



---

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDÁSDÁSTUDOMÁNYI EGYETEM  
ÉPÍTÉSZMÉRNÖKI KAR

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

**Kéthéjű történeti ablakok hőtechnikai modellezése**

Tézisfüzet  
(Munkahelyi vitához)

Bakonyi Dániel  
okl. építésszámológép, tanársegéd

Témavezető:  
Dr. Becker Gábor

Épületeszerkezetek 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 azonban egy kb. 10-20 [cm] vastag légrést zárnak közre, ezzel növelve a hővezetési ellenállást. Ezek a szerkezetek egy több száz éves organikus szerkezetfejlődés végeredményei és hatalmas előrelépést jelentettek a korábbi teljesen egyhéjú ablakokhoz képest mind hőszigetelés, mind hőkomfort tekintetében. Sok eltérő alváltozat ismert az ország, régió vagy akár az építés évtizede függvényében. A két rétegben elhelyezkedő szárnyaik nyílhatnak kifelé-befele (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 szintű kézműves technika, amit képviselnek, azonos. Ezek az ablakok jelentősen hozzájárulnak az épületek építészeti karakteréhez így megőrzésük fontos kérdés kell hogy legyen történeti épületek felújításánál. Az egyre magasabb hőtechnikai elvárások mellett ez egyben az energiamérlegük jelentős javítását is szükségelteti.

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. [19], Gärtner et al. [13], Schrader [22] vagy Holste et al. [14], hogy csak néhányat említsünk. Azonban az ablakfelújításokat tervezők, még ha a legtöbb esetben specializált szakemberek is, a legtöbb esetben ökölszabályokra és általános irányelvekre (mint a német "HO.09 Runderneuerung von Kastenfenstern aus Holz" [24]) alapozzák a munkájukat. A leegyszerűsítő alapszabályok és irányelvek szükségszerűen csak a legáltalánosabb esetekkel foglalkozhatnak és adhatnak közelítő megoldásokat. Továbbá bár majd mindegyik az 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 ablakszeretek megőrzésének egyik előfeltétele, hogy felújításukat vagy átalakításukat ugyanolyan pontossággal és részletességgel legyünk képesek megtervezni. 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 csupán 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 kifejlesztve. Ezek az ablakok jelentősen eltérnek a történeti kéthéjú szerkezetektől ami legalábbis megkérdőjelezi a rájuk kifejlesztett modellek pontosságát egy teljesen más szerkezetcsoporthoz.

Ahhoz hogy validáljuk 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 melynek az alább felsorolt összes pontra ki kell térnie:

- meg kell vizsgálni az egydimenziós üvegek közötti hőtechnikai modellek képességét a hőszigetelő üvegeknél sokkal nagyobb és alacsonyabb karcsúságú légrések számítására

- meg kell vizsgálni az ablak-komponens hőtechnikai modellek képességét olyan ablakok pontos számítására melyek üvegek közötti légrétegben erősen többdimenziós konvektív és sugárzásos hőtranszport jelenségek alakulnak ki
- meg kell vizsgálni az ablakszintű hőtechnikai jellemzőket az üvegezés és komponens részeredményekből számító egyenletek képességét kéthéjú ablakok pontos számítására
- létre kell hozni és validálni kell olyan modelleket melyekkel számítható a nem hermetikusan zárt légrétegű kéthéjú ablakokban a transzmissziós hőátbocsátás és a konvektív hőtranszport egymásra hatása
- meg kell vizsgálni, hogy milyen modellekkel és számítási eljárásokkal lehetséges az ablakbeépítési hőhíd pontos számítása, eltérő ablak opciók megbízható összehasonlítása
- meg kell vizsgálni, hogy milyen modellek szükségesek a kéthéjú ablakok és beépítési hézagaik higrotermikus viselkedésének megbízható számításához
- meg kell határozni az ablak energiamérleg számítás a kéthéjú ablakokhoz és történeti épületekhez leginkább megfelelő módszertanát és meglévő hőtechnikai épületmodellekben el kell végezni az előző pontok alapján esetlegesen szükségessé váló korrekciókat

Mivel a kapcsolt gerébtokos és pallótokos ablakok csak egy adott európai régi jellemző szerkezetei a hőtechnikai modellezésük is viszonylag kevés kutató számára vonzó terület, így egy az előbbihez hasonló komplex vizsgálat egyelőre még várat magára. Több különálló tudományos munka foglalkozott már kéthéjú ablakok hőtechnikájával, de egyikben sem található a hőtechnikai ablakmodellek ilyen szerkezetekre való használatának megfelelő, tudományos alaposságú elemzése. Két munka, Holste et al. [14] és [21] is bemutat hőátbocsátás méréseket de azokat nem használja fel validációra, és azok nem kellő részletességgel dokumentáltak hogy felhasználhatóak lennének. Homb et al. [15] 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 eredmények szintén nem elég részletesek ahhoz hogy modelljeik és eredményeik reprodukálhatóak legyenek. A kéthéjú európai ablakokkal analóg szerkezet az angolszász „storm window” melyekre Smith et al. [23] mutat be méréseket Homb et al.-al hasonló eredményekkel és hiányosságokkal. Egy rövidebb módszertani útmutató kéthéjú ablakok hőtechnikai modellezésére Laustsen et al. [17] publikációjában található, amely azonban semmilyen validációt és részletes elméleti levezetést nem tartalmaz. Brandl és Ruisinger CFD modell vizsgálatai (lásd [18]) 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 koncentrálnak és mint ilyen az ablakok hőtechnikai modellezését nem teszi a vizsgálat tárgyává, hanem eszközként használja.

A kéthéjú történeti ablakok hőtechnikai modellezésének vizsgálatához, annak pontosságának esetleges javításához egy átfogó elemzésre van szükség mely felhasználja minden eszközt és meglévő eredményt felhasznál a szakirodalomban és a nyílászáró hőtechnikai modellezés elméletének céltudatos elemzésével egészíti ki azokat. Azonban 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 az első lépések megtétele az ablak hőátbocsátás számítás, a beépítési hőhidak és az energiamérleg számítás kérdéseire koncentrálnak.

## 2. Az értekezés új tudományos eredményei

Az ablakok számítására számos hőtechnikai tervező eszköz (modellek, szoftverek, stb.) áll a tervezők rendelkezésére melyek alapvetően két, egy európai<sup>1</sup> és egy észak-amerikai<sup>2</sup>, szabványsorozaton nyugszanak. Az ezekben foglalt modelleket azonban kortárs egyhéjú ablakokra fejlesztették ki, hiszen ezek kaphatók a piacon. 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 a szabványokban nem teljes körűen fellelhetők, mint ahogy a megalapozó tudományos kutatásokra sincs bennük utalás.

A modellek elemzése és a vonatkozó szakirodalom áttekintése felfedi, 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 bolygatja meg annyira hogy a hőáramok többdimenziós modellezése váljon szükségessé,
- a hőmérsékletmező az üvegezés légréseiben közel kielégíti a Laplace egyenletet,
- az oldalirányú hővezetés az üvegezés és üvegezési légrés valamint a keret/szárny szerkezet között minimális és az üvegerem keskeny zónájára koncentrálódik.

A vizsgálataim alapján a következő megállapításokra jutottam melyeket a Bakonyi és Becker [2] valamint a Bakonyi és Dobszay [6] cikkekben publikáltam:

***I. a) Részletes szakirodalmi elemzések alapján kimutattam, hogy melyek azok az implicit feltételezések és ezek tudományos alapja, amelyekre a kortárs ablakok termikus modellezésére vonatkozó szabványokban foglalt egyszerűsítések épülnek, és ezeknek mi az érvényességi köre.***

***I. b) Megmutattam, hogy a kéthéjú ablakokban már pusztán a légrés eltérő mérete és függőleges karcsúsága miatt is teljesen más típusú áramlások alakulnak ki (ún. turbulens határréteg áramlás a zömében lamináris hővezetési vagy átmeneti zónás áramláshoz képest) melyek meghaladják a szabványos számítások elméleti érvényességi körét.***

<sup>1</sup> EN 410 [9], 673 [10], 1077-1 [11], 1077-2 [12]

<sup>2</sup> ISO 15099 [16], NFC 100-2010 [20]

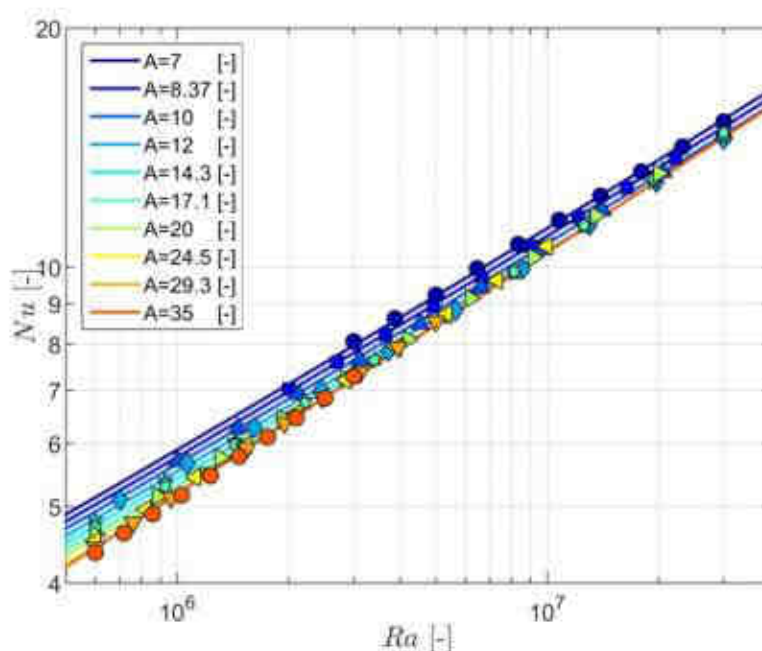
Egy egyszerű Monte Carlo-szimuláció segítségével meghatároztam, hogy mely függőleges karcsúsági és Rayleight számok fordulnak elő leggyakrabban a kéthéjú ablakok üvegközi légréseiben. A szakirodalomban lévő mérési adatok felhasználásával validált CFD modell segítségével paraméter vizsgálatot végeztem az ablaktípus légréseiben várható Nusselt szám karcsúság és Ra szám függésének meghatározásához és egy olyan Nusselt szám korreláció megállapításáért ami kifejezetten az ilyen légrésekre optimalizált. A paraméter-vizsgálat nyomán a dimenziótlan hőmérséklet rétegződést is megvizsgáltam a légrés tengelyében, a Ra-szám és a karcsúság függvényében, ez alapján további következtetést lehetett levonni a vizsgált ablaktípus hőtechnikai viselkedését illetően.

A Bakonyi és Dobszay [7] cikkben a következő eredményeket publikáltam:

**II. a) A kapcsolt gerébtokos ablakok jellemző karcsúság és Ra-szám tartományára elvégzett paraméter-vizsgálat eredményeihez illesztve egy új empirikus korrelációt vezettem le az ablaktípus légréseiben a Nusselt szám közelítésére amely a szakirodalomból ismert többi összefüggéshez képest jobban 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)



1. ábra – az új, kifejezetten a kéthéjú ablakok üvegközi légréseinek számítására optimalizált, Nusselt szám korreláció a levezetéséhez használt paramétervizsgálat eredményeivel összevetve

**II. b) A légrés tengelyében létrejövő dimenziótlan hőmérséklet-rétegződés modellezése alapján megállapítható, hogy a kéthéjú történeti ablakok légrései egy átmeneti zónát képeznek a közel négyzetes és a magas-keskeny légrések között. Az alacsony és kis függőleges karcsúságú légrésekben a dimenziótlan magassággal ( $y/H$ ) közel lineáris függőleges hőmérséklet-rétegződés alakul ki, míg a karcsúság növekedésével jelentősen csökken a rétegződés a középső részen, és a légrés aljára-tetejére korlátozódik ( $0.1 < y/H$  és  $0.9 > y/H$  zóna). A vizsgálat eredményeit a dimenziótlan hőmérsékletre levezetett új korreláció közreadásával összegeztem, mellyel egyszerűen becsülhető a hőmérsékletmező és a hőmérséklet-rétegződés:**

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

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

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

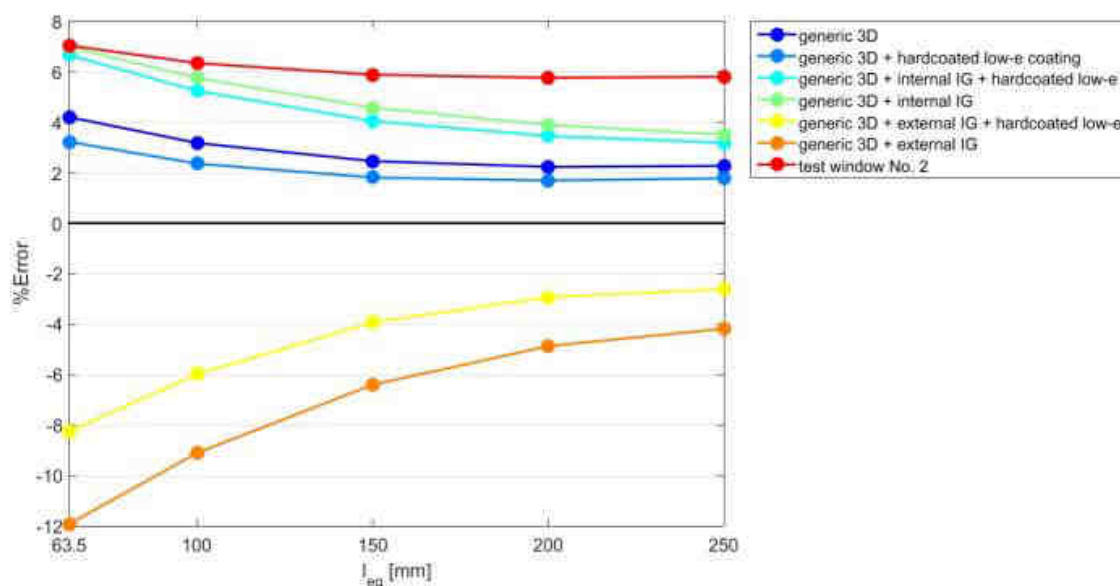
ahol:  $f$  [-] – a dimenziótlan hőmérséklet a légrés közepén:  $f = (T - T_{s,hideg}) / (T_{s,meleg} - T_{s,hideg})$   
 $Ar$  [-] – a dimenziótlan függőleges karcsúság ( $Ar = H/L$ )  
 $y$  [m] – az adott pont magassága a légrés alja felett  
 $H$  [m] – a légrés teljes magassága

A paramétervizsgálathoz használt légrés CFD modellt kiegészítettem a teljes üvegezési rendszer számítására (3 mm vtg. normál síküveg feltételezésével), hogy az üvegezés felületén is lehetővé váljék a a hőmérsékletmező tanulmányozása ugyanannak a paraméterkészletnek a függvényében. Az eredmények megmutatták, hogy a légrésekben létrejövő hőmérséklet-rétegződés az üvegfelületen is erősen változó felületi hőmérsékleteket okoz. A felületi hőmérséklet-rétegződés a hideg oldalon a teljes dimenziótlan hőmérsékletkülönbség (a hideg és meleg üveg légrés felőli átlag felületi hőmérséklete között)  $\pm 10\%$ -át is elérte (tehát leghidegebb pontja akár a teljes hőmérsékletkülönbség 10%-val alacsonyabb lehet az átlagnál), míg a meleg oldalon a  $\pm 20\%$ -ot. Ennek komoly jelentősége van az üvegek közötti kondenzáció veszélyének megítélésére szempontjából.

**II. c) Megállapítottam, hogy az üvegezés egyszerű egydimenziós hőtechnikai modelljei, melyek a függőleges hőmérséklet-rétegződés hatását elhanyagolják, nem alkalmasak megítélésre az üveg felületi kondenzáció veszélyét, mivel azok nem képesek megállapítani a felületi hőmérséklet minimum értékeit.**

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 szabványos hőátbocsátás számításokat, a szabvány módszerét 3D-s modellezéssel kiegészítő számításokat valamint 3D-s CFD szimulációk eredményeit felújítatlan, valamint 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 pontosságán úgy lehetett növelni, hogy a 2D ablak-komponens szimulációkban megnöveltem az üvegerem mező szélességét, ezzel jobban lekövetve legalább a 2D hőáramokat az üvegerem mező hőátbocsátási tényezőjében. Az üvegerem mező szélességét változtatva megállapítható, hogy melyik az minimum szélesség ami a szélességtől független eredményt ad.

A szabványos számítások és a CFD szimulációk eredményeinek összevetésénél az előbbieket 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 növekszik minden esetben. A tény, hogy a Nu korreláció mint egyik potenciális hibaforrás eltávolítása esetén a számítási hiba bizonyos esetekben még növekszik is egyértelműen mutatja, hogy több tényező együttesen okozza az egyszerű számítási módszer hibáját. A szabványos módszer tehát minden bizonnyal nem pontosítható kéthéjú történeti ablakok számítására pusztán az üvegek közötti légrések egyenértékű hővezetési tényezőjét számító algoritmus módosításával.



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

Az eredmények a következő pontokban foglalhatóak össze<sup>3</sup>:

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

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

- **az NFRC 100-2010 / ISO 15099 szabványokra épülő számítási módszer csak megközelítőleg  $\pm 10\%$  pontosságú hőátbocsátási tényező eredményeket tud szolgáltatni,**
- **a 3D-s hőtechnikai modellek közelebbi eredményeket adnak a CFD szimulációhoz mint a 2D modellek, még a javított Nusselt szám korrelációk használata mellett is.**
- **az NFRC 100-2010 / ISO 15099 szabványokra épülő számítási módszer tendenciózusan túlbecsüli a hőátbocsátást.**
- **az NFRC 100-2010 / ISO 15099 szabványokra és a javított Nusselt szám korrelációkra épülő számítási módszer pontosabb számításokat tesz lehetővé felújítatlan ablakok esetében, míg nagyobb hőszigetelésű üvegezési variációk esetén jellemzően alulbecsüli a hővesztéseket.**
- **a hőátbocsátásbeli különbség a külső vagy belső szárnyba helyzetett keménybevonatos üveg között, amit csak a CFD modell képes számítani, egyértelműen mutatja a háromdimenziós infravörös sugárzásos hőátadási jelenségek fontosságát, melyeket a szabványos számítások elhanyagolnak.**

---

<sup>3</sup> Az eredményeket publikáló cikk még leadás előtt áll



Az ablakok szerkezete és hőtechnikai tulajdonságai erős összefüggésben vannak beépítési hézaguk mentén a külső falazattal való csatlakozásuk miatt kialakuló hőhidakkal. Az ablakbeépítési hézag hőhídjának a teljes hőátbocsátásra való hatásának elemzéséhez létrehoztam a nem ismétlődő hőhidak egy új egyszerűsített empirikus modelljét jól tipizálható homlokzatú épületekre több ezer automatizált részletes hőtechnikai számítás eredményeinek az elemzésével. Megállapítottam, hogy a jelenlegi nemzeti hőtechnikai rendelet [8] a hőhidak egyszerűsített figyelembevételét szolgáló módszere jelentősen alul vagy felül tudja becsülni a nem ismétlődő hőhidak hatását. Ez akkor válik igazán jelentőssé amikor az energiafelhasználást csökkentését célzó támogatások bizonyos épületek hőszigetelésére ezen pontatlan módszerrel végzett számításokkal vannak alátámasztva. Az általam bevezetett új módszer segítségével rámutattam, hogy nem lehetséges olyan egyszerű hőhídkorrekciós faktort létrehozni mely az adott épülettípus és a szerkezet ismerete nélkül is pontos eredményekkel szolgál.

Egy sikeres egyszerűsített számítási módszer létrehozásának a lényege a legfontosabb befolyásoló tényezők azonosítása és a szükséges számítási paraméterek számának és a számítás nehézségének a minimalizálása a részletes számításokhoz képest, a számítási pontosság elfogadható szinten tartása mellett. Ennek alapján álltam neki a az új javasolt számítási módszer finomításának. Ennek során megvizsgáltam az ablak- és beépítés típus hatását a hőhídkorrekciós tényezőre és azt jelentősnek találtam. Az ablakbeépítési hőhíd hatása tehát nem elhanyagolható és a nagyon nagy számú lehetséges szerkezeti variációjának köszönhetően nagyon megnehezítené bármilyen egyszerűsített hőhídkorrekciós módszer létrehozását. További nehézség, hogy az ablak és az ablakbeépítés típus matematikailag nehezen leírható paraméter (ellentétben például a hőszigetelés vastagsággal) és nem lehetséges egyszerű interpoláció az egyes esetek között. Ez a felismerés vezetett a javaslatához, hogy az ablakbeépítés hőhidat el kell távolítani a falazat hőhídkorrekcióját befolyásoló elemek közül és azt az ablak ún. beépített állapotban vett hőátbocsátási tényezőjében kell figyelembe venni.

Az eredményeimet a Bakonyi [1], Bakonyi és Dobszay [3] valamint a Bakonyi és Dobszay [5] cikkekben tette 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 hőhídjainak egyszerűsített figyelembevételére, mely a jelenlegi magyar épületenergetikai jogszabály egyszerűsített módszerénél sokkal nagyobb pontosság elérésére képes a számítás összetettségének csak csekély mértékű növelése 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 hőhídjainak figyelembe vétele célszerűen nem a külső falak  $U$  értékének korrekciójával, hanem az ablak beépítését is figyelembe vevő  $U_{w,inst}$  értékében kell megtörténnjen annak érdekében, hogy az egyszerűsített módszer pontossága és bemenő paramétereinek száma optimális maradjon. Az előző pontban bemutatott 3 jól tipizálható épülettípuson demonstráltam, hogy az így továbbfejlesztett módszerrel milyen mértékű további alkalmazási egyszerűsítés és pontosság érhető el.*

A történeti épületek kéthéjú ablakainak energiamérleg számításával kapcsolatos vizsgálataim eredményeit a Bakonyi és Dobszay [4] cikkben publikáltam. Ezek az eredmények 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 az IEA BESTEST termikus épületmodellezési teszt szimulációk és különböző nemzetközileg elismert és használt analóg programok eredményeivel való összehasonlításával validáltam. az EPICAC BE teljesítette a validációs teszt összes vonatkozó előírását.*

*V. b) Az új program segítségével bemutattam, hogy bizonyos szituációkban lehetséges olyan alternatív termikus ablakfelújítási csomagok kidolgozása, például nagyobb hőátbocsátású de nagyobb g értékű üveg használata dinamikus vezérelt üvegtözi árnyékolókkal kombinálva, melyekkel lehetséges a hőszigetelő üvegekkel elérhetőnél is jobban csökkenteni mind a fűtési, mind a hűtési hőigényt. Egy konkrét tervezési munka, egy nívós magyar műemléki épület ablakfelújításának tervezése során ez a módszer lehetővé tette egy olyan koncepció kialakítását mely jobban ki tudta elégíteni a műemlékvédelem és a hőtechnikai optimalizálás csatolt követelményeit mint a korábbi megszokott megoldások.*

*V. c) Az előző pontban említett tervhez készített modellek részletes szenzitivitás vizsgálata rámutatott, hogy mind a fűtési mind a hűtési számított hőigény igen erősen függ, a szerkezet és a környezeti hatásokon túl is, több az épülethasználatot és felhasználói szokásokat leíró paraméter bizonytalanságától. Bemutattam, hogy bár ez a tény erősen korlátozza a lehetőségeket igazán pontos energiaigény számítások készítésére, a bizonytalan tényezők hatásának közel-lineáris és monoton volta így is lehetővé teszi az egyes felújítási scenáriók közötti relatív sorrend és a nettó energiaigény megtakarítás százalék konzisztens meghatározását.*

*V. d) A programmal szerzett tapasztalat, a részletes szenzitivitás vizsgálat és a bemutatott tervezési feladat tanulságai alapján létrehoztam egy új tervezési irányelvet értékes és megtartandó történeti ablakok felújításához. Bemutattam, hogy az idehaza és nemzetközileg legtöbbször használt tervezési módszerek és irányelvek nem feltétlenül vezetnek optimális megoldások létrejöttéhez. A megfelelő tervezési módszertan használata és az épületenergetikai szimulációk lehetőségének kihasználása olyan alternatív felújítási módok kidolgozását is lehetővé teszik melyek nem szükségeltetik a meglévő ablakállomány részleges irreverzibilis károsítását sem.*

### 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 kutatásomat 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 mérésekhez valamint az azokhoz adott sok segítséget. A próbatest ablakokért valamint a mérőberendezés szerkezeti elemeinek megépítéséért Vigh Károlynak és a Hofstädter Kft 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. (2013) The role of thermal bridges in reducing the energy usage of buildings with valuable historical facades (in Hungarian), 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
- [2] 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
- [3] 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
- [4] Bakonyi, D., Dobszay, G. (2016) Simulation aided optimization of a historic window's refurbishment, *Energy and Buildings*, In Press, Accepted Manuscript, DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.05.005
- [5] Bakonyi, D., Dobszay, G. (2016) Simplified calculation of non-repeating thermal bridges of the typical Central-European small suburban houses, *Pollack Periodica*, under review
- [6] 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*, under review
- [7] 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*, under review

## 5. További hivatkozások a tézisfüzetben

- [8] 7/2006 (V. 24.) (2006) Decree of Minister without portfolio about the determination of energy efficiency of buildings (in Hungarian) Hungarian Ministerial Decree
- [9] EN 410 (2011) Glass in building. Determination of luminous and solar characteristics of glazing
- [10] EN 673 (2011) Glass in building. Determination of thermal transmittance (U value). Calculation method
- [11] EN 10077-1 (2006) Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: General
- [12] EN 10077-2 (2012) Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames
- [13] Gärtner, M., Gerner, D. (1196) *Historische Fenster. Entwicklung, Technik, Denkmahlpflege*, Verlag Deutsche Verlags-Anstalt DVA, Stuttgart, ISBN: 3421031045
- [14] 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
- [15] Homb, A., Uvslok, S. (2012) Energy Efficient Windows with cultural value, Measurements and calculations, Technical Report, SINTEF Byggforsk
- [16] ISO 15099 (2003) Thermal performance of windows, doors and shading devices - Detailed calculations
- [17] Laustsen, J. B., Jensen, C. F., Svendsen, S. (2007) Calculation procedures for determination of the energy performance of windows with large glazing distance, Report, Technical University of Denmark
- [18] 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)
- [19] 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
- [20] NFRC 100-2010 (2010) Procedure for Determining Fenestration Product U-factors
- [21] Pilkington (1997) *Sanierung von Verbund- und Kastenfenster mit K-GLAS*, Technical information brochure
- [22] Schrader, M. (2001) *Fenster, Glas und Beschläge als historisches Baumaterial*, Anderweit Verlag GmbH, Suderburg-Hösseringen, ISBN: 3-931824-04-7
- [23] 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
- [24] Verband Fenster und Fassade (VFF) (2003) *HO.09 Runderneuerung von Kastenfenstern aus Holz*, Report