Tömböly Cecília

Homlokzati ablakszerkezet-beépítések optimalizálása és fejlesztési lehetőségeinek komplex vizsgálata

Doktori tézisek

Témavezetők:

Dr. Fátrai György (2008-2016)
Széchenyi István Egyetem

Dr. Koppány Attila (2016-2018)
Széchenyi István Egyetem

Infrastrukturális Rendszerek Modellezése és Fejlesztése
Multidiszciplináris Műszaki Tudományi Doktori Iskola

TARTALOM

1 Bevezetés, a téma aktualitása 5
1.1 Az értekezés célja 5
1.2 Vizsgálati módszerek és anyagok 6
1.3 A kutatás eredményeinek összefoglalása 7
2 Az értekezés új tudományos eredményei 8
2.1 Tézis előkészítő megállapítás 8
2.2 I. Téziscsoport 9
2.2.1 I/a. Tézis - Vonalmenti hőátbocsátási tényező - ψ 10
2.2.2 I/b Tézis - Belső felületi hőmérséklet, hőmérséklet tényező (f_{Rsi}), megengedhető belső maximális páratartalom vizsgálata 11
2.2.3 I/c Tézis - Nedvességtartalmak változása anyagokban 12
2.2.4 Az I. téziscsoport áttekintése, beépítési javaslat 13
2.3 II. Tézis - Paraméter vizsgálatok 13
2.4 III. Téziscsoport - Beépítési hiba hatása 15
2.4.1 III/a. Párazáró (EPDM) fólia hiányának vizsgálata 15
2.4.2 III/b. Beépítések javítási lehetőségeinek vizsgálata 16
2.5 Tézist lezáró megállapítás - A modellfelvétel létjogosultságának igazolása 17
2.6 IV. Tézis - Nyílászárók hőmérsékleti profiljainak elemzése 18
3 Összegzés és jövőbeli kutatási tervek 18
3.1 Tudományos eredmények hasznosítási lehetőségei az épületszerkezeti csomópontok tervezésénél 18
3.2 Jövőbeni kutatási feladatok 20
Irodalomjegyzék 21
A tézisekhez kapcsolódó saját publikációk 22
Köszönetnyilvánítás 23

’ Üres házra nem kell ablak, mert senki nem néz be.

Bármi házra miért kell ablak, ha senki ki sem nézne.’

Maggie Stiefvater

[1]

1 BEVEZETÉS, A TÉMA AKTUALITÁSA

A lakóépületek energiafelhasználása a világon felhasznált összes energia 20,1%-át teszik ki. Ez az érték várhatóan 2012 és 2040 között átlagosan évi 1,5%-kal fog növekedni [2]. Ezért az új és a meglévő épületek külső hőszigetelése rendkívül fontos, mivel ezzel csökkentjük az épületek energiaigényét és széndioxid-kibocsátást [3]. Az EU hosszú távú célkitűzéseként határozta meg az üvegházhatást okozó gázok kibocsátásának 80-95%-kal történő csökkentését az 1990-es szinthez képest 2050-ig [4], ezért az épületekre vonatkozó előírások és az épületek energetikai tanúsításának követelményei folyamatosan szigorodnak [5]. A csökkenő hőátbocsátási tényező követelmények új épületszerkezeti megoldásokat is eredményeznek. Magyarországon a homlokzati falak U-értékének hatályos követelménye 0,24 W/m2K, a hagyományos műanyag vagy fa tokszerkezetű ablakok 1,15 W/ m2K, az üvegezésé pedig 1,0 W/m2K [6], ezért a hármas üvegezésű szigetelt ablakok kialakítása létfontosságúak az új épületszerkezetek kialakítása során vagy felújítások esetén. Az építészek és a mérnökök a nyílászáró szerkezetek tervezése kapcsán általában azok energiatudatos tervezésére törekednek [7-9], azonban a nedvességtechnikai problémákat még nem vizsgálják behatóan[10].

És nem utolsó sorban, miért tartom ennyire fontosnak az energiahatékonyságot? Mert ez a leggazdaságosabb és leghatásosabb módja korunk legfőbb energia- és klímapolitikai kihívásainak megválaszolására. Az energiahatékonyság ugyanis egyszerre szolgálja a környezeti fenntarthatóság növelését, a biztonságosabb energiaellátást és a gazdaság versenyképességét is. Ennek hatására a mérséklődő energiafelhasználás egyrészt kisebb üvegházhatású gáz-kibocsátást okoz, ami nagyobb környezeti fenntarthatóságot és környezetbarátabb energiafelhasználást eredményez. Másfelől csökken a fosszilis energiahordozók iránti igény, ami csökken az ország importfüggősége. [11]

1.1 Az értekezés célja

Az ablakok szerkezeti kialakítását az idők folyamán folyamatosan módosították a jobb technikai jellemzők érdekében, valamint a kor építészeti stílusának és az építészeti megoldásoknak megfelelően. Napjainkban az esztétikus megjelenés mellett a használhatóság,

de leginkább a jó hang,- hő- és légszigetelés áll a tervezők, valamint a felhasználók igényeinek középpontjában.

A gazdasági környezettől a ház- és lakásépítések kapcsán sem tudjuk függetleníteni magunkat. Az elmúlt évszázadokhoz képest az utóbbi néhány évtized jelentős változásokat eredményezett. Egyre hangsúlyosabban előtérbe került a gazdaságosság kérdése, hiszen a világ energiafogyasztásának közel felét (45%-át) az épületek üzemeltetése teszi ki [11].

Mivel még a legkorszerűbb nyílászárók sem képesek megközelíteni az épülethatároló falazat hőátbocsátásának értékét, így az épület egészét nézve, energetikailag kedvezőtlen hatásúak. A megfelelő közérzet, komfortérzet kialakításában, a frisslevegő biztosításában és legfőképpen a környezettel való vizuális kapcsolattartás vonatkozásában lakóépületeinket nem tudjuk, illetve nem szeretnénk elképzelni ablakok nélkül, amelyből egyértelműen következik ezen épületszerkezeti elemek kitüntetett jelentősége.

Annak ellenére, hogy több, nyílászáróra és üvegezésre vonatkozó vizsgálattal is találkozhatunk, nem eléggé feltárt és megoldott az ablakok helyzete. Ebből adódóan a disszertáció fő célja a kapcsolódó területek áttekintésével tisztázni, hogy a jelenleg elterjedten alkalmazott ablakszerkezetekkel, anyagokkal, megoldássokkal hő- és páratechnikailag milyen szint érhető el, továbbá hatékony megoldásokat ajánlani a nyílászáró szerkezetek beépítéseivel kapcsolatban magasabb követelményszint elérésére.

Az előzőek alapján a részletes célkitűzéseim a következők:

- Jelenleg használatos korszerű ablakszerkezetekre maghatározni a jellemző hő- és páratechnikai teljesítőképességet és az azt befolyásoló szerkezeti és anyagi jellemzőket.
- A magyarországi épületállományban fellelhető korszerű ablakszerkezetek és tipikus befogadó épületszerkezetek kölcsönhatásának vizsgálata hő- és páraátbocsátási szempontból.
- Új irány keresése a beépítés területén a hőszigetelési és páratechnikai teljesítőképességének további fokozására az elvárások figyelembevételével.

1.2 Vizsgálati módszerek és anyagok

A kutatás során a magyarországi épületállományban jelenleg is fellehető ablakszerkezetek közül, két jellemző, de egymáshoz képest eltérő teljesítőképességű és igényszintet képviselő típusra határoztam meg a hő- és páratechnikai teljesítőképességet. Vizsgálataim a

lakóépületek ablakaira korlátoztam, azon belül, a fa illetve műanyag keretekkel rendelkező szerkezetekre helyezve a hangsúlyt.

Ezt követően az ablakok, mint „független” termékek vizsgálata mellett (ami a minősítéshez szükséges), mint épületszerkezeti elemeket – három különféle beépítési pozícióba, kétféle falazatba illesztve, három jellemző irányban – is vizsgáltam, hiszen az ablakok beépítése is jelentősen befolyásolja az épületek energetikai hatékonyságát.

A véges differenciákon alapuló számítógépes modellezést a *COMSOL Multiphysics Version 5.3.a* program segítségével végeztem el.

A beépített ablak üvegezésének vizsgálatára, ellenőrzésére vonatkozóan hőkamerával helyszíni méréseket is végzett, ami a számítógépes és laboratóriumi vizsgálatokkal szemben, valós környezeti hatások mellett történtek. A vizsgálattal és az eredményekkel rávilágítottam arra, hogy a tapasztalatoknak megfelelően, az üvegezés hőszigetelő képességének „időállósága” nem tekinthető állandónak.

1.3 A kutatás eredményeinek összefoglalása

A doktori kutatás során célzott ablakvizsgálatok készültek, amelyek középpontjában végeselemes modellezés, helyszíni mérés állt. Az elvégzett munka a célkitűzéseknek megfelelően vizsgálta az üvegezést az azt befoglaló keretszerkezettel, falazattal együtt.

A kutatómunka első szakaszában a Magyarországon elterjedten alkalmazott ablakszerkezetek közül 3 típus esetében készült hőtechnikai végeselemes modellezés, amelyek az ablakot, mint terméket, és mint beépített szerkezetet is vizsgálták. A szimulációs modellekkel sikerült jól alkalmazható, a valóságot jól leíró modelleket felépíteni és jellemezni a vizsgált ablakszerkezeteket.

Mind a 406 szimulált modellen értékeltem a hőmérséklet-eloszlást, a hőáramlási nagyságokat, a relatív nedvességtartalmat és a parciális páranyomást (nedvességhíd) nagyságát, amiknek táblázatos elemzéseit az eredménytáblázatok tartalmazzák.

A számításokat minden jellemző metszetre elvégeztem, ennek megfelelően a számítógépes elemzéseim kiterjedtek a vízszintes, valamint a függőleges alsó és felső metszetekre.

A számítási eredmények összehasonlításakor a kapott eredmények közötti javulás vagy romlás tekintetében a különbségek %-os eltérését vizsgáltam és ezekből vontam le a végkövetkeztetéseket.

2 AZ ÉRTEKEZÉS ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEI

2.1 Tézis előkészítő megállapítás

A szerkezeten belüli hőhidak vizsgálata során a vonalmenti hőátbocsátási tényező a szerkezetek hőtechnikai minősítésének fontos elem. Általános esetben a nyílászárók felületei kisebb ellenállást mutatnak a hőáramlással szemben, mint az épület többi része. Az ezekkel foglalkozó hő- és páratechnikai szabályozások gyakorlati felhasználás céljára nem elegendők.

Vizsgálataim alapján (406 db 2D szimuláció) kijelentem, hogy az ablakok homlokzati síkhoz képest változó elhelyezés jelentősen befolyásolja az épületszerkezetek higrotermális teljesítményét, ami hatással lehet a teljes épület hő- és páratechnikai teljesítményére is. Ezért fontos figyelembe venni az épületszerkezetek higrotermikus teljesítményét az építészeti és szerkezeti kialakításában, beleértve a káva beépítést, a párkányt és a szemöldököt is, hiszen ezek eltérő következtetéseket eredményeznek.

Szakirodalmi adatok és számos saját vizsgálati eredmény alapján meghatároztam, hogy a geometriai és szerkezeti hőhídon végzett végeselemes szimulációk igazolják, hogy az átlagos követelményszintű lakóingatlanok esetén megnő a csomóponti részletek szerkezeti kialakításának tervezési jelentősége az épületfizika terén.

Az épületek homlokzati felületeinek hőveszteség csökkentése a szerkezeti hőhidak előtérbe helyezését vonja maga után. A külső falak hőszigetelésekor a nyílásáthidalások hőhídjai ellentétes viselkedést mutatnak, mértékük megnövekszik.

Általános esetben a nyílászárók felületei kisebb ellenállást mutatnak a hőáramlással szemben, mint az épület többi része. Az ezekkel foglalkozó hő- és páratechnikai szabályozások gyakorlati felhasználás céljára nem elegendők.

- az építészeti és fizikai problémák együttes kezelése nem minden esetben történik meg
- a szabványok által vizsgált csomóponti megoldások építészeti és épületfizikai kialakításának minősége alatta marad a hazai és nemzetközi tervezési gyakorlatnak
- a hőhídhatások matematikai modellezésére és a felületi hőmérséklet meghatározására számítási módszerek ugyan készültek, azonban ezek részletessége a gyakorlati alkalmazásoktól nagymértékben eltér

- az eddigi vizsgálatok a hő- és páratechnikai problémákat különálló esetekként kezelik, kapcsolataikat nem vizsgálják, a következtetéseket önálló esetekre bontják le
- a szabványok és fizikai modellek az általános tervezés során nehezen hasznosíthatók, az esetek bemutatása a gyakorlati felhasználás során nem elég szemléletes
- a gyakorlati számítások kapcsán a tényleges építészeti megvalósítás és az épületszerkezeti csomópontok részletezésének kidolgozása a többdimenziós hőáramlások, a vonal és pontbeli számítások során közelítő feltételezések kapcsán történik, ami a végeredményekben is közelítő értékeket eredményez

A várakozásoknak megfelelően a vizsgált ablakok falazatba illesztését követően részletes információt kaptam arról, hogy a szabvány által előírt peremfeltételek mellett a szerkezet egyes rétegeiben milyen minimális hőmérsékletértékek és páralecsapódások alakultak ki. A modellek azt is szemléletesen illusztrálják, hogy az eltérő hővezetésű szerkezeti elemek összeépítését követően az egyes hőmérsékleti zónák milyen mértékben hajolnak meg, illetve tolódnak el.
A fluxus színtérképek segítségével a kialakított csomópontok azon részeit tudtam lokalizálni, ahol a környező területekhez képest jelentősebb az átáramló hőenergia mennyiségének eltérése. Ezek a lokális helyek lesznek a csomópont kritikus pontjai, mivel itt nagyobb hőveszteség alakul ki, így a felületek ezekben a zónákban jelentősebb mértékben át tudnak hűlni. Ezeket a pontokat nevezzük hőhidaknak. A nyílászárók beépítésének vizsgálata során ezeknél a lokális zónáknál jelentkezett ez a többlethatás, amely a belső felület mentén a legkritikusabb, mivel ezek vezetnek páralecsapódáshoz.

2.2 I. Téziscsoport

Az I. téziscsoport vizsgálatai kapcsán a 72 db modell végeselemes szimulációját végeztem el. Az első sorozat (1) modelljeinek a nyílászárói a falazat középső mezőjében helyezkednek el, aminek pontos síkját az áthidaló helyzete határozza meg. A második sorozatban (2) az ablak síkja a külső tér felé tolódik el, a falazat külső síkjára. A harmadik sorozatban (3) ez a sík a falazaton kívülre kerül, a külső szigetelés síkjára. Minden esetben a külső 30 cm vastag falszerkezet 15 cm vastag polisztirol (EPS) vagy ásványgyapot (MW) hőszigeteléssel van kialakítva. A hőhidak csökkentése érdekében további 4 cm hőszigetelést helyeztem el a keret külső felületein.

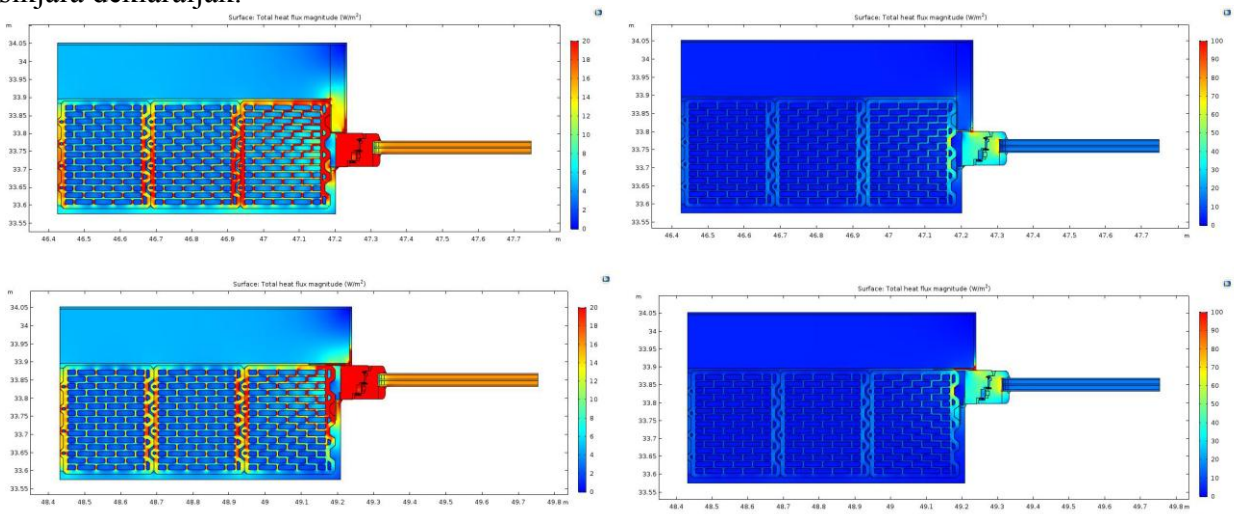
2.2.1 I/a. Tézis - Vonalmenti hőátbocsátási tényező - ψ

Szimulációs modellek eredményeinek vizsgálata kapcsán megállapítottam, hogy ugyanazon ablaktípus különböző szerkezeti síkra való illesztése a ψ vonalmenti hőátbocsátási tényezőben átlagosan 10,22 %-os eltérést eredményez (szórás: 8,6%).

A vonalmenti hőátbocsátási tényezővel jellemezett csomópontok hőáramlásának összehasonlítása eredményeként megállapítottan, hogy az EPS homlokzati szigetelés esetén a homlokzati fal-ablak csatlakozásnál átlagosan 18,63%-kal nagyobb a hőáramlás (szórás: 19,66%), mint ásványgyapot hőszigetelés esetén, ami az ásványgyapot jobb hőszigetelő képességével magyarázható.

A hőáramlások figyelembevételével rámutattam arra, hogy a három alapeset vizsgálata alapján, az ásványgyapot szigetelésű falszerkezetek, külső falsíkra helyezett nyílászáróval 18%-kal kevesebb hőveszteséggel rendelkeznek, mint a EPS szigetelés, közbenső vagy a hőszigetelés külső síkjára helyezett ablakszerkezettel kialakított csomópontjai.

Az ablakszerkezet pozíciójának külső síkja felé eltolódásával lineárisan csökken a vonalmenti hőátbocsátási tényező értéke. Ez a változás a hőáramsűrűségek grafikus ábrázolásán (1. ábra) is megfigyelhető. A falszerkezet szélső síkjában (3. elhelyezési eset) elhelyezett ablak mind EPS, mind MW szigetelés esetén 71,34 %-os csökkenés figyelhető meg a vonalmenti hőátbocsátási tényezőkben a közbenső síkon (1. elhelyezési eset) kialakított csomópontokhoz képest. Ugyan építéstechnológiailag bonyolultabb kivitelezési megoldásokkal jár, de a szimulációs eredmények az ablakszerkezetek elhelyezését egyértelműen a falszerkezet külső síkjára deklarálják.



1. ábra: Hőáramsűrűség fa és műanyag nyílászáró és EPS hőszigetelés esetén

2.2.2 I/b Tézis - Belső felületi hőmérséklet, hőmérséklet tényező (f_{Rsi}), megengedhető belső maximális páratartalom vizsgálata

A belső minimális felületi hőmérsékletek vizsgálata során a hőmérsékletminimumok közötti különbségek elhanyagolhatóak, az azonos pozíciójú és kialakítású modellek között 0,33 – 0,47 ^{0}C közötti eltérést mutat. A belső minimális hőmérséklet eltérésének átlagértéke 1,002 % (szórás beépítési esetenként külön-külön vizsgálva: 0,013-1,002 %).

A belső felületi hőmérséklettényező (f_{rsi}) határérték *vizsgálata során a fa nyílászáróval kialakított csomópontok az f_{RSI}> 0,8 minimálisan elvárt értéktől +0,622 és -0,364 értékben térnek el, műanyag nyílászáró esetén ez az érték +0,0131 és -0,1067.*

A megengedhető maximális belső páratartalom vizsgálata során, a belső komfortérzet szem előtt tartásának érdekében, diagramokat hoztam létre korrigált hőmérsékletpárok esetére - a különböző helyiségek ideális belső hőmérsékletének egészségügyi határait és a magyarországi éves középhőmérséklet növekedésének külső hőmérsékletváltozását figyelembe véve - a legideálisabb beépítési lehetőség kialakításának érdekében.

A vizsgált minimális belső felületi hőmérsékletek egymáshoz képest nem mutatnak jelentős eltérést, MW hőszigetelések esetén 2,52 ^{0}C, EPS hőszigetelések esetén 2,99 ^{0}C.

A beépítési helyzetek (falszerkezet középső, falszerkezet szélső és hőszigetelés szélső zónája) közötti különbség a modellek részletességével magyarázható.

A műanyag ablak beépítése esetén az A pozíció, 1 és 2 esetét kivéve minden belső felületi hőmérséklettényező értéke a f_{RSI}> 0,8 minimálisan elvárt értéktől alatt van, így ezekben az esetekben megnő a kondenzáció lehetősége, ami a megengedhető belső páratartalom korlátozása mellett elkerülhető.

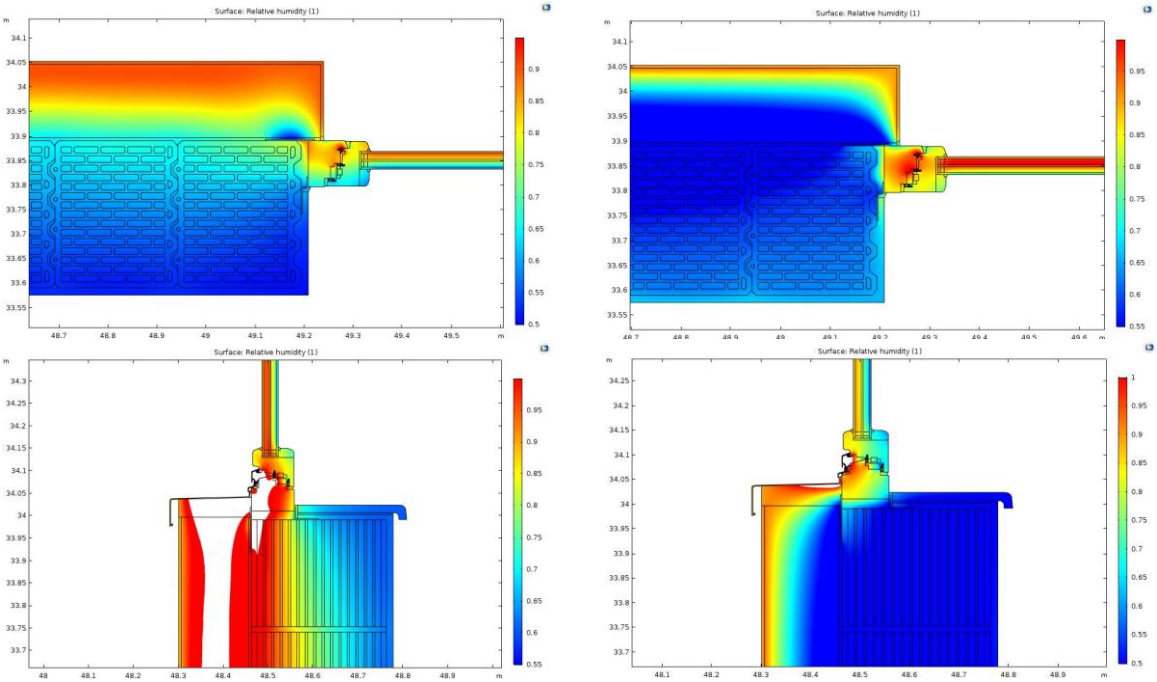
A megengedhető belső maximális páratartalom vizsgálatát az MSZ 24140:2015 szabvány előírásai szerint végeztem el. Az eredmények bemutatása során jól látható, hogy bizonyos beépítési esetekben a kialakított csomópont ugyan teljesíti a lakószobára előírt 65%-os relatív légnedvességek értékeire előírt követelményt, ellenben a belső komfortérzet szempontjából meghatározott 50 %-os belső páratartalmat nem éri el. Az épületek ezen pontjain a megengedettnél magasabb páratartalom felületi kondenzációhoz vezethet.

2.2.3 I/c Tézis - Nedvességtartalmak változása anyagokban

Szimulációs modellek nedvességtartalmainak vizsgálata kapcsán megállapítottam, hogy a kondenzáció várható mértéke az EPS hőszigetelést alkalmazása mellett minden modell esetében a vízszintes metszetnél magas, MW hőszigetelést esetében az 1-es modell párkánybeépítése esetében (közbenső beépítési mód a külső fal közbenső síkjában) a legvalószínűbb.

A nedvességtartalmak változása kapcsán kimutattam, hogy a beépítési sík belső tér felé való elmozdítása magasabb nedvességtartalmat eredményez a szerkezetben, ami a csomópont kialakítása esetén hő- és nedvességtechnikai romlást eredményez. Ezzel a beépítési móddal nemcsak a kondenzáció veszélye áll fenn, hanem várhatóan a szerkezet élettartama is lecsökkent.

A stacioner állapotú, csatolt hő- és páradiffúziós szimulációs modellek eredményeinek ábráin jól látható, hogy az állandósult állapotban potenciális kondenzációs kockázat áll fenn. A kondenzáció várható mértéke a külső hőszigetelésben és a téglában az EPS hőszigetelést alkalmazása mellett minden modell esetében a vízszintes metszetnél magas, MW hőszigetelést esetében az 1-es modell párkánybeépítése esetében a legvalószínűbb (2. ábra). Az így kialakult állapot nagyobb hővezető képességet eredményez, ami várhatóan a szerkezet élettartamát is csökkenti.



2. ábra: Relatív nedvességtartalom fa nyílászáró esetén EPS (balra) és MW (jobb) hőszigeteléssel

2.2.4 Az I. téziscsoport áttekintése, beépítési javaslat

Vizsgálataim alapján kijelenthetem, hogy az ablakok homlokzati síkhoz képest pontos elhelyezése és az alkalmazott anyagok jelentősen befolyásolják az épületszerkezetek épületfizikai teljesítményét, ami hatással lehet a teljes épület energetikai teljesítőképességére is. Ezért fontos figyelembe venni az épületszerkezetek higrotermikus (kapcsolt hő- és nedvességtranszport) viselkedését az építészeti és szerkezeti kialakításában.
A szimulációs eredmények összevetése után kijelenthetem, hogy a következményképpen fellépő épületfizikai hatások egyidejű figyelembevételével a legideálisabb eset, ha az ablakot külső homlokzati sík felé mozdítjuk el (2. és 3. beépítési helyzet) és ásványgyapot hőszigetelést alkalmazok a külső fal felületének szigetelésére. Ezekben a beépítési pozíciókban mind a hőtechnikai mind a páratechnikai tulajdonságok a legkedvezőbb képet mutatják és elkerülhető a nedvességkárosodás is.

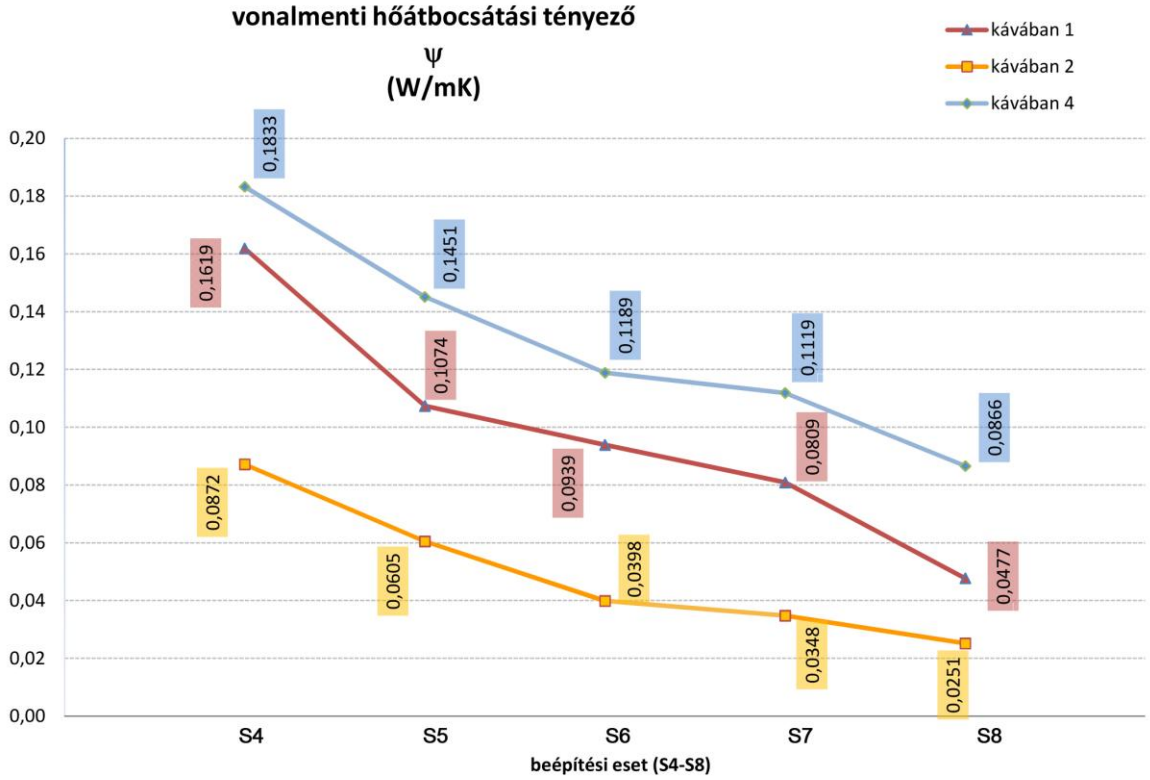
2.3 II. Tézis - Paraméter vizsgálatok

A vizsgált csomópontok kávabeépítésének paramétervizsgálatát elvégezve megállapítottam a tendenciát, miszerint a kávába befordított hőszigetelés vastagsági növekedésével a vonalmenti hőátbocsátási tényező nemlineáris monoton csökken; 15 cm beépítése esetén megközelíti a 0 értéket, amivel akár hőhídmentes csomópontot is ki tudunk alakítani.
A teljes felületű purenites kávakialakítás esetén a vonalmenti hőátbocsátási tényező értékei 28%-kal nagyobb értékeket mutatnak az kávába ablaktokig beforduló EPS hőszigeteléssel szemben a párazárás hiánya miatt, ami a nedvességkárosodás kockázatát megnöveli és a hő- és páratechnikai teljesítőképesség csökkenéséhez vezethet.
A trendvonalak felvétele után az EPS hőszigetelés káva bélletként való kialakítása során definiáltam a legoptimálisabb beépítést a legrentábilisabb kialakítás érdekében. Abban az estben, ha állagvédelmi szempontból (I. téziscsoport) nem indokolt a vastagabb hőszigetelés kialakítása, akkor nem gazdaságos ez a kialakítás, mivel a vonalmenti hőátbocsátási tényező kismértékű (átlagosan 37,8%) csökkenését érhetjük csak el.

Az első sorozat beépítési eseteiben a kávába beforduló hőszigetelés EPS táblából lett kialakítva 4, 10 és 15 cm vastagságban. A szerkezeten belüli hőhidak vizsgálata során a vonalmenti hőátbocsátási tényezőket hasonlítottam össze. A második sorozat eseteiben a

kávába befordítva teljes kávafelületen végigfutva 2, 4, és 6 cm purenit szigetelést helyeztem el. Az első sorozathoz hasonlóan az ablakszerkezet pozíciójának belső sík felé eltolódásával nem kaptam nagymértékben eltérő értékeket a vonalmenti hőátbocsátási tényezőkben, ellenben a kávába beforduló purenit vastagsági változtatásával jelentős csökkenést értem el. A harmadik sorozat modelljein az EPS hőszigetelés kávába való befordításának vastagságváltozását vizsgáltam, a teljes kávafelületen végigfutva 2, 4, 6, 8 és 10 cm-es vastagság esetén.

A modellek vizsgálata kapcsán belátható, hogy a várakozásoknak megfelelően az ablak legideálisabb síkja a kávában megegyezik a falszerkezet külső síkjával. A trendvonalak felvételével meghatározható a globális és lokális minimum amivel optimalizálható a beépített hőszigetelés vastagsága (3. ábra).



3. ábra: A vonalmenti hőátbocsátási tényezőinek összehasonlítása

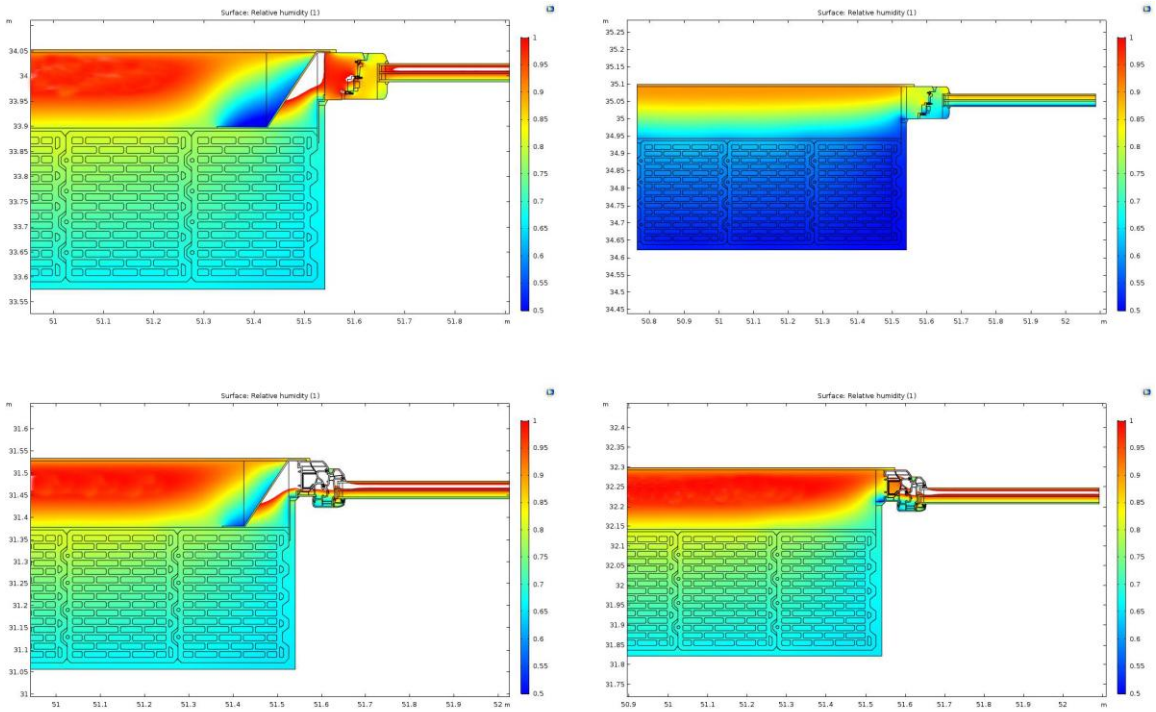
A szimulációs modelleken az EPS hőszigetelés kávába való teljes felületű beépítés vastagságváltozásának vizsgálata kapcsán, a legkisebb ψ érték vizsgálatával belátható, A 6 cm és 10 cm-es kávabéllet kialakításai közötti átlagosan 37,8% különbség nem indokolja a 6 cm-nél nagyobb vastagságot, mivel a hőtechnikai javulás ezen vastagság felett már nem rentábilis.

2.4 III. Téziscsoport - Beépítési hiba hatása

2.4.1 III/a. Párazáró (EPDM) fólia hiányának vizsgálata

Az építési hibák vizsgálata során (párazáró fólia elhagyása) rámutattam arra, hogy az általánosan kialakított csomópontok energetikai teljesítőképessége akár 58%-os romlást is indukálhat a gondatlan kivitelezés eredményeként.
Ez állagvédelmi szempontból plusz nedvességterhelést jelent a szerkezetekre.

A beépítési hibák vizsgálata során, a csomópontokban a párazárás jelentőségét vizsgáltam. Sajnálatos módon a kivitelezés során nem minden esetben fordítanak kellő gondot erre és kihagyják az ablakszerkezet és falszerkezet csatlakozásánál a párazáró fóliát (EPDM), ami kritikus helyeken alkalmaznak tömítési célokra (4. ábra).



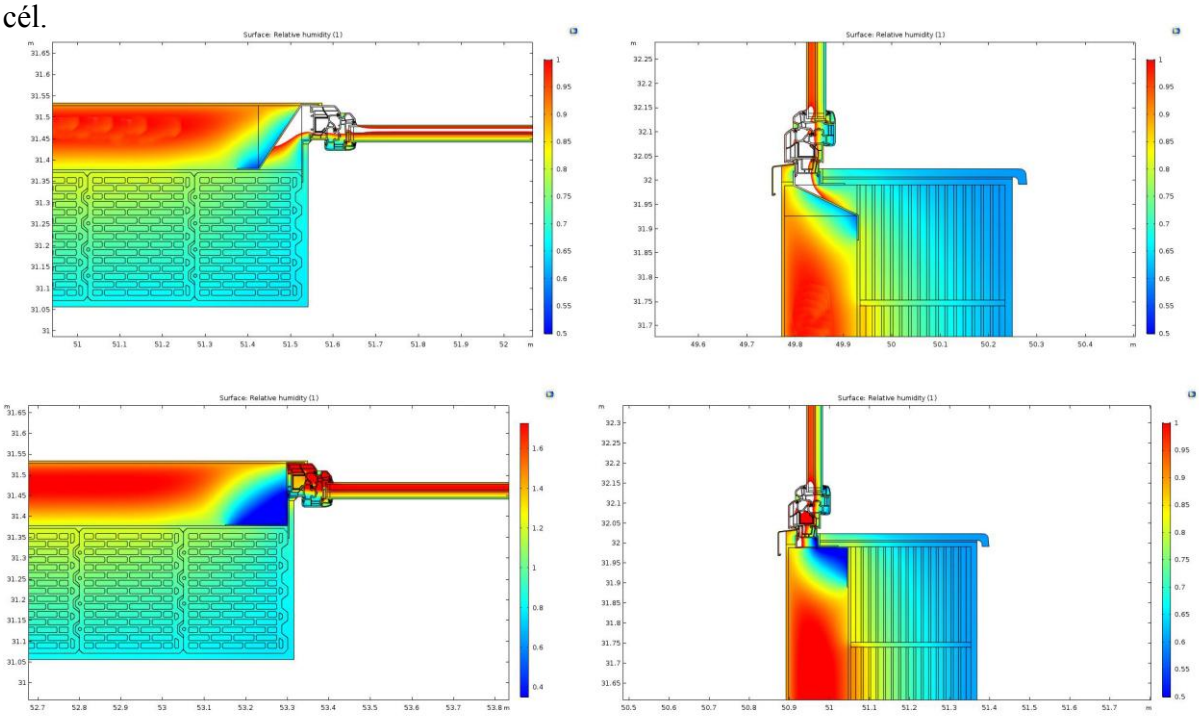
4. ábra: Relatív nedvességtartalom a vízszintes kávánál, EPDM fóliával (bal) és fólia nélkül (jobb)

Az eredmények világosan mutatják, hogy, az MW hőszigeteléssel szigetelt szerkezetek nagyobb páralecsapódást mutatnak az ablakkeret mellett mint az EPS hőszigetelés, mivel ezek a modellek alacsonyabb nedvesség ellenállással rendelkeznek, ezért több nedvességet tudnak átengedni a szerkezeten. Ezzel együtt a falazóelemeken lévő nedvességáramok mértéke is nagyobb, ami azt is mutatja, hogy az épület szerkezetei "lélegeznek". Felmerül az igény ezeknél a kialakításoknál az EPDM fólia változtatott helyzetű beépítésére.

2.4.2 III/b. Beépítések javítási lehetőségeinek vizsgálata

A vonalmenti hőátbocsátási tényezők 9,48 %-os javításával kialakítottam több módosított beépítési javaslatot az építéstechnológiai lehetőségek szem előtt tartásával, ami a belső felületi minimum elérésén túlmenően, nedvességtartalmi csökkenést is eredményezett. Ezekkel a kialakításokkal jobb hőtechnikai teljesítőképesség mellett elkerülhető a nedvességkárosodás.

Az alkalmazott részletrajzi megoldások kialakításánál a nyílászárót forgalmazó cégek alkalmazástechnológiai leírásától való eltérésnek a hőtechnikai javításon túlmenően az volt az oka, hogy szem előtt tartsam az építéstechnológiai kialakítások helyességét és a kivitelezhetőséget, hiszen a csomópont javítása során a kivitelezési hibák kiküszöbölése volt a cél.

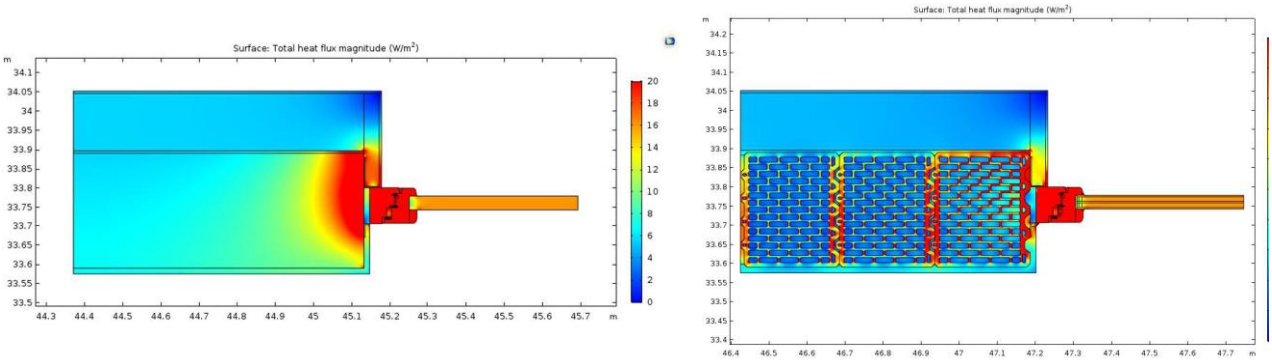


5. ábra: Relatív nedvességtartalom a vízszintes kávánál és párkánynál, EPDM fóliával (fent) és javított helyzetű EPDM fóliával (lent)

Ezzel a beépítési megoldással könnyebben lehet az EPDM fóliát elhelyezni, ami arra ösztönzi a beépítés során a kivitelezőket, hogy ne hagyják ki a kialakítás egyik páratechnikai lényeges elemét .Ezért azokon a kialakítási helyzeteken, ahol nedvességfeltorlódás lehetséges új szigetelési síkot vizsgáltam, ami a háromszögletű vonalvezetés helyett derékszögletű vonalvezetést feltételez és így a szigetelési sík megszakítás nélkül, folyamatos védvonalként fut körbe a nyílászáró mentén (5. ábra).

2.5 Tézist lezáró megállapítás - A modellfelvétel létjogosultságának igazolása

A 406 db 2D instacioner hő- és nedvességtranszport szimulációk során alkalmazott dinamikus modellek a valóságot maximálisam megközelítő pontossága célkitűzésem volt. Ez nemcsak az ablakok tokszerkezeteinek a felvételére igaz, hanem a vázkerámia falazatra és a kapcsolódó szerkezetekre (födém, tömítések, burkolatok, fugák) is. A rendelkezésemre álló szakirodalmakban a legtöbb számításnál egy effektív anyagjellemzővel homogén szerkezetként és geometriailag leegyszerűsítve modellezik a falszerkezeteket és a födémet, de sok esetben még a nyílászáró tokszerkezetét is. A modelljeim megalkotása során nem tettem ilyen leegyszerűsítéseket és így potenciálisan jóval pontosabb eredményeket kaptam minden vizsgálati esetben. Emellett a kapcsolt hő- és nedvességtranszport modellezéséhez használt anyagmodelleknél minden releváns esetben figyelembe vettem a higrotermikus anyagtulajdonságok hőmérséklettől és nedvességtartalmuktól való függését annak érdekében, hogy vizsgálataim feltételezését igazoljam azonos peremfeltételek mellett elvégeztem az egyszerűsített modellek szimulációját is.



6. Az egyszerűsített (bal oldal) és a részletes modell (jobb oldal) relatív nedvességtartalma

A vizsgált minimális belső felületi hőmérsékletek és az f_{rsi} hőmérséklettényező vizsgálata során (6. ábra) látható, hogy a tokszerkezet környékén a nedvességtartalom változás a különféle részletezettségű modell esetén eltérő. A beépítési pozíciók és a kávában való elhelyezkedések azonosak, így a különbségek a környező szerkezetekben keresendők. Az egyik legjelentősebb különbség a tégla rácsozásában van, hiszen a részletes modell estében a benne lévő bezárt levegő is megjelenik mindhárom pozícióban (oldalsó ’A’, szemöldök ’B’ és párkány ’C’). Az eredmények tükrében igazolt a modellfelvétel létjogosultsága. [10]

2.6 IV. Tézis - Nyílászárók hőmérsékleti profiljainak elemzése

A hőkamerás felvételek készítésének és elemzésének eredményeként kijelenthetem, hogy a külső határoló felületek közül relatíve a legmagasabb hőmérsékletű felületek megfigyelhetők, ezáltal a hőhidak helyzete lokalizálható.
A hőkamerás felvételek elemzése után megállapítottam, hogy az egyik legintenzívebb elszíneződés helye az ablak jobb felső sarkától balra, a vízszintes szakaszon jelentkezett ott, ahol a bukó-nyíló vasalat található. A másik kritikus pont pedig az alsó sarokcsapágynál található.

A leginkább hőhidas felületek meghatározásához hőkamerás képek készítettem a tél végi időszakban, a délutáni órákban, hogy a sugárzásból adódó torzítás csökkenthető legyen.
Nedvességsűrűségek fa nyílászáró esetén EPS (balra) és MW (jobb) hőszigetelé -7 °C –os külső hőmérséklet és 21-24 °C –os belső hőmérséklet esetén már jól láthatóak az épületszerkezetek lehűlő felületei. A hőkamerás felvételeken megfigyelhető, hogy az ablakszerkezet pánt felöli oldalon elhelyezett záródási pontja környékén nincs hőszivárgás, ami a megfelelő záródás szorosságára utal. A felső vízszintes tok és szárny találkozásánál egyenletes változás figyelhető meg, ami arra utal, hogy a záróelemek nem funkció szerint működnek és a torlónyomás hatására a szárny minimálisan elmozdult.

3 ÖSSZEGZÉS ÉS JÖVŐBELI KUTATÁSI TERVEK

3.1 Tudományos eredmények hasznosítási lehetőségei az épületszerkezeti csomópontok tervezésénél

Az épületek energetikai minőségének javítása során az összes energiaveszteségre vetítve egyre nagyobb arányban jelenik meg a vonal menti hőhidak hőveszteségе, ezen belül is a nyílászárók körüli hőveszteség. Az energetikai minősítés tekintetében ezért egyre kevésbé engedhető meg a hőhidak hatásának közelítő figyelembe vétele.
Annak ellenére, hogy több, nyílászáróra és üvegezésre vonatkozó vizsgálattal is találkozhatunk, nem eléggé feltárt és megoldott az ablakok helyzete. Ebből adódóan a disszertáció fő célja a kapcsolódó területek áttekintésével komplexen vizsgálni, hogy a

jelenleg széles körben elterjedt ablakszerkezetekkel, anyagokkal, épületszerkezeti megoldássokkal hő- és páratechnikailag milyen szint érhető el, továbbá hatékony megoldásokat ajánlani a nyílászáró szerkezetek beépítéseivel kapcsolatban magasabb követelményszint elérésére.

A doktori kutatás során célzott csomóponti kapcsolatok vizsgálatát készítettem el ablakbeépítés eseteire, amelyek középpontjában a végeselemes modellezés állt, helyszíni mérésekkel kiegészítve. Az elvégzett kutatások kapcsán a célkitűzéseknek megfelelően vizsgáltam az ablakszerkezetek beépítési variációit. A kutatómunka első részében a Magyarországon elterjedten alkalmazott ablakszerkezetek közül 2 típus esetében készítettem hő- és páratechnikai végeselemes modellezést a *COMSOL Multiphysics Version 5.3.a* program segítségével, amelyben az ablakot, mint terméket, és mint beépített szerkezetet is vizsgáltam. A szimulációs modellekkel sikerült jól alkalmazható, a valóságot jól leíró modelleket felépítenem ami jellemezni a vizsgált ablakszerkezeteket. A munka során mind a 406 szimulált modellen értékeltem a hőmérséklet-eloszlást, a hőáramlási nagyságokat, a relatív nedvességtartalmat és a parciális páranyomást (nedvességhíd) nagyságát. A számításokat minden jellemző keresztmetszetre elvégeztem, ennek megfelelően a számítógépes elemzéseim kiterjedtek a vízszintes, valamint a függőleges alsó és felső metszetekre is. Az eredmények összehasonlításakor a kapott eredmények közötti javulás vagy romlás tekintetében a különbségek %-os eltérését vizsgáltam és ezekből vontam le a végkövetkeztetéseket.

A várakozásoknak megfelelően a vizsgált ablakok falazatba illesztését követően részletes információt kaptam arról, hogy a szabvány által előírt peremfeltételek mellett a szerkezet egyes rétegeiben milyen minimális hőmérsékletértékek és páralecsapódások alakultak ki. A modellek azt is szemléletesen illusztrálják, hogy az eltérő hővezetésű szerkezeti elemek összeépítését követően az egyes hőmérsékleti zónák milyen mértékben hajolnak meg, illetve tolódnak el.

A kutatómunka második részében a beépített ablakszerkezetének vizsgálatára, ellenőrzésére vonatkozóan hőkamerával helyszíni méréseket végeztem, ami a számítógépes vizsgálatokkal szemben, valós környezeti hatások mellett történtek. A vizsgálatokkal és az eredményekkel rávilágítottam arra, hogy a tapasztalatoknak megfelelően, a külső határoló felületek közül hol találhatóak relatíve a legmagasabb hőmérsékletű felületek, ezáltal lokalizáltam a hőhidak helyzetét.

Az ablakszerkezet helyzetének síkbeli változtatása építészeti kérdéseket is felvet, miszerint a homlokzat külső síkján elhelyezett nyílászárók a sík felületjelleget, ellenben a belső sík felé minél inkább eltoltak az épület plasztikus hatását hangsúlyozzák, ami a homlokzat érdekes megjelenésére ad lehetőséget. Az ablakbélletek ilyen módon való kialakítása az épület hagyományos karakterét is megváltoztatja.

3.2 Jövőbeni kutatási feladatok

A vizsgált témakör kutatását nem tekintem lezártnak. Az eddig elvégzett vizsgálatok, és a kapott eredmények rámutattak olyan problémákra, feladatokra, amelyek megoldása további értékes eredményeket szolgáltathat az ablakszerkezetek csomópontba illesztésének javítására, megfelelve ezzel az egyre szigorodó energetikai direktíváknak, rendeleteknek, elvárásoknak.

Kiemelt fontosságú feladatnak tekintem a további irányokat:

- valóságos beépítési helyzetetek pontosabb közelítésével további beépítési lehetőségek szerkezeti kidolgozása, energetikai végeselemes modellezése és szimulálása
- további ablaktípusok modellezése és szimulálása
  (fém ablaktokok és az fa-alu illetve fa-műanyag szerkezetű ablakok)
- további komplex beépítési javaslat kidolgozása
- az EPDM fólia beépítésének vizsgálata kapcsán a jelenlegi állapot és a javítási lehetőségek kombinálása a vonalvezetésben
- a kialakított csomópontok instacioner állapotvizsgálata
- a szimulált csomópontokat konkrét épületekbe helyezve a lehetséges energiamegtakarítás lehetőségeinek egyszerűsített és részletes energetikai számítása

Az eredmények kibővítése után a szakmai hasznosíthatóságot is előtérbe helyezném, mivel a vizsgálataimat már olyan tudományos alaposságúnak vélem, ami már megengedi, hogy ezen műszaki problémák széles spektrumára kínálhassak velük megoldásokat. Gondolok itt példának okáért egy új vonalmenti hőátbocsátási tényező táblázatos útmutatójának összeállítására az ablakbeépítésekhez, hiszen a hatályos szabványok pontatlanul és elnagyolva kezelik ezt a problémát. Ez tartalmazná a minimális hőmérsékleteket a szerkezet pontjain kijelölve és a beépítések vonalmenti hőátbocsátási tényezőjét. Ezáltal a praktizáló mérnökök reális döntéseket tudnának hozni és energetikailag optimalizált beépítéseket javasolhatnának.

IRODALOMJEGYZÉK

[1] http://ezermester.hu/cikk-7396/Hoszigetelo_uvegcsere_fakeretes_ablakokba

[2] International Energy Outlook 2016, U.S. Energy Information Administration (EIA), Washington, USA, 2016.

[3] MacKay, J.C.D.: Sustainable Energy – without the hot air, UIT Cambridge Ltd., Cambridge, England, 2009.

[4] Energy Roadmap 2050, European Commission, Brussels, Belgium, 2011.

[5] Arcipowska, A, Anagnostopoulos, F, Mariottini, F, Kunkel, S, Energy Performance Certificates Across The EU: A Mapping of National Approaches, Buildings Performance Institute Europe (BPIE), Brussels, Belgium, 2014.

[6] *7/2006. (V. 24.) TNM rendelet* az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról

[7] Bakonyi, D., Dobszay, G.: Simplified calculation of non-repeating thermal bridges of the typical Central-European small suburban houses, Pollack Periodica, 2016., vol. 11, № 3, p.p. 43-60.

[8] Nagy, B.: Comparative Analysis of Multi-Dimensional Heat Flow Modeling, Proceedings of the Second International Conference for PhD Students in Civil Engineering and Architecture, 2014., p.p. 468-476.

[9] Tömböly, C.: Problems Caused by Thermal Bridges around Windows of Historic Buildings and Renovation Methods, Acta Technica Jaurinensis, 2017., vol. 10, № 1, p.p. 59-69.

[10] Nagy Balázs, Tömböly Cecília: Nyílászáró beépítések higrotermikus (kapcsolt hő- és nedvességtranszport) elemzése numerikus szimulációk segítségével, Épületeink és Műemlékeink 2018. 76 p.Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2018.05.10-2018.05.11. (ISBN:978-615-5831-03-4) (pp. 20-30.)

[11] Fülöp Orsolya: NEGAJOULE 2020, A magyar lakóépületekben rejlő energiamektakarítási lehetőségek, Energiaklub, 2011, (pp.:1-25).

A TÉZISEKHEZ KAPCSOLÓDÓ SAJÁT PUBLIKÁCIÓK

Dr. Széll Mária, Tömböly Cecília: Magasépítéstan II. Akusztika – épületakusztika; Akusztika, építészeti tervezés; HEFOP/2004; Egyetemi előadási jegyzet internetes felületen közzétéve építőmérnök szakos hallgatók számára, Budapest, 2007 (pp. 104-125.)

Tömböly Cecília: Nyílásáthidalók körül kialakuló hőhidak, Magyar Építéstechnika 2009/7-8. szám, ISSN:1216-6022, 2009. Budapest, (pp. 30-31)

Tömböly Cecília: Nyílásáthidalók körül kialakuló hőhidak problémája, Műszaki és informatikai rendszerek és modellek IV., Széchényi István Egyetem, Műszaki Tudományi Kar, Multidiszciplináris Műszaki, Tudományi Doktori Iskola; ISBN:978-963-7175-67-1; 2011, Győr, (pp. 183-188.)

Porotherm építési rendszer beépítési példái, Wienerberger alkalmazási és tervezési útmutató 13. kiadás, Wienerberger kiadvány (munkatársként részvétel a kidolgozásban), 2012, (pp. 101-203)

Tömböly Cecília: Történelmi ablakszerkezetek körül kialakuló hőhidak problémája, Magyar Építőipar 2014/5. szám, 2014. október, Budapest, ISSN: 0025-0074, (pp. 217-220)

Tömböly Cecília: Történelmi ablakszerkezetek körül kialakuló hőhidak problémája és felújítási lehetőségei, XL. Épületszerkezettani Konferencia-konferenciakötet, elektronikus kiadás, ISBN 978-615-5391-37-8, 2015. május, Győr– Pannonhalma (pp.109-119.)

Porotherm építési rendszer beépítési példái, Wienerberger alkalmazási és tervezési útmutató 2017/1. kiadás, Wienerberger kiadvány (munkatársként részvétel a kidolgozásban), 2017 (pp. 121-251)

Tömböly, C.: Problems Caused by Thermal Bridges around Windows of Historic Buildings and Renovation Methods, Acta Technica Jaurinensis, 2017., vol. 10, (pp. 59-69)

Balázs Nagy, Cecília Tömböly: Hygrothermal Analysis of Window Construction Joints, 6th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering, Subotica, Serbia 20. April 2018, ISBN978-86-80297-73-6, (pp. 91-100)

Nagy Balázs, Tömböly Cecília: Nyílászáró beépítések higrotermikus (kapcsolt hő- és nedvességtranszport) elemzése numerikus szimulációk segítségével, Épületeink és Műemlékeink 2018. 76 p.Konferencia helye, ideje: Budapest, Magyarország, 2018.05.10-2018.05.11. (ISBN:978-615-5831-03-4) (pp. 20-30.)

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönetet szeretnék mondani mindenkinek, aki segítette és támogatta a disszertáció elkészítését. Ez több éves kutatómunka eredménye, amely során számos nehézséggel szembesültem, kezdve a kutatási téma kiválasztásával, a hipotézisek megfogalmazásáig valamint a gyakorlati részben alkalmazott módszertan elsajátításával. Szokás ilyenkor mondani, hogy a doktori kutatómunka alapvetően önálló tevékenység. Viszont saját esetemből kiindulva tudom, hogy témavezetőim, tanszéki kollégáim, egyetemi kollégáim, barátaim és családom útmutatásai és támogatása nélkül ez a disszertáció sem születhetett volna meg.

Külön köszönet illeti:

Témavezetőmet, Dr. Koppány Attila egyetemi tanárt, aki lehetőséget teremtett a doktori témám kifejtésére, és éveken át támogató segítséget nyújtott.
Hálás köszönet illeti Dr. Tóth Eleket a támogatásért és a számos elmélyült beszélgetésért, melyek segítségével az energetikáról alkotott képem nagymértékben kibővült. Ezen kívül szakmai tanácsaival és személyes bátorításával segítette a disszertáció létrejöttét.
Csanaky Juditnak, aki doktori kutatásom és a disszertáció megírása során értékes, hasznos tanácsaival segítette munkámat és szakmai fejlődésemet.
Nagy Balázst, aki a véges elemes szimulációk futtatásában nyújtottak segítséget.

A BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék oktatóit és dolgozóit, akik az utolsó pillanatig lelkesen segítették a munkámat és ezzel együtt lehetőséget biztosítottak a tanszéki kutatásokban és fejlesztésekben való közreműködésre, továbbá a tanszéki műszerek, berendezések, hardver és szoftver eszközök használatára.

Végül, de nem utolsó sorban köszönöm férjem, fiaim és családom odaadó szeretetét és folyamatos támogatását a legnehezebb pillanatokban is.