér megteremtéséért pedig az ODOO+ projektnek jár a köszönet (a "SolarDecathlon versenyen eredményes BME ODOOprojekt további hasznosításának vizsgálata " c. projekt, illetve az azt támogató „Új Széchenyi Terv ED\_13-1-2013-0005 programja” keretében).

### 4. A téziseket alátámasztó publikációim

- [1] Bakonyi D., Becker G. (2011) Kapcsolt gerébtokos ablakok hőátbocsátási tényezője a beépítés és a határoló szerkezetek figyelembevételével, In: Horváth S., Pataky R. (Eds.) II. Épületszerkezettani konferencia: épület- és szerkezetfelújítás, Department of Building Constructions, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary, 21-22. November 2011, pp. 10–18, ISBN: 978-963-313-043-8
- [2] Bakonyi, D. (2013) A hőhidak szerepe a megtartandó homlokzatú épületek energetikai felújításában, In Horváth, S., Pataky, R. (Eds.) IV. *Épületszerkezettani konferencia, Vízszigetelések*, Department of Building Constructions, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, Hungary, 19 November 2013, pp. 100–107, ISBN: 978-963-313-092-6
- [3] Bakonyi, D., Becker, G. (2014) Possibilities of simulations in the planning of the retrofit of historical double skin windows, *Advanced Materials Research Journal*, Vol. 899, pp. 155-160, DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.899.155
- [4] Bakonyi, D., Dobszay G. (2014) A proposed methodology for the improvement of the simplified calculation of thermal bridges for well typified facades, *Periodica Polytechnica, Civil Engineering*, Vol. 58, pp. 309–318, DOI: 10.3311/PPci.7215
- [5] Bakonyi, D., Dobszay, G. (2016) Simulation aided optimization of a historic window's refurbishment, *Energy and Buildings*, Vol. 126, pp. 51-69, Accepted for Publication, DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.05.005
- [6] Bakonyi, D., Dobszay, G. (2016) Simplified calculation of non-repeating thermal bridges of the typical Central-European small suburban houses, *Pollack Periodica*, Accepted for Publication
- [7] Bakonyi, D., Dobszay, G. (2016) Thermal models for box type windows – Part 1: A review of the flow characteristics and convective heat transfer calculation of very large glazing cavities, *Periodica Polytechnica-Architecture*, Accepted for Publication
- [8] Bakonyi, D., Dobszay, G. (2016) Thermal models for box type windows – Part 2: A new dedicated correlation for predicting convective heat transfer in the very large glazing cavities of box type windows, *Periodica Polytechnica-Architecture*, Accepted for Publication
- [9] Bakonyi, D., Becker, G. (2016) Evaluation of fenestration thermal transmittance calculations for historical double-skin box type windows, *Magyar Építőipar*, Accepted for Publication

## 5. További hivatkozások a tézisfüzetben

- [10] 7/2006 (V. 24.) (2006) Decree of Minister without portfolio about the determination of energy efficiency of buildings (in Hungarian) Hungarian Ministerial Decree
- [11] Benitz-Wildenburg, J. (2009) Energetische Sanierung von Kastenfenstern im Zeichen der EnEV, IFT Rosenheim, e-print: [https://www.ift-rosenheim.de/documents/10180/177163/FA\\_GET0910.pdf/c9b12b14-6d50-4bea-a71e-1e39289b8fcd](https://www.ift-rosenheim.de/documents/10180/177163/FA_GET0910.pdf/c9b12b14-6d50-4bea-a71e-1e39289b8fcd)
- [12] EN 410 (2011) Glass in building. Determination of luminous and solar characteristics of glazing
- [13] EN 673 (2011) Glass in building. Determination of thermal transmittance (U value). Calculation method
- [14] EN 10077-1 (2006) Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: General
- [15] EN 10077-2 (2012) Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames
- [16] Gärtner, M., Gerner, D. (1196) Historische Fenster. Entwicklung, Technik, Denkmahlpflege, Verlag Deutsche Verlags-Anstalt DVA, Stuttgart, ISBN: 3421031045
- [17] Holste, F., Urban, A., Wilken, M. (1996) *Erhaltung der Kastenfenster durch gezielte Verbesserungsmaßnahmen*, Report: Für das Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau (BM Bau), Bonn, IFT Rosenheim, ISBN: 978-3-8167-4778-9
- [18] Homb, A., Uvslok, S. (2012) Energy Efficient Windows with cultural value, Measurements and calculations, Technical Report, SINTEF Byggforsk
- [19] ISO 15099 (2003) Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations
- [20] Laustsen, J. B., Jensen, C. F., Svensdsen, S. (2007) Calculation procedures for determination of the energy performance of windows with large glazing distance, Report, Technical University of Denmark
- [21] Mach, T., Grobbauer, M., Götzhaber, W. (2013) Dankmalaktiv I – Sanierung alter, denkmalgeschützter Gebäude auf Aktivhausstandard?, Report, e-print: [http://www.get.ac.at/tl\\_files/Download/Endberichte/Publizierbarer\\_Endbericht\\_denkmalaktiv\\_I\\_31052013.pdf](http://www.get.ac.at/tl_files/Download/Endberichte/Publizierbarer_Endbericht_denkmalaktiv_I_31052013.pdf)
- [22] Neumann, H., Hinz, D., Müller, R., Schulze, J. (2003) *Fenster im Bestand - Grundlagen der Sanierung in Theorie und Praxis*, Expert Verlag, 1. Edition, ISBN: 3-8169-2203-1
- [23] NFRC 100-2010 (2010) Procedure for Determining Fenestration Product U-factors
- [24] Pilkington (1997) Sanierung von Verbund- und Kastenfenster mit K-GLAS, Technical information brochure
- [25] Schrader, M. (2001) *Fenster, Glas und Beschläge als historisches Baumaterial*, Anderweit Verlag GmbH, Suderburg-Hösseringen, ISBN: 3-931824-04-7
- [26] Smith, N. (2012) Thermal performance of secondary glazing as a retrofit alternative for single-glazed windows, Energy and Buildings, Vol. 54, pp. 47-51, DOI: 10.1016/j.enbuild.2012.07.038
- [27] Verband Fenster und Fassade (VFF) (2003) HO.09 Runderneuerung von Kastenfenstern aus Holz, Report