

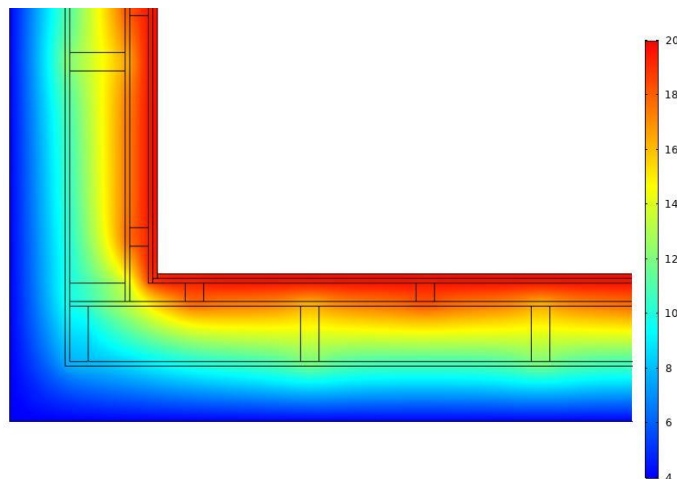
M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR

ÉPÍTŐANYAGOK ÉS MAGASÉPÍTÉS TANSZÉK

Épületszerkezeti csomópontok vizsgálata kapcsolt hő- és páratechnikai szimulációval



TDK Dolgozat

MAROSVÖLGYI MARTIN

Konzulens:

Dr. Szalay Zsuzsa, egyetemi docens

Dr. Nagy Balázs, egyetemi adjunktus

Budapest, 2019.10.28.

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék	1
Ábrajegyzék	2
Táblázatjegyzék	3
Jelölések jegyzéke	4
Absztrakt	6
Summary	6
1. Bevezetés	7
2. Szakirodalmi áttekintés	8
2.1. A hőhíd meghatározása, típusai.....	9
2.2. A hőhíd számítása:	10
2.3. Hőhidakkal foglalkozó tudományos kutatások:	14
2.4. Kapcsolt hő és páratechnikai szimulációk.....	16
3. Módszertan	18
3.1. A geometria modellezése	18
3.2. Peremfeltételek meghatározása	20
3.3. Anyagmodellek bemutatása.....	20
3.4. Hőtechnikai szimuláció	23
3.5. Kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció.....	23
4. Eredmények	25
4.1. Hőtechnikai szimulációk eredménye.....	25
4.2. Kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimulációk eredménye	30
4.3. A két módszer eredményeinek az összehasonlítása	34
4.4. Érzékenység vizsgálat	36
5. Összefoglalás és megállapítások	38
6. Köszönetnyilvánítás	38
7. Irodalomjegyzék	39

Ábrajegyzék

1. ábra: a hővesztések részarányának alakulása [4].....	8
2. ábra: A hőhidak típusai: a) geometria hőhid b) anyageredetű hőhid c) szerkezeti hőhid d) periodikusan ismétlődő hőhid e) konvektív hőhid f) környezeti eltérések miatti hőhid. [6].....	10
3. ábra: háromdimenziós csomópont felosztása véges elemes módszerrel (bal oldalt), illetve a szimuláció lefuttatása utáni eredmény (jobb oldalt) látható [11].....	14
4. ábra: Hővesztések az egyes vizsgált felületeken keresztül [11].....	15
5. ábra: Határoló falszerkezetet érő hő- és nedvességátadások [15]	16
6. ábra: a relatív nedvességtartalom és a nedvességtartalom függvényében a nedvességtárolási módok [14]....	17
7. ábra: a modellezés folyamata	19
8. ábra: balra expandált polisztirolhab, jobbra kőzetgyapot nedvességtárolási képessége.....	20
9. ábra: balra OSB lap, jobbra fenyő faszerkezet nedvességtárolási képessége.....	21
10. ábra: balra égetett agyag termékek, jobbra javított mészcement vakolat nedvességtárolási képessége.....	21
11. ábra: gipszkarton tábla nedvességtárolási képessége.....	21
12. ábra: expandált polisztirolhab hőszigetelő anyag hőátbocsátási tényezőjének nagysága a hőmérséklet [K] és a relatív nedvességtartalom függvényében [-]	22
13. ábra: B30 blokktegla hőtechnikai szimulációs hőmérsékleteloszlása sarok és egyenes csomópont esetén	26
14. ábra: LeierPlan 30 N+F, kétoldalt vakolt falazat hőtechnikai szimulációs hőmérsékleteloszlása sarok és egyenes csomópont esetén.....	26
15. ábra: LeierPlan 30 N+F, kétoldalt vakolt, 8 cm vtg. EPS szigetelésű falazat hőtechnikai szimulációs hőmérsékleteloszlása sarok és egyenes csomópont esetén	26
16. ábra: polisztirol zsaluelemes falazat hőtechnikai szimulációs hőmérsékleteloszlása sarok és egyenes csomópont esetén	26
17. ábra: A hagyományos csomópontokon keresztülhaladó hőáramok nagysága hőtechnikai szimuláció esetén, viszonyítás a modern LeierPlan 30 N+F vázkerámia téglához.....	27
18. ábra: A modern csomópontokon keresztülhaladó hőáramok nagysága hőtechnikai szimuláció esetén	28
19. ábra: a szerkezet épületfizikai tulajdonságainak javulása a hőszigetelő réteg vastagságának függvényében (0% szigetelés nélküli vázkerámia fal, 100% 16 cm vastag EPS szigetelésű vázkerámia fal)	29
20. ábra: a pszi értékek hőtechnikai szimulációk alapján számított nagysága modern csomópontok esetén	29
21. ábra: Fa vázszerkezetes épület 15 cm vastag EPS szigeteléssel, 16-os sd értékű föliával balról jobbra, fentről lefelé haladva: hőmérsékleteloszlás, relatív nedvességtartalom, hőáram sűrűség, nedvességáram sűrűség	31
22. ábra: LeierPlan 30 N+F vázkerámia falazat 8 cm vastag EPS szigeteléssel balról jobbra, fentről lefelé haladva: hőmérsékleteloszlás, relatív nedvességtartalom, hőáram sűrűség, nedvességáram sűrűség	31
23. ábra: A hagyományos csomópontokon keresztülhaladó hőáramok nagysága kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció esetén, viszonyítás a modern LeierPlan 30 N+F vázkerámia téglához	32
24. ábra: A modern csomópontokon keresztülhaladó hőáramok nagysága kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció esetén.....	32
25. ábra: a pszi értékek kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimulációk alapján számított nagysága modern csomópontok esetén.....	33

26. ábra: Hagyományos csomóponti kialakítások hőtechnikai és kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció által meghatározott U értéke..... 34

27. ábra: Szimulációs módszerek eredményei közti eltérés, százalékosan 34

Táblázatjegyzék

1. táblázat: A csatlakozási hőhidak hatását kifejező korrekciós tényező [8] 12

2. táblázat: Tájékoztató adatok a ζ korrekciós tényező kiválasztásához [8] 12

3. táblázat: A hőtechnikai szimulációk eredménye..... 27

4. táblázat: a kapcsolt hő- és nedvességtranszport szimulációk eredményei 30

5. táblázat: belső felületi minimum hőmérsékleti értékek és saját léptékben mért hőmérsékleti értékek hőtechnikai és kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimulációval meghatározva 35

6. táblázat: Érzékenységvizsgálatok eredményei 36

Jelölések jegyzéke

<u>Jele</u>	<u>Megnevezés</u>	<u>Mértékegység:</u>
U	rétegrend hőátbocsátási tényező	$\frac{W}{m^2 * K}$
$T_{s,min}$	belső felületen mért hőmérsékleti minimum érték	°C
f_{Rsi}	saját léptékben mért	°C
ψ	a k csatlakozási hőhíd vonalmenti hőátbocsátási tényezője	$\frac{W}{m * K}$
χ	korrekciós érték a hőhídhatalás figyelembevételéhez	-
T_i	belső levegő hőmérséklete	°C
T_e	külső levegő hőmérséklete	°C
h_{si}	belső hőátadási tényező	$\frac{W}{m^2 * K}$
h_{se}	külső hőátadási tényező	$\frac{W}{m^2 * K}$
l_k	a k csatlakozási hőhíd hossza	m
A_i	az i épülethatároló szerkezet területe	m ²
χ_j	a j pontszerű hőhíd hőátbocsátási tényezője	$\frac{W}{K}$
ζ	A csatlakozási hőhidak hatását kifejező korrekciós tényező	-
λ_1	első környezeti állapot hővezetési tényezője	$\frac{W}{m * K}$
λ_2	második környezeti állapot hővezetési tényezője	$\frac{W}{m * K}$
F_T	hőmérséklet-átszámítási tényező	-
F_m	nedvesség-átszámítási tényező	-
f_t	hőmérséklet-átszámítási együttható	$\frac{1}{K}$
T_1	az első környezeti állapot hőmérséklete	K
T_2	a második környezeti állapot hőmérséklete	K
f_u	a nedvesség-átszámítási együttható, tömeg/tömeg szerint	-
u_2	az első környezeti állapot szerinti nedvességtartalom, tömeg/tömeg szerint	-
u_2	a második környezeti állapot szerinti nedvességtartalom, tömeg/tömeg szerint	-

q	hőáramsűrűség	$\frac{W}{m^2}$
Q	hőforrás	$\frac{W}{m^3}$
d _z	modell „z” irányú vastagsága	m
λ _{eff}	a hőmérséklettől és a nedvességtől függő effektív hővezetési tényező	$\frac{W}{m * K}$
T	abszolút hőmérséklet	K
L _v	fázisváltás látens hője	$\frac{J}{kg}$
δ _p	páradiffúziós (párovezetési) tényező	$\frac{g}{m * s * Pa}$
φ	relatív nedvességtartalom	-
p _{sat}	telítési párányomás	Pa
g	nedvességáram sűrűség	$\frac{kg}{m^2 * s}$
G	nedvességforrás	$\frac{kg}{m^3 * s}$
ξ	differentiális nedvességkapacitás;	$\frac{kg}{m^3}$
D _w	diffúziós tényező (folyadéktranszport tényező)	$\frac{m^2}{s}$
w	nedvességtartalom	$\frac{kg}{m^3}$

Absztrakt

Az elmúlt években egyre nagyobb teret hódít az épületszerkezetek vizsgálatában a kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció. Kutatásomban megvizsgáltam, mekkora mértékben térnek el az így kapott eredmények a korábbi, pusztán hőtechnikai szimuláción alapuló modellek eredményeitől. Az átfogó kép eléréséhez számos jellemző szerkezeti kialakítást is modelleztem, több építőanyag felhasználásával. A modelleket számítógépes szoftverek segítségével futtattam le a MSZ EN ISO 10211:2017 szabvány szerint.

Egy-egy csomóponton, mindkét szimulációs módszer segítségével meghatároztam a belső felület legalacsonyabb hőmérsékletét, a saját léptékben mért hőmérsékletet, a szerkezeten keresztülhaladó átlagos hőáramsűrűséget, valamint a vonalmenti hőátbocsátási tényező értékét.

Summary

Analysis of Building Construction Details with Heat and Moisture Simulation Recently, the application of heat and moisture simulation has grown in the analysis of building constructions. In this research, I compared the results obtained with a thermal and a coupled heat and moisture simulation. Several typical constructional details with different building materials were selected. The models were analysed with a finite element method according to MSZ EN ISO 10211:2017.

The minimum surface temperature, the temperature factor, the average heat flux density and the linear thermal transmittance value was calculated for each detail using the two methods.

1. Bevezetés

Az elmúlt években (globális szinten már a '90-es évek óta) a klímaváltozás és a véges energiahordozó készletek miatt egyre több szakértő kezdett el foglalkozni a szerkezetek, épületek hőtechnikai tulajdonságaival, hogy az épületeinknek egyre jobb legyen a hőátbocsátási tényezőjének értéke, mely hatására kisebb lesz a hőveszteség, mely magában hordozza a csökkenő fenntartási költségeket is.

Ennek a szemléletmódnak az elterjedéséhez szükséges volt, hogy az építetők hozzáállása is változzon, tudatosan törekedjenek az egyre kisebb ökolábnyom elérésére, melynek egyik lépése az otthonaink energiaigényének csökkentése volt. A cél elérésére az építőanyagaink hőtechnikai tulajdonságainak labormérésekkel történő megismerése és a tudatos tervezői munka (átgondolt csomóponti kialakítás, hőhídmentesség, épület és nyílászárók tájolás, épület felület/térfogat aránya, stb.) volt a legnagyobb hatással.

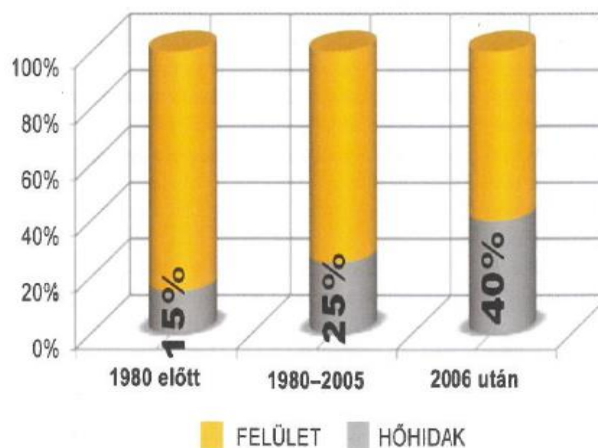
Az így kialakult szemléletmódváltás hatására kifejlesztett újfajta épülettípusok, az alacsony energiaszintű épület és a passzívház. Ezeknek az épületeknek lényegesen kisebb a fajlagos nettó fűtési igénye, mint a hagyományos épületeknek. Fontos kiemelni, hogy a passzívház nem egy különleges, egyedi, máshol nem használt technológiák és anyagok felhasználásával tervezett és megvalósított épület, hanem a már ismert építési eljárásokkal és anyagokból létrehozható, nagyon jó minőségű ház, amely annyiban tér el bármely más épülettől, hogy megfelel három – a fajlagos fűtési energiaigényre, a légtömörségre és a fajlagos összes primerenergiaszükségletre vonatkozó – peremfeltételnek [1] [2].

Napjainkra ebből a civil kezdeményezésből az Európai Unió gazdasági és klíma politikáját is befolyásoló tényező lett. Ezen irányelveket követve az Európai Unió kidolgozott egy több lépcsőben életbe lépő szabályrendszert [3], mely hatására 2021. január 1-től minden új épületet – forrásfelhasználástól függetlenül - közel nulla követelmény szinten kell megvalósítani Magyarországon is. Az első két lépcső 2018. és 2019. január 1-én lépett hatályba.

A rendeletben meg van határozva minden épülethatároló szerkezetnek a maximum rétegrendi hőátbocsátási tényezője (U-érték).

Kutatásomban célja a magyar gyakorlatban fellelhető szerkezeti kialakítások geometriai hőhídhatásának vizsgálata először hőtechnikai, majd kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimulációval.

A téma aktualitását Csanaky Judit Emília tanulmányában [4] található ábra szemlélteti legjobban. A tanulmánya szerint a felületek egyre jobb hőszigetelésének következtében az épületek teljes hőveszteségi mérlegében a vonalmenti hőveszteség aránya növekszik (lásd 1. ábra).



1. ábra: a hőveszteségek részarányának alakulása [4]

A vizsgálatok során minden csomópont esetén meghatároztam mindkét szimulációs módszerrel a belső felület minimum

hőmérsékletét ($T_{s,min}$), saját léptékben mért hőmérsékletét (f_{Rsi}), átlagos hőátbocsátási tényezőjét (U) és a pszi (ψ), vagyis a hőhídhatásból eredendő többlet hőveszteséget.

Az így kapott eredményeket többféle szempont szerint is lehet vizsgálni:

- Az egyes csomóponti kialakításoknál mekkora a többlet hőveszteség a geometriai (sarok csomópont) hőhíd hatására?
- Mekkora mértékben térnek el a kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció eredményei, a lényegesen egyszerűbb hőtechnikai szimuláció eredményeitől?

2. Szakirodalmi áttekintés

A nagyobb energiamegtakarítási iránti igény jobban hőszigetelt szerkezetekhez vezetett, amelyek általában sokkal érzékenyebbek a nedvességgel kapcsolatos problémákra, mint a hagyományos, kevésbé, vagy egyáltalán nem szigetelt épületek. A megfelelő hő- és nedvességtechnikai tervezés napjainkban ezáltal elengedhetetlen, ha egy energiahatékony, károsodásmentes épületet szeretnénk tervezni. Napjainkban Magyarországon is több kutatás folyik már a hő- és nedvességtranszport kapcsolt viselkedésének vizsgálatában mind az anyagokra, mind az épületszerkezetre, mind a teljes épületre vonatkozóan.

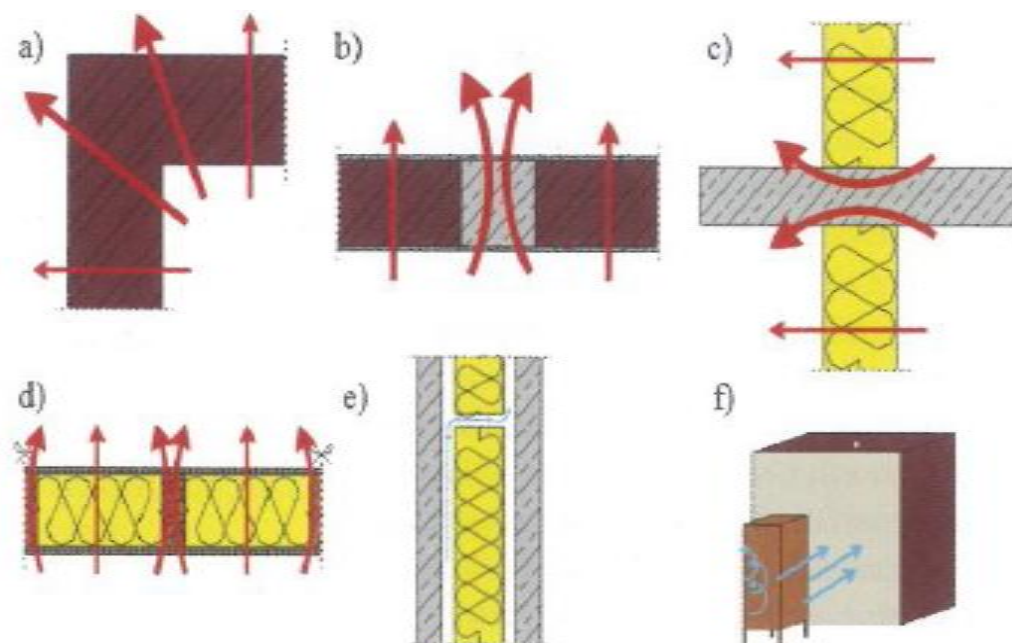
A szakirodalmi áttekintésben először bemutatom a hőhíd fogalmát, számítási módszereit és áttekintést adok az ezzel kapcsolatos kutatásokról, majd ismertetem a kapcsolt hő- és páratechnikai szimulációk alapját.

2.1. A hőhíd meghatározása, típusai

A hőhíd a szerkezet azon része, melynél a környező elemek átlagos hőáramához képest eltérő mértékű, többdimenziós hőáramlás alakul ki, röviden megváltozik a hőáramok gradiense. Gyakorlatiasan megfogalmazva lokálisan megnövekedett hőveszteségről beszélhetünk [5]. A hőhidak felismerésének egyik módja a szerkezetek felületi hőmérsékleteinek megfigyelése. A környezetéhez képest alacsonyabb felületi hőmérséklet utal a hőhíd jelenlétére. Az izoterma vonalak egymáshoz viszonyított iránytangensének megváltozása is hőhidat jelez, de ehhez számítógépes szimuláció szükséges.

A hőhidakat az őket okozó jelenség alapján különböztetjük meg [6]. Ezek alapján megkülönböztetjük az alábbi hőhidakat (lásd 2. ábra):

- Geometriai hőhíd: olyan épületszerkezetnél alakul ki, ahol megváltozik annak formája (pl.: falsarok, kiugró, kiálló szerkezeti elem, stb.)
- Anyageredetű hőhíd: a szerkezet geometriai formája nem változik, de a szerkezetet alkotó anyagban változás áll be (pl.: más anyagból készülő pillérek, nem egyenlő minőségű anyagból készült monolitikus szerkezetek, egy felületen történő, azonos vastagságú hőszigetelő anyagok egymás mellett történő alkalmazása, stb.)
- Szerkezeti hőhidak: amikor az előző két eset együtt fordul elő (pl.: áttörések, konzolos erkélylemez, tervszerűen kihagyott nyílások, stb.)
- Periodikusan ismétlődő hőhidak: ez a típusú hőhíd egy szerkezetben jól meghatározható mintázat szerint ismétlődik (pl.: hőszigetelés mechanikus rögzítése, tetőszerkezet szarufái, stb.)
- Konvektív hőhidak: a szerkezeten belül kialakuló, előre nem tervezett légmozgások tartoznak ebbe a csoportba. Fontos kiemelni, hogy ez a hőhíd nem „csupán” hőveszteséget okoz, hanem rontja a környező anyagok hővezetési tulajdonságait is (pl.: építési pontatlanságból adódhat, szerkezeten belüli rések, stb.)
- Környezeti eltérések miatti hőhíd: nem a szerkezet miatt alakul ki, hanem az azt érő külső hatások miatt jön létre hőhíd a szerkezetünkben (pl.: szerkezet egyik része árnyékolóval el van látva a külső oldalon, falazat elé bútort vagy fűtőtestet helyezünk, stb.)



2. ábra: A hőhidak típusai: a) geometria hőhid b) anyageredetű hőhid c) szerkezeti hőhid d) periodikusan ismétlődő hőhid e) konvektív hőhid f) környezeti eltérések miatti hőhid. [6]

2.2. A hőhid számítása:

A hőhidak figyelembevétele egyszerűsített és részletes eljárással is történhet. Az egyszerűsített eljárás esetén kézi számítási módszerrel vagy tanúsító szoftverrel határozzuk meg a hőhidak nagyságát. Ez az eljárás jelentős egyszerűsítéseket tartalmaz, így kevésbé pontos eredményt ad. Részletes eljárás esetén egyik lehetőségünk a numerikus modell létrehozása, mely által sokkal pontosabban megismerhetjük az adott jelenség tulajdonságait. Másik lehetőség, hogy hőhidkatalógusból kiválasztjuk a hőhid típusát, nagyságát és egy korrekciós értékkel az eredeti értéket módosítjuk.

A hőhidakat a transzmissziós hőveszteség számítása esetén vesszük figyelembe egy épület energiaigényének meghatározásához a következő összefüggés alapján [7]:

$$H_{tr} = \sum_i A_i U_i + \sum_k l_k \Psi_k + \sum_j \chi_j \quad (1)$$

ahol

- A_i az i épülethatároló szerkezet területe [m^2],
- U_i az i épülethatároló szerkezet hőátbocsátási tényezője [W/m^2K],
- l_k a k csatlakozási hőhid hossza [m],
- Ψ_k a k csatlakozási hőhid vonalmenti hőátbocsátási tényezője [W/mK],
- χ_j a j pontszerű hőhid hőátbocsátási tényezője [W/K].

Egyszerűsített számítási eljárás:

Egyszerűsített módszer alkalmazása esetén a hőhidakat a következő összefüggés szerint:

$$H_{tr} = \sum_i A_i U_{R,i} \quad (2)$$

ahol

$$U_R = U \cdot (1 + \zeta) \quad (3)$$

kell figyelembe venni.

A ζ korrekciós tényező értékeit a szerkezet típusa és a határolás tagoltsága függvényében az alábbi táblázat (1. táblázat) [8] tartalmazza:

Határoló szerkezetek			A csatlakozási hőhidak hatását kifejező korrekciós tényező ζ
Külső falak ¹⁾	külső oldali, vagy szerkezeten belüli	gyengén hőhidas	0,15
	megszakítatlan hőszigeteléssel	közepesen hőhidas	0,20
		erősen hőhidas	0,30
		gyengén hőhidas	0,25
	egyéb külső falak	közepesen hőhidas	0,30
		erősen hőhidas	0,40
gyengén hőhidas		0,10	
Lapostetők ²⁾	közepesen hőhidas	0,15	
	erősen hőhidas	0,20	
	gyengén hőhidas	0,10	
Beépített tetőteret határoló szerkezetek ³⁾	közepesen hőhidas	0,15	
	erősen hőhidas	0,20	
	gyengén hőhidas	0,10	

Padlásfödémek ⁴⁾		0,10
Árkádfödémek ⁴⁾		0,10
Pincefödémek ⁴⁾	szerkezeten belüli hőszigeteléssel	0,20
	alsó oldali hőszigeteléssel	0,10
Fűtött és fűtetlen terek közötti falak, fűtött pincetereket határoló, külső oldalon hőszigetelt falak		0,05

1. táblázat: A csatlakozási hőhidak hatását kifejező korrekciós tényező [8]

- 1) Besorolás a pozitív falsarkok, a falazatokba beépített, az elemen belüli hőhidak közé nem sorolt acél vagy vasbeton pillérek, a homlokzatsíkból kinyúló falak, a nyílászáró-kerületek, a csatlakozó födémek és belső teherhordó falak, erkélyek, lodzsák, függőfolyosók hosszának fajlagos mennyisége alapján (a külső falak nyílászárókkal együtt vett felületéhez viszonyítva).
- 2) Besorolás az attikafalak, a mellvédfalak, a fal-, felülvilágító- és felépítmény-szegélyek hosszának fajlagos mennyisége alapján a (tető felületéhez viszonyítva, a tetőfödém kerülete a külső falaknál (belső méretekkel) figyelembe véve).
- 3) Besorolás a tetőélek és élszaruk, a felépítményszegélyek, a nyílászáró-kerületek hosszának, valamint a térd- és ormfalak és a tető csatlakozási hosszának fajlagos mennyisége alapján (a födém kerülete a külső falaknál figyelembe véve).
- 4) A födém kerülete a külső falaknál figyelembe véve.

A besoroláshoz szükséges tájékoztató adatokat az alábbi táblázat (2. táblázat) tartalmazza.

	A hőhidak hosszának fajlagos mennyisége (fm/m^2)		
Határoló szerkezetek	Határoló szerkezet besorolása		
	gyengén hőhidas	közepesen hőhidas	erősen hőhidas
Külső falak	< 0,8	0,8 - 1,0	> 1,0
Lapostetők	< 0,2	0,2 - 0,3	> 0,3
Beépített tetőtereket határoló szerkezetek	< 0,4	0,4 - 0,5	> 0,5

2. táblázat: Tájékoztató adatok a ζ korrekciós tényező kiválasztásához [8]

Részletes számítási eljárás:

Részletes számítási eljárás esetén 2 lehetőség is van a hőhidak számítására: hőhidkatalógus használata és numerikus szimuláció.

Hőhidkatalógus esetén az értéket az MSZEN ISO 14683 egyszerűsített hőhidkatalógusként alkalmazható szabványból kell kikeresni, mely érték kiválasztásához ismernünk kell a csomópont típusát, a hőhid fajlagos hosszát, típusát. Ez a szabvány nem tartalmaz minden csomóponti típust. Ezt követően a szabványban meghatározott értékkel vesszük figyelembe a hőhidhatást. Ez az eredmény jó közelítő értéket ad a hőhidjelenség nagyságának ismeretéhez. Magyarországon csak az YTONG rendelkezik a saját termékcsaládjuk csomópontjaira vonatkozó hőhidkatalógussal [9].

Ha pontosan szükséges meghatározni a hőhidhatás nagyságát akkor elengedhetetlen a számítógépes numerikus szimuláció használata az MSZEN ISO 10211 szabvány szerinti modellezési szabályokat betartva. Először számítógépes szimulációs modellt kell létrehozni, melyben kettő- vagy három dimenzióban is vizsgálhatjuk a kiválasztott épületszerkezetben kialakuló hőáram nagyságát a különböző külső hatások függvényében a kiválasztott pontosságban. A szimulációk eredménye a valóságot nagyban megközelíti. A számítógépes szimuláció folyamata a modell megalkotásával, majd az anyagok definiálásával kezdődik. Ezután a peremfeltételek és a szerkezetet érő hő- (és nedvesség) hatások megadása történik. Ha mindezzel készen vagyunk, akkor a modellünket felosztjuk véges elemes háló segítségével és lefuttatjuk a szimulációt. Legutolsó lépésként a kapott eredményeket kiértékeljük. A két legelterjedtebb módszer, a véges elemes módszer és a véges differencia módszer.

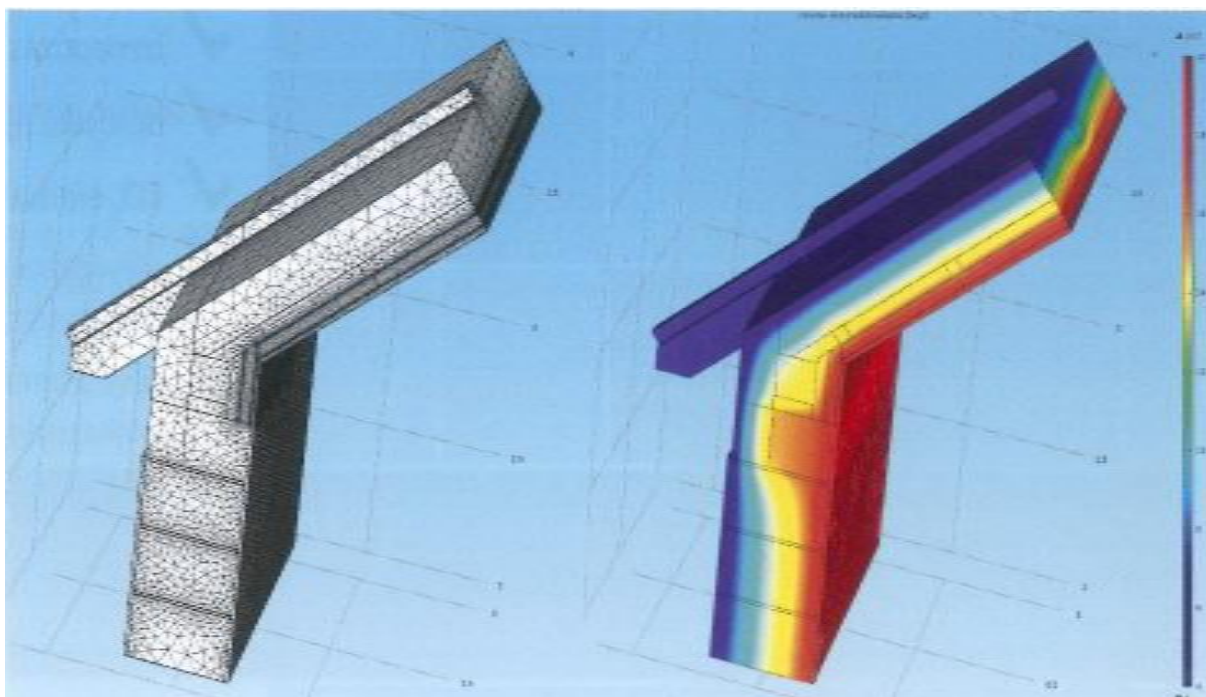
- Véges elemes módszer: a teljes vizsgált tartományt leíró parciális differenciálegyenletek megoldásait a tartomány részhalmazaira felírt egyszerűbb egyenletek megadásával, majd ezen egyenletek megoldásainak összeillesztésével közelíti meg.
- Véges differencia módszer: az időben és térben folytonos függvényeket diszkrétizálja (véges sok pontra és meghatározott időpontokra írja le), a differenciálegyenletekből differencia egyenleteket állít elő, és a differenciahányadosokkal közelíti a differenciálegyenletben szereplő deriváltakat.

2.3. Hőhidakkal foglalkozó tudományos kutatások:

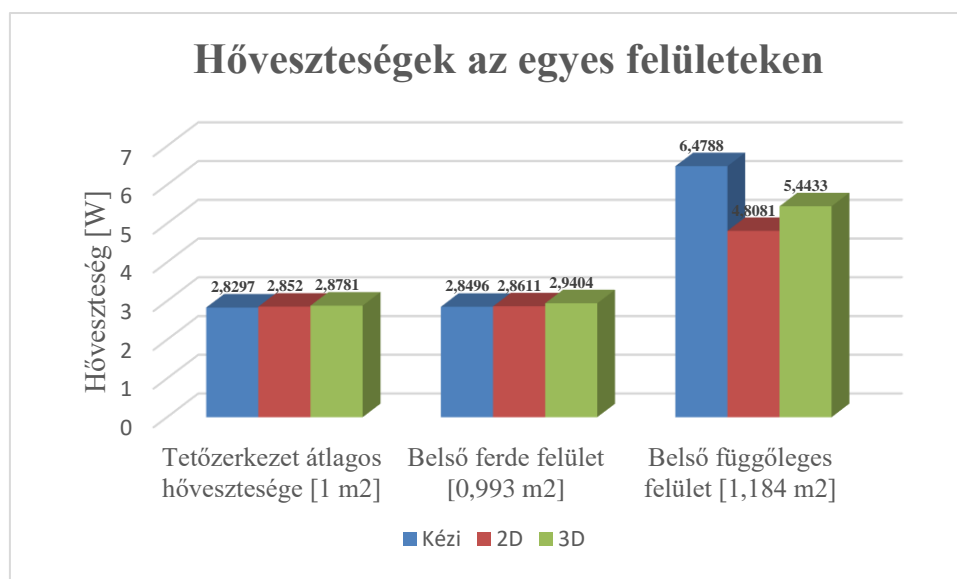
Több nemzetközi és hazai kutatás [10] is foglalkozott már az épületek hőhídjainak figyelembevételi lehetőségeivel, az egyes módszerek közötti eltérések nagyságával. A témában számos esettanulmány is készült.

A hazai mérnökök közül Nagy Balázs is foglalkozott már vizsgálati módszerekből adódó eltérések nagyságának meghatározásával [11]. Meghatározta egy csomóponti kialakításnak (magastető ereszvonali csomópont) a rétegrendi hőátbocsátási tényezőjét egyszerűsített számítással, illetve részletes, szabvány szerinti (MSZ EN ISO 10211) két- vagy háromdimenziós modell használatával. A szimulációkat véges elemes módszerrel (VEM) végezte el.

Legpontosabb eredményt a háromdimenziós vizsgálat (lásd 3. ábra) esetén kapunk, de ez a vizsgálat időigényesebb is, illetve nagyobb erőforrást igényel a szimuláció lefuttatása is. Ha csak síkban vizsgáljuk a keresztmetszetet, akkor szükséges minden egyes előforduló keresztmetszet vizsgálata, majd előfordulási gyakoriság arányaiban a kapott eredmények átlagolása. Háromdimenziós modell esetén a teljes modellt részletesen fel kell építenünk.



3. ábra: háromdimenziós csomópont felosztása véges elemes módszerrel (bal oldalt), illetve a szimuláció lefuttatása utáni eredmény (jobb oldalt) látható [11]



4. ábra: Hővesztések az egyes vizsgált felületeken keresztül [11]

A kapott eredményekből (lásd 4. ábra) kiolvasható, hogy a kézi módszer majdnem 20 %-kal túlbecsülte, míg a kétdimenziós 12 %-kal a biztonsággal szemben tévedett a háromdimenziós modellhez képest a belső függőleges felület vizsgálata folyamán. Továbbá megfigyelhető, hogy mikor a tetőszerkezetet vizsgáltuk, +/- 2 % eltérést tapasztaltunk a 3 vizsgálat között. Ezek alapján megállapítható, hogy összetett csomópontot háromdimenziós modellel javasolt vizsgálni, ha a hővesztésre vagyunk kíváncsiak. Egyszerűbb szerkezetek esetén elegendő a kézi, vagy kétdimenziós vizsgálati módszer.

A témában számos esettanulmány is készült. Bakonyi Dániel Kakasy Lászlóval közösen megvizsgálta a vasbeton erkélylemezek utólagos hőszigetelésének lehetőségeit [12]. A külső térelhatároló falazat a mintacsomóponton 38 centiméter vastagságú vázkerámia falazóelemekből, hagyományos falazóhabarcs felhasználásával épült, mindkét oldalán vakolt felülettel. A monolit vasbeton födém szerkezet a belső terek között 20 centiméter, az erkélyen 15 centiméter vastagságú, átmenő lemezkonzolként van megoldva. Több hőszigetelési módszert is összevetettek, a belső felületi hőmérsékleti minimum, és a szerkezet U értékének összehasonlításával. Eredményeikből kiderül, hogy a legkedvezőbb kialakítás, ha a törekszünk a termikus burok létrehozására, mellyel a vonalmenti hőhidak hatása csökkenthető.

Ugyancsak Bakonyi Dániel és Becker Gábor megvizsgálta, hogy milyen épületfizikai hatást vált ki a gerébtokos ablakok cseréje [13]. Kutatásuk során megállapították, hogy minden esetben megnő a vonalmenti hőhid hatása, melynek következtében a belső felület minimum hőmérséklete is csökken. Megvizsgálták ezek után a penészedés kockázatát, mely során

kiderült, hogy minden esetben a gerébtokos nyílászárók cseréje után páralecsapódás fog bekövetkezni, mely a penészedés kialakulásának kockázatát növeli.

Összességében kijelenthető, hogy a kapcsolt gerébtokos ablakok a nagy szerkezeti vastagságuk miatt ideális módon csatlakoztak a rossz hőátbocsátási tényezővel rendelkező vastag falazatokhoz. Az ablakbeépítés után vonalmenti hőátbocsátás lényegében alig alakult ki, a belső felületek hőmérséklete is elfogadható szinten maradt. A nyílászáró cseréjének következtében ez az összhang megbomlik, az új, hőszigetelt kétrétegű ablakszerkezet mindössze pár centire zsugorodik, így a hőáramok megkerülik azt és a relatív jó hővezetésű téglafalazatban alacsonyabb felületi hőmérsékletet eredményeznek. Továbbá fontos kiemelni, hogy a nyílászáró csere következtében a spontán légcseré a töredékére csökken, a penészedés kockázatát tovább növelve ezáltal.

2.4. Kapcsolt hő és páratechnikai szimulációk

A megfelelő hő- és nedvességtechnikai tervezés napjainkban elengedhetetlen, ha egy energiahatékony, károsodásmentes épületet szeretnénk tervezni. Innovatív épületszerkezeteink a hagyományos kialakításokhoz képest sokkal érzékenyebbek a nedvességgel kapcsolatos problémákra, a jobb hőszigetelésüknek köszönhetően.

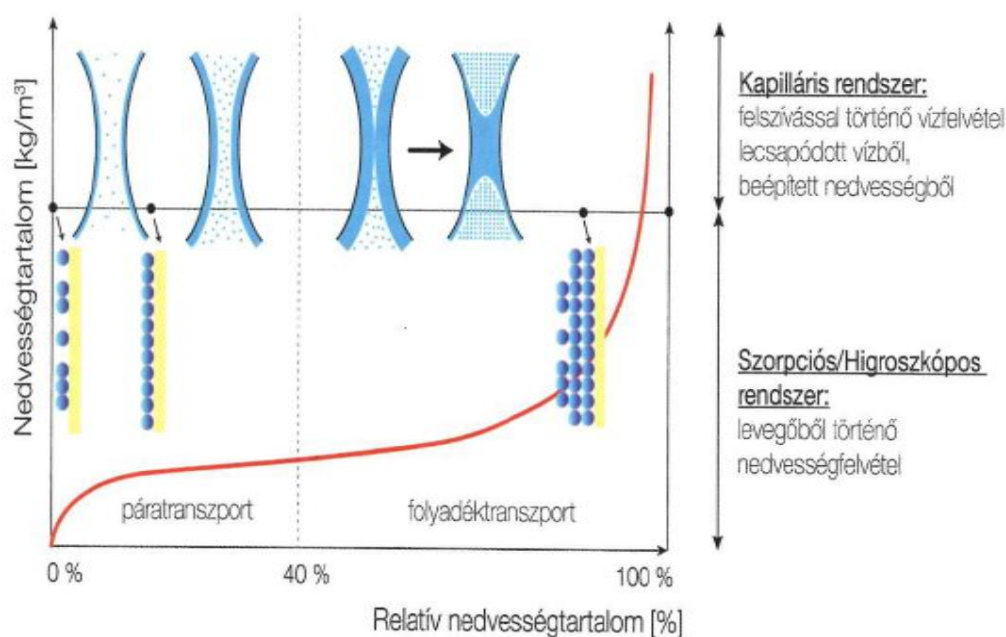
Az épületszerkezeteinket jelentős nedvességtechnikai hatások érik [14] a külső és belső oldalon is (lásd 5. ábra). Ilyen külső oldali hatás például a csapóeső, a talajvízből felszálló nedvesség nem megfelelő szigetelés esetén. Belső oldalon is számos hatás éri a szerkezetünket. Az épület használata során keletkező pára (főzés, teregető használata, zuhanyzás, kádban fürdés, stb.), a páravándorlás során kicsapódott nedvesség és a kezdeti építési nedvesség is jelentős nedvességtechnikai teher az épületszerkezetekre nézve.



5. ábra: Határoló falszerkezetet érő hő- és nedvességhatások [15]

Építőanyagainknak két nedvességtárolási módját különböztetjük meg [14], a szorpcióst és kapillárist. A legtöbb általunk használt anyag képes a szorpcióst nedvességtárolásra, vagyis a vízpára-molekulát a felületén megkötni, ezeket az anyagokat hidrofilnek nevezzük. Minél porózusabb az anyag, annál nagyobb belső felülettel rendelkezik, annál több vízpára-molekulát képes megkötni.

Ahogy a relatív nedvességtartalom emelkedik, több rétegben tapad az anyag falához a pára, mígnem a szemben lévő rétegek elkezdenek összekapcsolódni (lásd 6. ábra). Akkor beszélünk kapilláris nedvességtárolásról, mikor a nedvességtároló képesség átlépi a kritikus nedvességtartalmat. Ha az anyag az összes vízmolekulát adszorbeálta, további nedvességet csak a pórusokban és az őket összekötő kapilláris csövekben, repedésekben képes tárolni.



6. ábra: a relatív nedvességtartalom és a nedvességtartalom függvényében a nedvességtárolási módok [14]

A szimulációknak két kimenetele van, egy ami tartalmazza a hő- és nedvességáramokat, illetve a másik, mely a hőmérséklet, nedvességtartalom, víztartalom tranziens keresztmetszeti eloszlását mutatja számunkra. Az eredményeket először le kell ellenőrizni, hogy megbízhatóak-e, nem tartalmaznak következetlenségeket. Az összes ki- és bemeneti adatot ellenőrizni kell, ha lehetséges, akkor az eredményeket egy arra alkalmas kísérlettel kell összevetni. Ha az eredmények nem megfelelőek, akkor más hálófelosztással, bemeneti adatokkal, újra el kell végezni a szimulációt. Ezután az eredmények validálása következik. Legvégül pedig a kapott eredmények utófeldolgozása következik, vagyis az eredmények könnyebben áttekinthető formára való leképezése.

A téma egyik úttörőjének számító Hartwig M. Künzl néhány tanulmányát is elolvastam. Az ő megállapításai [16] [17] [18] alapozták meg az épületfizikában a kapcsolt hő- és nedvességtranszport (HAM) számításának alapjait. A legtöbb mai napig is használt építőanyag hővezetési tényezőjének nedvességfelvételre való érzékenységének modelljeit meghatározta [19] labormérésekkel, létrehozva a számítógépes szimulációk által is használt anyagmodelleket. A kapcsolt hő- és nedvességtranszporttal foglalkozó szoftverek közül a mai napig az élen jár az ő és csapata által fejlesztett WUFI nevezetű szoftver, mely adatbázisában számos anyagmodell megtalálható.

Számos kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláción alapuló esettanulmány készül már, melyek közül egyet én is tanulmányoztam, melynek témája a nyílászárók beépítésének összehasonlítása numerikus szimulációk segítségével [20]. A szerzők egy adott csomóponton megvizsgálták, hogy hogyan hat a belső átlagos hőáramsűrűség nagyságára, a hőszigetelésben felhalmozódó nedvességtartalomra és a belső felületen mért minimális hőmérsékletre a nyílászáró síkjának elhelyezése. Minden kialakítást megvizsgáltak EPS és ásványgyapot hőszigeteléssel is. A vizsgálatok során kijelenthető, hogy a szerkezet fizikai (hő- és nedvességtechnikai) tulajdonságát jelentősen befolyásolják az alkalmazott anyag illetve az ablak síkjának elhelyezkedése. A felületi hőmérsékletek vizsgálata során a különbségek csekélyek voltak, de a felületi hőáramsűrűségeket elemezve az ásványgyapot szigetelésű falszerkezet külső oldalára helyezett ablak esetén akár 26%-kal kevesebb hővesztéssel rendelkezik, mint a többi csomóponti kialakításban. Nagy különbség figyelhető meg továbbá az alkalmazott szigetelések nedvességtartalmában és a vizsgált modellek tömitéseiben is.

3. Módszertan

3.1. A geometria modellezése

Ezeket a vizsgálatokat numerikus szimulációval tudjuk elvégezni. Bemeneti paraméterként meg kell adnunk a geometriát, illetve a geometriánkat alkotó anyagok testsűrűségét, hőkapacitását, hővezetési tényezőjét és annak hőmérséklet- és nedvességfüggését, porozitását, nedvességtároló képességét, páradiffúziós ellenállási számát és a nedvességtranszport tényezőjét (a részletes anyagmodellekről a későbbiekben részletesen). A modern kialakítású csomópontok esetén kétféle hőszigetelő anyagot – expandált polisztirolhabot (EPS) és kőzetgyapotot (RW) – használtam. A vizsgált változatok jelen esetben 2(+1) hagyományos és 7 modern kialakítású szerkezet az alábbiak szerint:

Hagyományos:

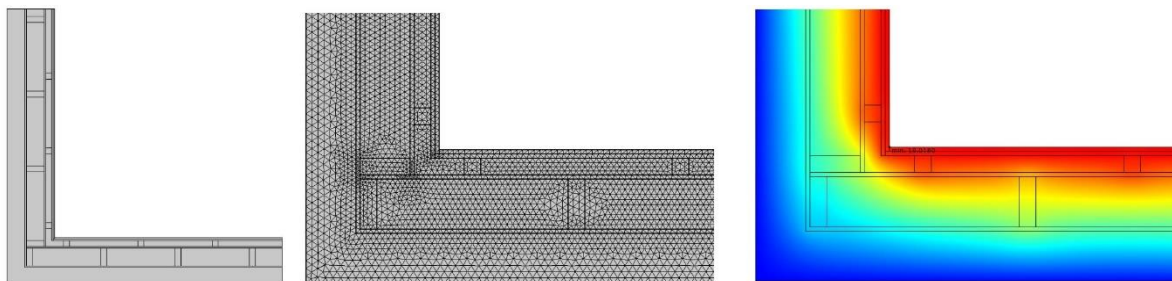
- másfél téglavastagságú kisméretű tömör téglafal
- B30-as blokk téglafal
- részletes másfél téglavastagságú kisméretű tömör téglafal modell a geometriához való érzékenységvizsgálathoz.

Modern kialakítás:

- LeierPlan 30 N+F téglafal, kétoldalt vakolva
- LeierPlan 30 N+F, kétoldalt vakolva, 8 cm vtg. EPS szigeteléssel
- LeierPlan 30 N+F, kétoldalt vakolva, 8 cm vtg. RW szigeteléssel
- LeierPlan 30 N+F, kétoldalt vakolva, 16 cm vtg. EPS szigeteléssel
- LeierPlan 30 N+F, kétoldalt vakolva, 16 cm vtg. RW szigeteléssel
- Polisztirol zsaluelemes falszerkezet
- Fa vázszerkezet 15 cm vtg. EPS szigeteléssel

A szerkezeteket két vízszintes metszetben vizsgáltam, egy egyenes és egy sarok szakaszon. A geometria méreteit az MSZEN ISO 10211 szabvány alapján modelleztem, tehát a geometriai modellem, mely tartalmazza a központi elemet metszősíkkal határolt. A metszősík és a központi elem távolsága legalább a szerkezeti vastagság 3-szorosa, vagy legalább 1 méter. Jelen tanulmányban minden csomópont esetén 2 méteres távolságot vettem figyelembe a központi elemtől.

A 7. ábrán kerül bemutatásra a geometria modell alkotásának a folyamata. Először az építészeti tervből létrehozuk a geometriai modellt az esetleges elhanyagolásokkal, majd ezt a modellt véges elemű síkhálóra bontjuk. Legvégül a csomópontokra a szoftver által kiszámított értékek alapján kirajzolódik az eredmény.



7. ábra: a modellezés folyamata

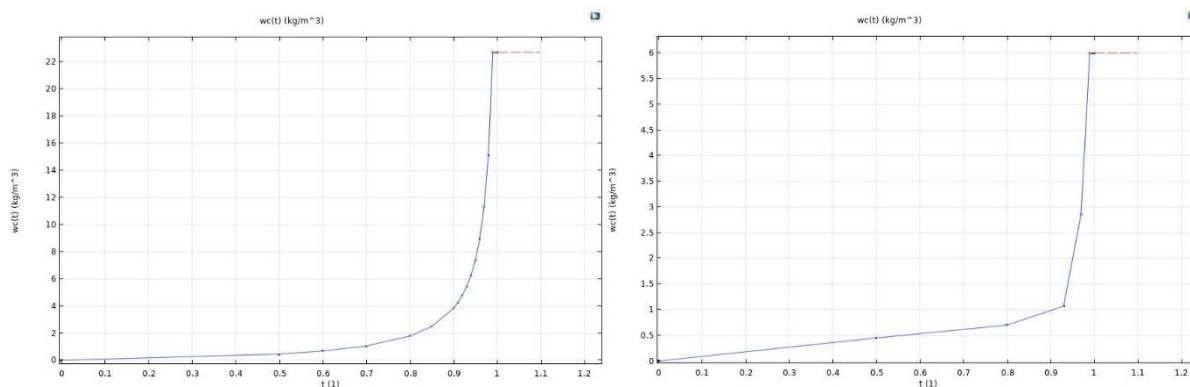
3.2. Peremfeltételek meghatározása

Ezután a peremfeltételek (külső és belső klímaadatok) felvétele következik. A vizsgálatom stationer állapotban történt, így csak a külső és belső hőmérsékletet és a relatív páratartalmat volt szükséges felvennem. Ezek statisztikai alapon kerültek meghatározásra [21] a téli fűtési időszakra Budapesten. A külső légköri állapot statisztikai átlag szerint $3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ 70%-os relatív páratartalom mellett (szabvány szerint -2°C , 90%-os relatív páratartalommal), míg a belső állapot $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ léghőmérséklet és 44%-os relatív páratartalom (a szabványban 20°C -os belső léghőmérséklet és 65%-os relatív páratartalom van meghatározva). A numerikus modellemnél statisztikai alapon vettem figyelembe a peremfeltételeket, de végeztem érzékenységvizsgálatot a szabvány szerinti adatokkal is. Fontos peremfeltétel a belső és külső hőátadási ellenállás, melyeket a szabványnak megfelelően, sorrendben $8\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ és $25\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ értékekkel vettem figyelembe.

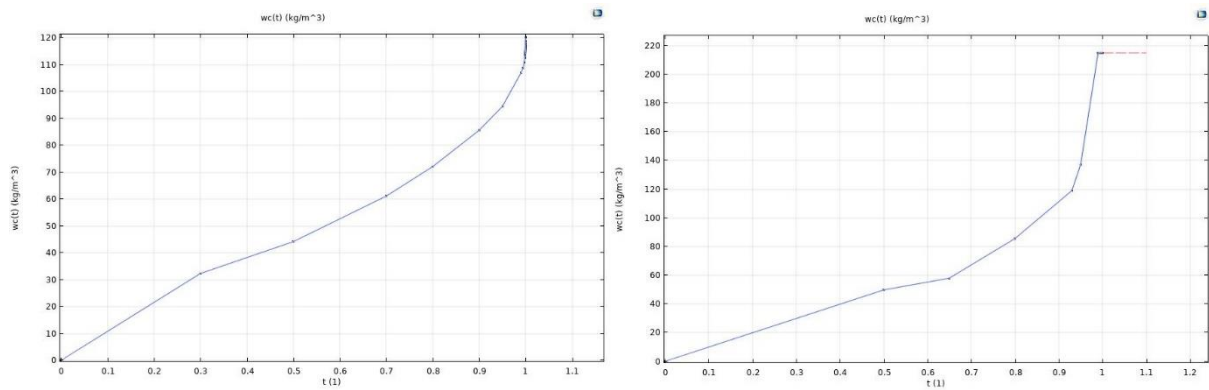
3.3. Anyagmodellek bemutatása

Az anyagmodellek összetett módon vannak felépítve. Minden anyag esetén szükséges meghatározni a sűrűséget, és a fajhőt, mely értékek konstansok. A többi bemeneti adatot (nedvességtároló képesség, vízfelvételi képesség, nedvességgel szembeni ellenállás és a hővezetési tényező) a külső páratartalomtól való függvényt határoztam meg interpolálás segítségével vagy analitikusan. A tulajdonságokat a szabványból [22] és a WUFI 6 szoftver adatbázisából határoztam meg.

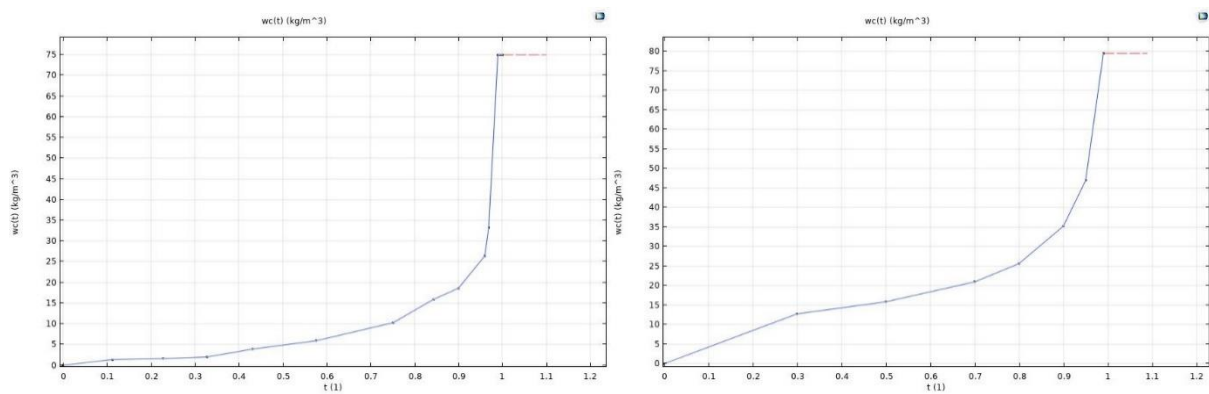
A relatív páratartalomtól függő nedvességtárolási képességet (lásd 8., 9., 10., és 11. ábra), vízfelvételi képességet, nedvességgel szembeni ellenállást minden esetben a WUFI 6 szoftverből vettem át. A szoftverben táblázatos formában találhatóak az adatok, melyből elsőfokú (lineáris) interpolációval hoztam létre a görbét.



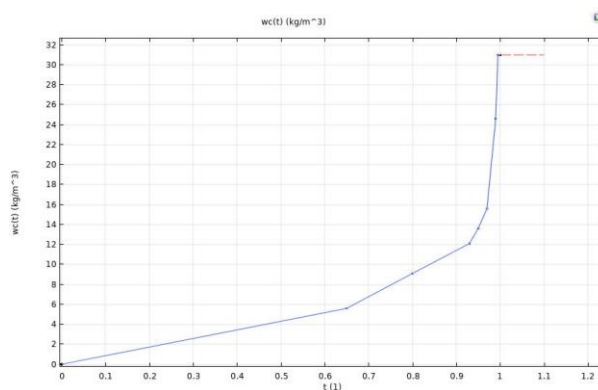
8. ábra: balra expandált polisztirolhab, jobbra kőzetgyapot nedvességtárolási képessége



9. ábra: balra OSB lap, jobbra fenyő faszerkezet nedvességtárolási képessége



10. ábra: balra égetett agyag termékek, jobbra javított mész cement vakolat nedvességtárolási képessége



11. ábra: gipszkarton tábla nedvességtárolási képessége

A hővezetési tényezőt az égetett agyag termékek, expandált polisztirolhab (lásd 12. ábra), kőzetgyapot, vakolatok esetén az MSZEN ISO 10456 szabvány szerint határoztam meg az alábbi összefüggéssel:

$$\lambda_2 = \lambda_1 * F_T * F_m \quad (4)$$

ahol:

- λ_1 első környezeti állapot hővezetési tényezője
- λ_2 második környezeti állapot hővezetési tényezője
- F_T hőmérséklet-átszámítási tényező
- F_m nedvesség-átszámítási tényező

$$F_T = e^{f_T(T_2-T_1)} \quad (5)$$

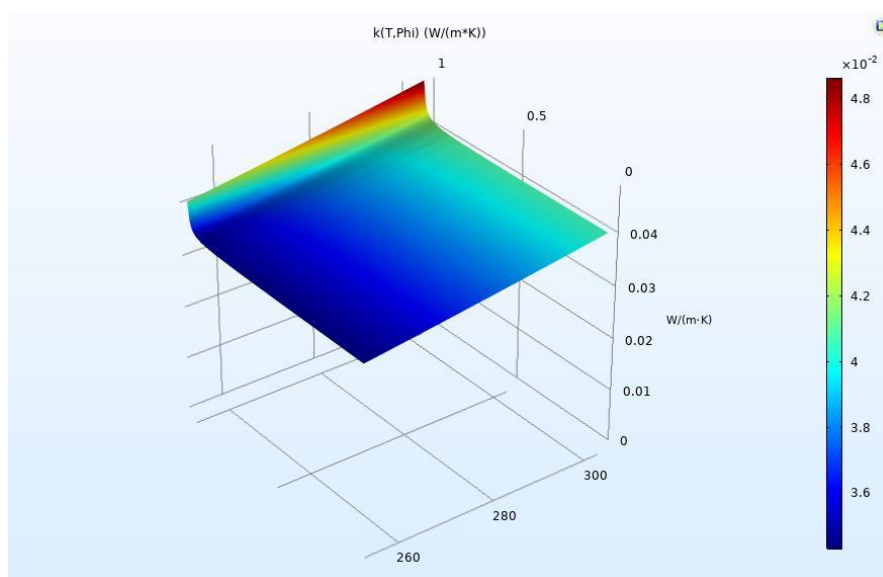
ahol:

- f_T hőmérséklet-átszámítási együttható
- T_1 az első környezeti állapot hőmérséklete
- T_2 a második környezeti állapot hőmérséklete

$$F_m = e^{f_u(u_2-u_1)} \quad (6)$$

ahol:

- f_u a nedvesség-átszámítási együttható, tömeg/tömeg szerint;
- u_1 az első környezeti állapot szerinti nedvességtartalom, tömeg/tömeg szerint;
- u_2 a második környezeti állapot szerinti nedvességtartalom, tömeg/tömeg szerint;



12. ábra: expandált polisztirolhab hőszigetelő anyag hőátbocsátási tényezőjének nagysága a hőmérséklet [K] és a relatív nedvességtartalom függvényében [-]

A további anyagok hővezetési tényezőjét (OSB lap, gipszkarton lap, fenyőfa) a WUFI 6-ban található adatok lineáris interpolálásával kerültek definiálásra.

3.4. Hőtechnikai szimuláció

A hőtechnikai szimulációt az MSZ EN ISO 10211:2017 szabvány szerint végeztem el. A szabványnak megfelelnek a bemeneteli adataim (geometria, peremfeltételek, anyagtulajdonságok).

A hőmérséklet-eloszlás a szerkezetben és a rajta keresztülhaladó hőáram abban az esetben számítható ki, ha a peremfeltételek és a szerkezeti részletek ismertek. E célból a geometriai modellt számos, egymással szomszédos, homogén hővezetési tényezőjű elemi részre kell felosztani. Ezeket az egységeket további kisebb egységre osztjuk, mindegyik egység egy jellemző ponttal (nevezzük csomópontnak) bír.

Az energia megmaradási ($\text{div } q = 0$) és a Fourier-törvényeket ($q = -\lambda \text{grad}T$) alkalmazva, a peremfeltételek figyelembevételével egy egyenletrendszerhez jutunk, mely a csomóponti hőmérsékletek függvénye. A rendszer megoldása, akár közvetlen, akár iterációs módszerrel, megadja a csomóponti hőmérsékleteket, amelyből a hőmérsékletmezők megállapíthatók interpoláció segítségével. A hőmérséklet-eloszlásból a Fourier-törvénnyel számíthatók ki a hőáramok.

Egy elemi rész és a határoló tér között a határfelületre merőleges irányú q hőáramsűrűség feleljen meg a képletnek:

$$q = \frac{T - T_s}{R_s} \quad (7)$$

ahol:

T a belső vagy külső referencia-hőmérséklet;

T_s a hőmérséklet a belső vagy külső felületnél;

R_s a belső vagy külső hőátadási ellenállás.

A metszősíkok legyenek adiabatikusak (azaz a hőáram egyenlő nullával). Látens hőáramokat nem engedünk meg a szimulációs modellben.

3.5. Kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció

A vizsgálat során hő- és nedvességtranszportot is figyelembe vettem porózus közegben. A parciális differenciálegyenleteket (PDE) az MSZ EN 15026:2007-nel harmonizált európai

szabvány [23] előírásai szerint alkalmaztam és a Comsol Multiphysics 5.4 szoftvert segítségével, végelemes módszerrel (VEM) [24] oldottam meg.

Az egyenáramú hővezetés számítása során az alábbi parciális differenciálegyenletet került alkalmazásra:

$$\nabla * q = Q \quad (8)$$

$$q = -d_z(\lambda_{eff} * \nabla * T + L_v * \delta_p * \nabla * (\varphi * p_{sat})) \quad (9)$$

Jelmagyarázat:

- ∇ nabla vektoriális differenciáloperátor
- q hőáramsűrűség [W/m²]
- Q hőforrás [W/m³]
- d_z modell „z” irányú vastagsága (1 m)
- λ_{eff} a hőmérséklettől és a nedvességtől függőeffektív hővezetési tényező;
- T abszolút hőmérséklet [K]
- L_v fázisváltás látens hője [J/kg]
- δ_p páradiffúziós (páravezetési) tényező [g/msPa]
- φ relatív nedvességtartalom [-]
- p_{sat} telítési párányomás [Pa]

Nedvességtranszport szilárd testekben:

$$\nabla * g = G \quad (10)$$

$$g = -d_z(\xi * D_w * \nabla * \varphi + \delta_p * \nabla * (\varphi * p_{sat})) \quad (11)$$

Jelmagyarázat:

- g nedvességáram sűrűség [kg/m²s]
- G nedvességforrás [kg/m³s]
- ξ differenciális nedvességkapacitás; $\xi = \frac{dw}{d\varphi}$ [kg/m³]
- D_w diffúziós tényező (folyadéktranszport tényező) [m²/s]
- w nedvességtartalom [kg/m³] az anyagok higroszkópos szorpciós izotermái szerint

Peremfeltételeket a következők alapján vették figyelembe (az első esetben adiabatikus, második esetben megadott a hőáramsűrűség):

$$-n * d_z q_0 = 0 \quad (12)$$

$$-n * d_z q_0 = h_s(T_{air} - T) \quad (13)$$

Jelmagyarázat:

q_0 a beáramló hőáram [W/m^2]

h_s a hőátadási tényező [W/m^2K]

A [25] és [26] források alapján a nedvességtranszport peremfeltételei a következőképpen írható fel:

$$-\mathbf{n} * d_z g_0 = 0 \quad (14)$$

$$-\mathbf{n} * d_z g_0 = \beta_p h_c (\varphi_{air} * p_{sat}(T_{air}) - \varphi * p_{sat}(T)) \quad (15)$$

Jelmagyarázat:

β_p konstans, melynek értéke $7,7*10^{-9}$ [$kgK/WsPa$], és a konvektív hőátadási tényezővel szorozva kaphatjuk meg a felületi nedvességátadási tényezőt [kg/m^2sPa , egyszerűsítve s/m]

φ relatív nedvességtartalom [-]

4. Eredmények

4.1. Hőtechnikai szimulációk eredménye

A szimuláció során a szoftver által meghatároztam az egyenes szakasz és a sarok kialakítás átlagos hőáramsűrűségét, illetve a belső felület minimum hőmérsékletét. A belső felület minimum hőmérsékletéből számítható a csomópont saját léptékben mért hőmérséklete az alábbi összefüggéssel:

$$f_{Rsi} = \frac{T_{s,min} - T_e}{T_i - T_e} \quad (16)$$

ahol:

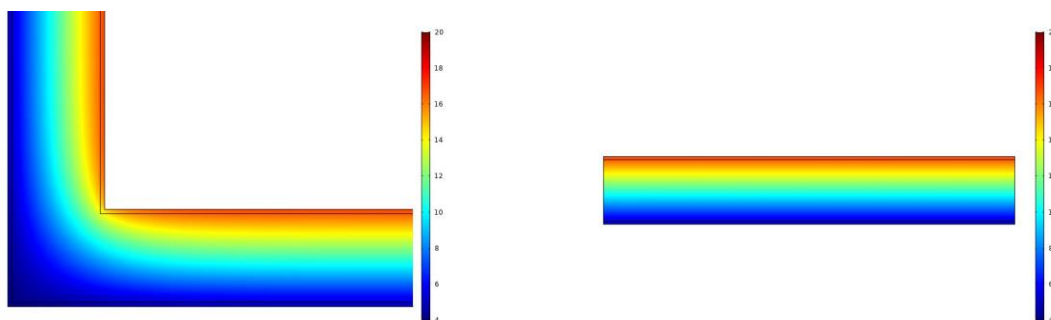
$T_{s,min}$ a belső felület minimum hőmérséklete

T_e a külső levegő hőmérséklete

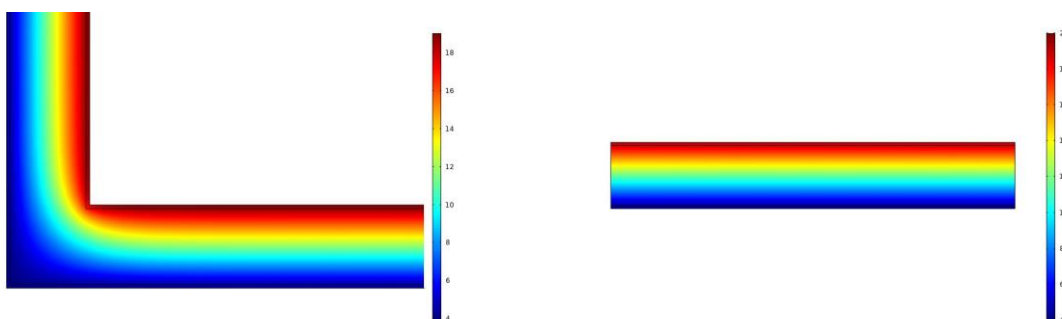
T_i a belső levegő hőmérséklete

Az átlagos hőáramsűrűségből kiszámítható (elosztjuk ΔT hőmérséklettel, $\Delta T = T_i - T_e$), hogy egy kelvin hőmérsékletkülönbség hatására mekkora hőáram alakul ki $1 m^2$ felületen. A sarokban kialakuló „U”-érték és az egyenes szakaszon jelen lévő „U”-érték különbsége mutatja meg, hogy mekkora a szerkezeti kialakítás többlet hővesztesége (ψ) a sarok csomópontban. Az eredményeket a 3. táblázat foglalja össze.

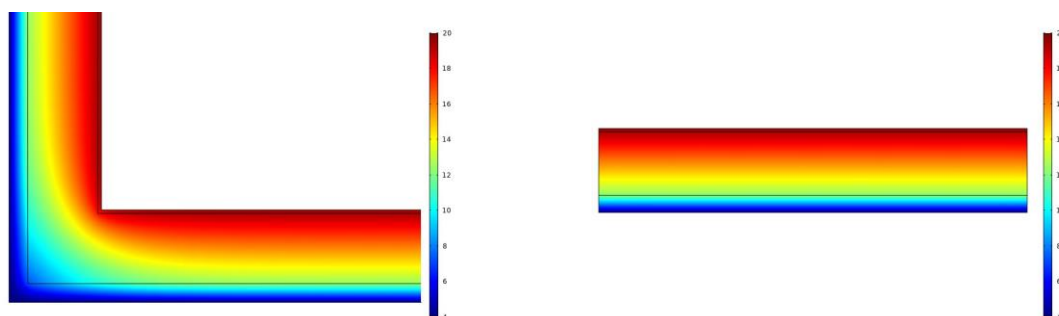
Összesen 18 darab csomópontnak a hőtechnikai szimulációját futtattam le. Minden csomópont esetén a hőmérsékletek felületi eloszlásának ábráját hoztam létre, melyből 8 mintacsomópont itt látható (lásd 13., 14., 15. és 16. ábra):



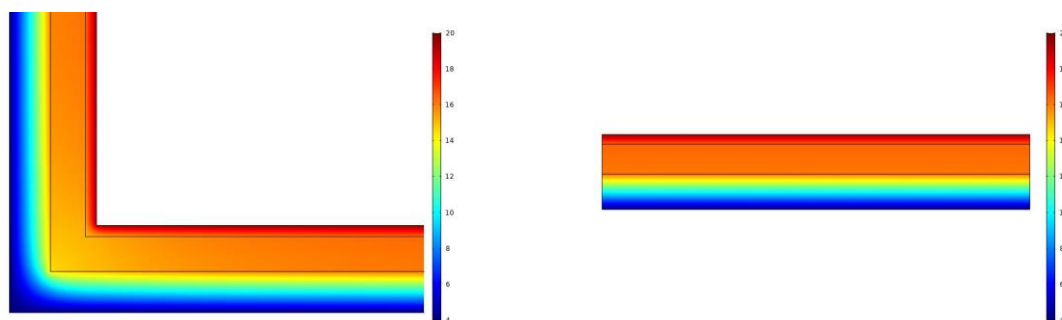
13. ábra: B30 blokk téglá hőtechnikai szimulációs hőmérsékleteloszlása sarok és egyenes csomópont esetén



14. ábra: LeierPlan 30 N+F, kétoldalt vakolt falazat hőtechnikai szimulációs hőmérsékleteloszlása sarok és egyenes csomópont esetén



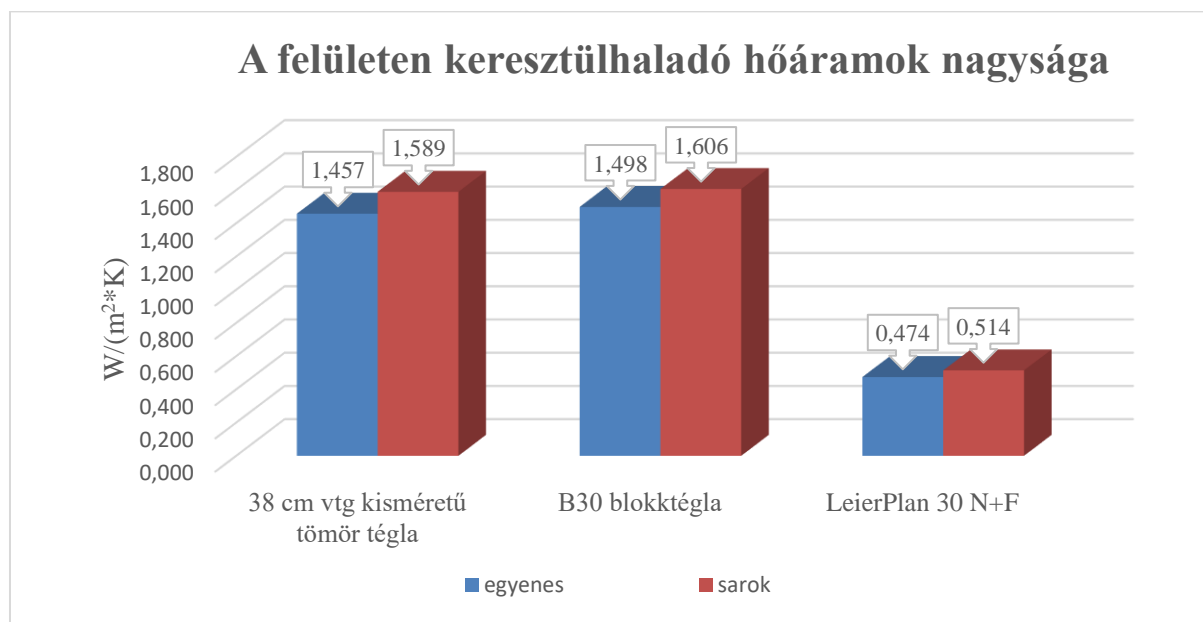
15. ábra: LeierPlan 30 N+F, kétoldalt vakolt, 8 cm vtg. EPS szigetelésű falazat hőtechnikai szimulációs hőmérsékleteloszlása sarok és egyenes csomópont esetén



16. ábra: polisztirol zsaluelemes falazat hőtechnikai szimulációs hőmérsékleteloszlása sarok és egyenes csomópont esetén

Kategória	Megnevezés	Típus	$T_{s,min}$	f_{Rsi}	Átlagos hőáramsűrűség	U	ψ
			[°C]	[-]	[W/m ²]	[W/(m ² *K)]	[W/(m ² *K)]
Hagyományos kialakítás	38 cm vtg kisméretű tömör téglá	egyenes	17,067	0,818	23,464	1,457	0,1316
		sarok	14,776	0,676	25,583	1,589	
	B30 blokk téglá	egyenes	16,986	0,813	24,110	1,498	0,1089
		sarok	14,724	0,672	25,863	1,606	
Innovatív kialakítás	LeierPlan 30 N+F	egyenes	19,047	0,941	7,624	0,474	0,0409
		sarok	17,689	0,856	8,283	0,514	
	LeierPlan 30 N+F + 8 cm vastag EPS szigetelés	egyenes	19,519	0,970	3,848	0,239	0,0383
		sarok	18,571	0,911	4,464	0,277	
	LeierPlan 30 N+F + 8 cm vastag RW szigetelés	egyenes	19,539	0,971	3,686	0,229	0,0377
		sarok	18,616	0,914	4,292	0,267	
	LeierPlan 30 N+F + 16 cm vastag EPS szigetelés	egyenes	19,680	0,980	2,563	0,159	0,0332
		sarok	18,944	0,934	3,097	0,192	
	LeierPlan 30 N+F + 16 cm vastag RW szigetelés	egyenes	19,697	0,981	2,424	0,151	0,0322
		sarok	18,991	0,937	2,942	0,183	
	Polisztirol zsaluelemes falszerkezet	egyenes	19,650	0,978	2,803	0,174	0,0249
		sarok	19,065	0,942	3,204	0,199	
	Fa vázszerkezetes + 15 cm vastag EPS szigetelés; sd=100	egyenes	19,735	0,984	1,720	0,107	0,0131
		sarok	19,320	0,958	1,931	0,120	

3. táblázat: A hőtechnikai szimulációk eredménye

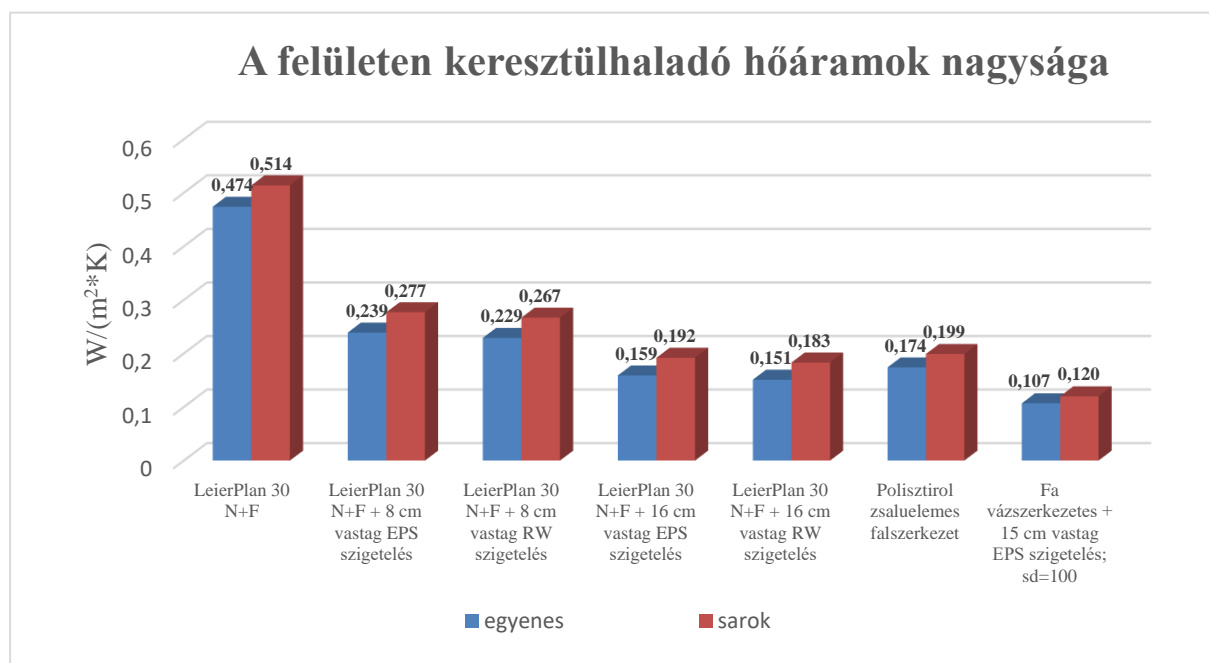


17. ábra: A hagyományos csomópontokon keresztülhaladó hőáramok nagysága hőtechnikai szimuláció esetén, viszonyítás a modern LeierPlan 30 N+F vázkerámia téglához

Jól megfigyelhető (lásd 17. ábra), hogy a kisméretű tömör téglából készült 38 cm vastag fal és a B30-as blokk téglá között számottevő épületfizikai különbség csak a ψ értékben tapasztalható. A kisméretű tömör téglafal belső felülete 0,5 százalék magasabb (0,1 °C) a 2,8

százalékkal kedvezőbb rétegrendi hőátbocsátási tényezőnek köszönhetően, de 17,2 százalékkal kevesebb a geometriából adódó többlet hőveszteség nagysága a sarokban a B30 falazaton a kisméretű tömör téglához képest. A sarok csomópont minimum hőmérséklete is összességében csak fél százados (0,05) eltérést mutat a kisméretű tömör téglafalazat javára.

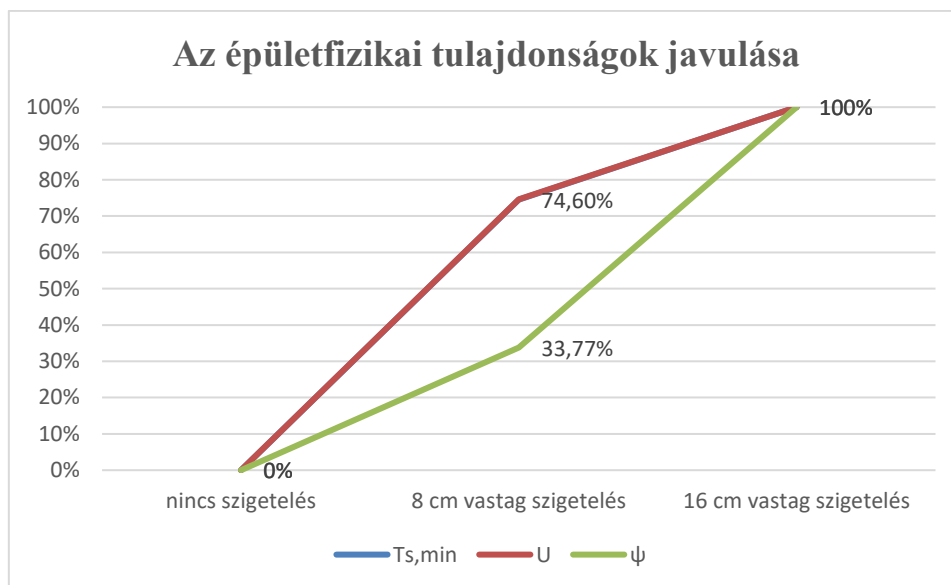
A táblázat adatain és a 13. ábrán megfigyelhető, hogy a szigetelés nélküli vázkerámia falazat és a hagyományos falazatok között is már lényeges eltérés tapasztalható a rétegrendi hőátbocsátási tényezőben, a belső felület minimális hőmérsékleti értéke és a pszi értékben (vonalminti többlet hőveszteség a geometriai hőhíd hatására) is. A $T_{s,min}$ érték 11,6 százalékkal emelkedett, mely a rétegrendi hőátbocsátási tényező 67,5 százalékkal történő redukálódásának köszönhető. Ez a különbség már jelentős, az ember számára is könnyen érzékelhető különbség (2 °C a felületen és 2,9 °C a sarok minimum értékében). A sarokban, a vonalminti többlet hőveszteség is 68,9 százalékkal csökkent.



18. ábra: A modern csomópontokon keresztülhaladó hőáramok nagysága hőtechnikai szimuláció esetén

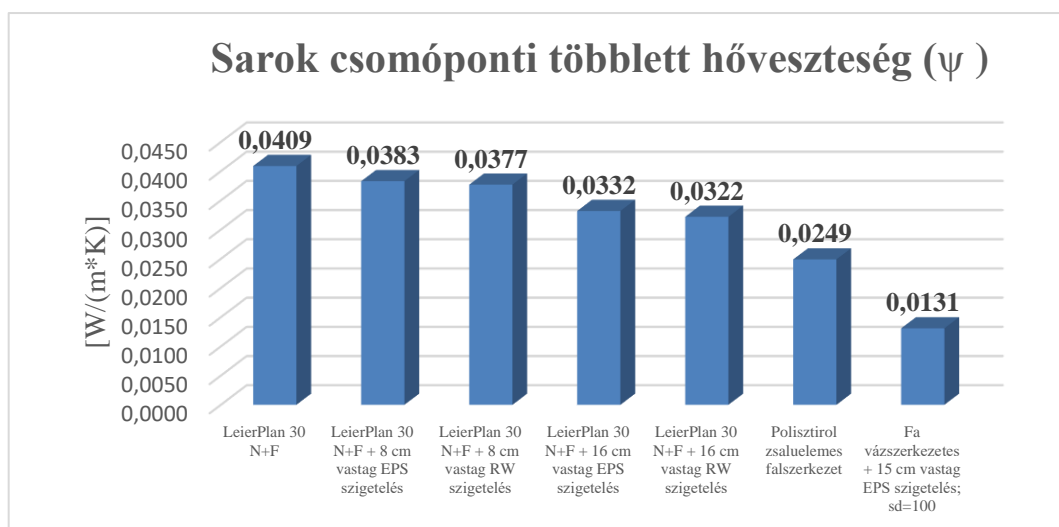
Az eredményekből az is jól látható (lásd 18. ábra), hogy a legvastagabb vizsgált hőszigetelő réteg (16 cm vtg. EPS) hatására a vázkerámia falazat rétegrendi hőátbocsátási tényezője további 67,5 százalékkal csökkent a szigetelés nélküli szerkezethez képest, de a vonalminti többlet hőveszteség csak 18,8 százalékkal redukálódott. A belső felületen ez újabb 3,3 százalékos emelkedést jelentett, ami Celsiusban kifejezve közel 0,6 fok, a sarokban pedig 1,25 Celsius fokkal emelkedett a minimum hőmérsékleti érték. Érdekes jelenség, hogy 8 cm hőszigetelés hatására már 2,5 százalékkal (74,6 százaléka a 16 cm vastagságú EPS

javulásának) emelkedik a belső felület hőmérséklete és 49,6 százalékkal (74,6 százaléka a 16 cm vastagságú EPS javulásának) csökken a rétegrendi hőátbocsátási tényező, de a vonalmenti többlet hőveszteség a sarokban csak 6,4 százalékkal (33,8 százaléka a 16 cm vastagságú EPS javulásának) csökkent. (lásd 19. ábra)



19. ábra: a szerkezet épületfizikai tulajdonságainak javulása a hőszigetelő réteg vastagságának függvényében (0% szigetelés nélküli vázkerámia fal, 100% 16 cm vastag EPS szigetelésű vázkerámia fal)

Továbbá az is megfigyelhető, hogy a modern, fa könnyűszerkezetes kialakítás a 16 cm vastagságú EPS szigetelésű vázkerámia falazathoz képest 32,7 százalékkal kisebb rétegrendi hőátbocsátási tényezővel és 60,5 százalékkal kevesebb többlet hőveszteséggel rendelkezik a sarok csomópontban. Ennek hatására 0,3 százalékkal, vagyis 0,05 °C vált kedvezőbbé a felület hőmérséklete, de a sarokban 0,4 °C emelkedés volt tapasztalható.



20. ábra: a pszi értékek hőtechnikai szimulációk alapján számított nagysága modern csomópontok esetén

Ha csak hőtechnikai szempontból vizsgáljuk az EPS és RW szigetelések közötti eltérést, lényeges különbség nem tapasztalható, mindössze 1-3 százalékos differenciát mutat a két anyag. Minden esetben a kőzetgyapot szigetelés bizonyult a kevésbé hőhidas anyagválasztásnak.

4.2. Kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimulációk eredménye

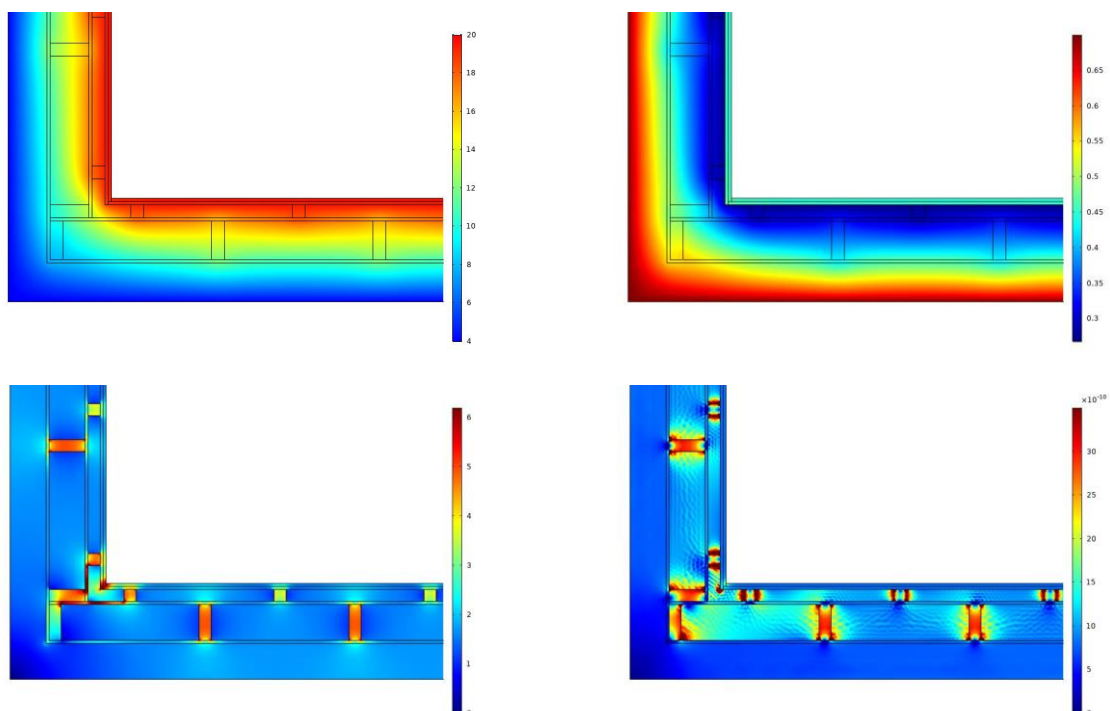
A szimulációban megjelent új tényezők a látens hőáramok és az anyagok nedvességgel szembeni viselkedésük. A geometriai modellek és anyagtulajdonágok megegyeznek a korábbiakban használtakkal. Az eredmények közül a kapcsolt hő- és nedvességtechnikai eredményeket tekintjük pontosabbnak.

Az előzőekben bemutatott módon számítottam ki a saját léptékben mért hőmérsékletet és a ψ értéket, melynek eredménye a következő táblázatban található (lásd 4. táblázat):

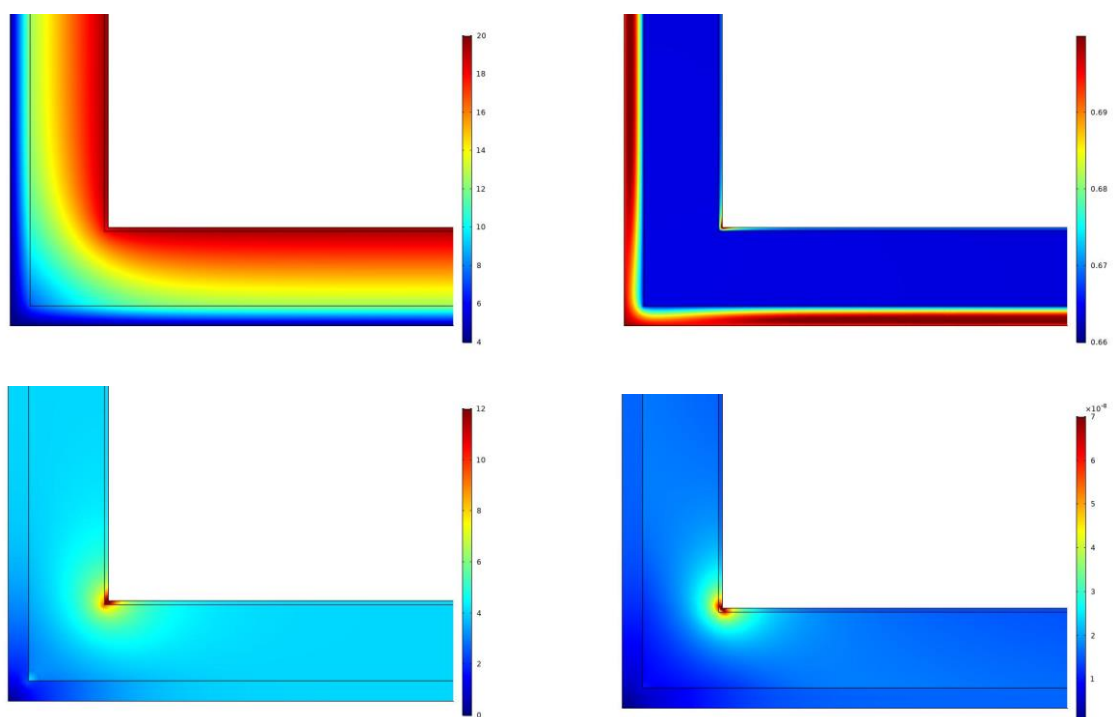
Kategória	Megnevezés	Típus	T_{\min}	f_{Rsi}	Átlagos hőáramsűrűség	U	ψ
			[°C]	[-]	[W/m ²]	[W/(m ² *K)]	[W/(m*K)]
Hagyományos kialakítás	38 cm vtg kisméretű tömör téglá	egyenes	16,926	0,809	24,588	1,527	0,1398
		sarok	14,600	0,665	26,839	1,667	
	B30 blokk téglá	egyenes	16,842	0,804	25,267	1,569	0,1156
		sarok	14,545	0,661	27,128	1,685	
Innovatív kialakítás	LeierPlan 30 N+F	egyenes	18,990	0,937	8,080	0,502	0,0439
		sarok	17,589	0,850	8,786	0,546	
	LeierPlan 30 N+F + 8 cm vastag EPS szigetelés	egyenes	19,507	0,969	3,944	0,245	0,0397
		sarok	18,549	0,910	4,583	0,285	
	LeierPlan 30 N+F + 8 cm vastag RW szigetelés	egyenes	19,522	0,970	3,822	0,237	0,0380
		sarok	18,624	0,915	4,434	0,275	
	LeierPlan 30 N+F + 16 cm vastag EPS szigetelés	egyenes	19,673	0,980	2,612	0,162	0,0342
		sarok	18,934	0,934	3,162	0,196	
	LeierPlan 30 N+F + 16 cm vastag RW szigetelés	egyenes	19,667	0,979	2,583	0,160	0,0318
		sarok	18,982	0,937	3,095	0,192	
	Polisztirol zsaluelemes falszerkezet	egyenes	19,647	0,978	2,825	0,175	0,0249
		sarok	19,069	0,942	3,225	0,200	
Fa vázszerkezetes + 15 cm vastag EPS szigetelés; sd=100	egyenes	19,701	0,981	1,805	0,112	0,0140	
	sarok	19,293	0,956	2,030	0,126		

4. táblázat: a kapcsolt hő- és nedvességtranszport szimulációk eredményei

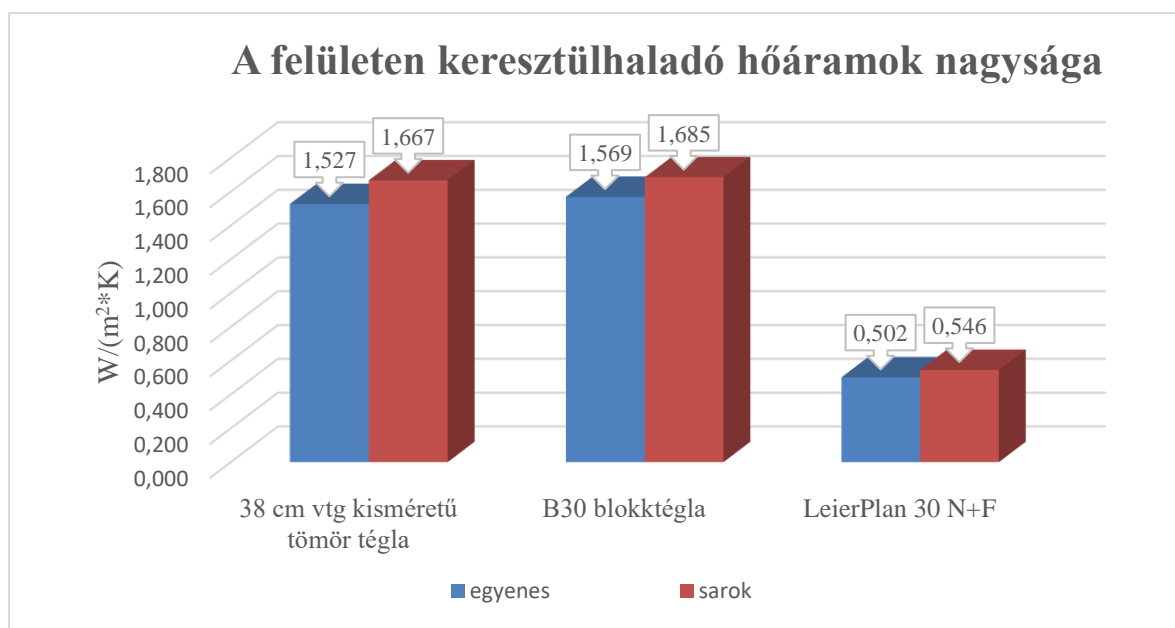
Összesen 18 darab csomóponti kialakítást futtattam le, minden csomópont esetén 4 ábrát készítettem. A következő két ábrán (lásd 21. és 22. ábra) 2 minta csomópont látható:



21. ábra: Fa vázszerkezetes épület 15 cm vastag EPS szigeteléssel, 16-os sd értékű fóliával balról jobbra, fentről lefelé haladva: hőmérsékleteloszlás, relatív nedvességtartalom, hőáram sűrűség, nedvességáram sűrűség

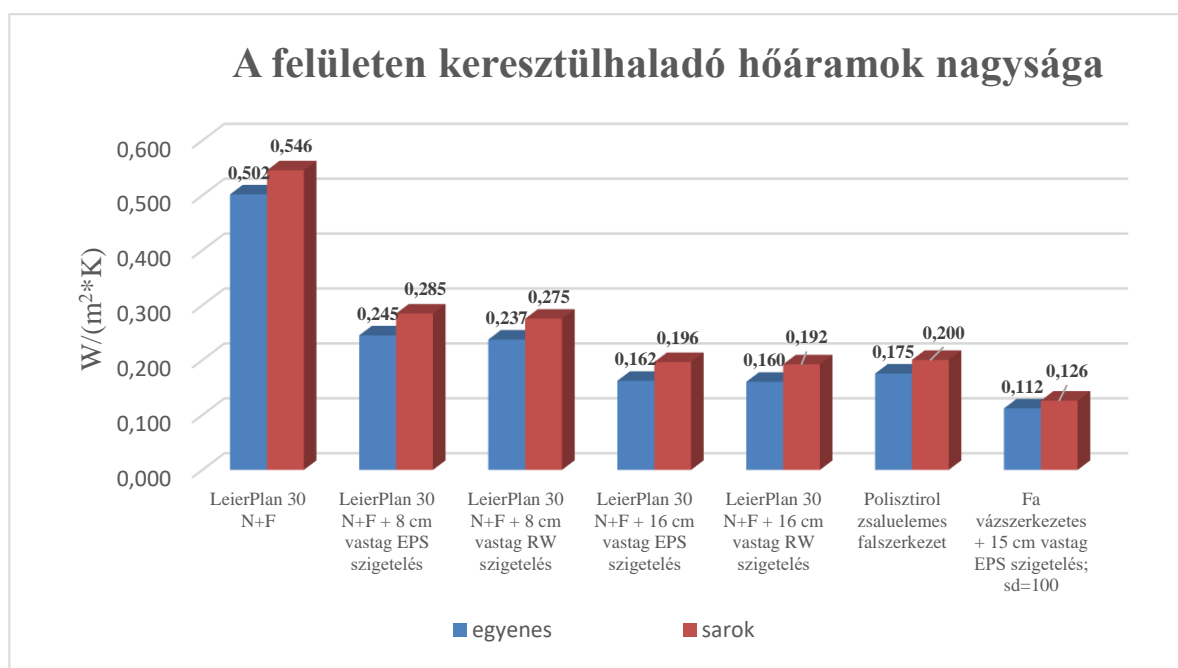


22. ábra: LeierPlan 30 N+F vázkerámia falazat 8 cm vastag EPS szigeteléssel balról jobbra, fentről lefelé haladva: hőmérsékleteloszlás, relatív nedvességtartalom, hőáram sűrűség, nedvességáram sűrűség



23. ábra: A hagyományos csomópontokon keresztülhaladó hőáramok nagysága kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció esetén, viszonyítás a modern LeierPlan 30 N+F vázkerámia téglához

Itt is megfigyelhető (lásd 23. ábra), hogy a kisméretű tömör téglából készült 38 cm vastag fal és a B30-as blokk téglá között számottevő épületfizikai különbség csak a ψ értékben tapasztalható. Az eltérések százalékos értéke is közel változatlan, 0,5 százalék eltérés tapasztalható a belső felület minimum értékében, 2,8 százalék eltérés a rétegrendi hőátbocsátási tényezőben, és 17,3 százalékos eltérés a ψ értékben.



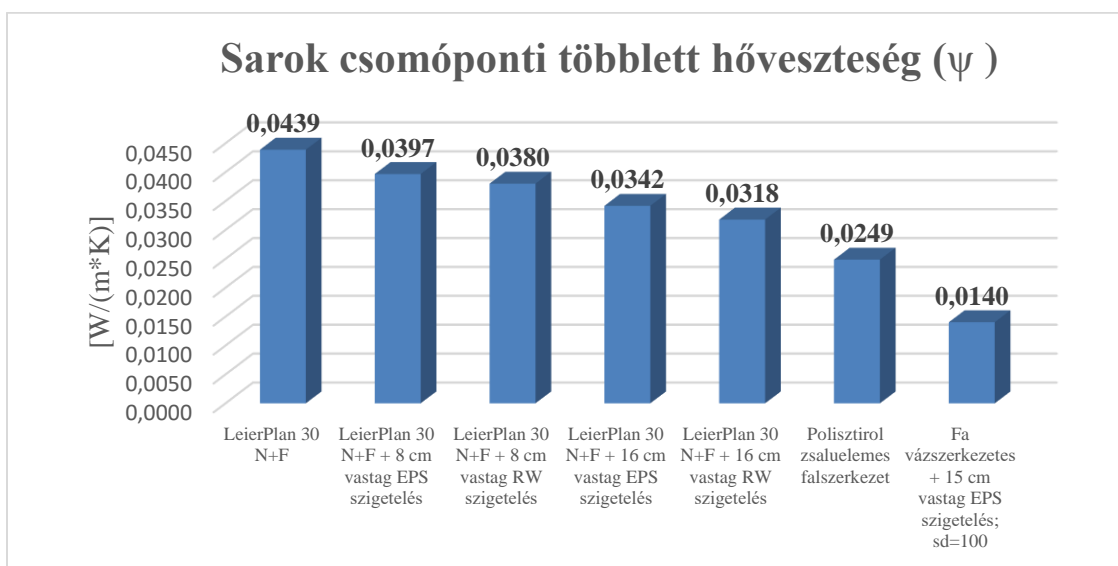
24. ábra: A modern csomópontokon keresztülhaladó hőáramok nagysága kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció esetén

A 24. ábrán látható, hogy a legvastagabb vizsgált hőszigetelő réteg (16 cm vtg. EPS) hatására a vázkerámia falazat rétegrendi hőátbocsátási tényezője további 67,7 százalékkal csökkent a szigetelés nélküli szerkezethez képest és a vonalmenti többlet hőveszteség is 22,1 százalékkal redukálódott. A belső felületen ez újabb 3,6 százalékos emelkedést jelentett, ami Celsiusban kifejezve közel 0,7 fok, a sarokban pedig 1,4 Celsius fokkal emelkedett a minimum hőmérsékleti érték.

A korábbiakban ismertetett jelenség itt is megfigyelhető hasonló arányokkal, tehát a nedvességtől független ez a jelenség. 8 cm hőszigetelés hatására ebben a szimulációs típusban 2,7 százalékkal (75,7 százaléka a 16 cm vastagságú EPS javulásának) emelkedik a belső felület hőmérséklete és 51,2 százalékkal (75,6 százaléka a 16 cm vastagságú EPS javulásának) csökken a rétegrendi hőátbocsátási tényező, de a vonalmenti többlet hőveszteség a sarokban csak 9,6 százalékkal (43,3 százaléka a 16 cm vastagságú EPS javulásának) csökkent.

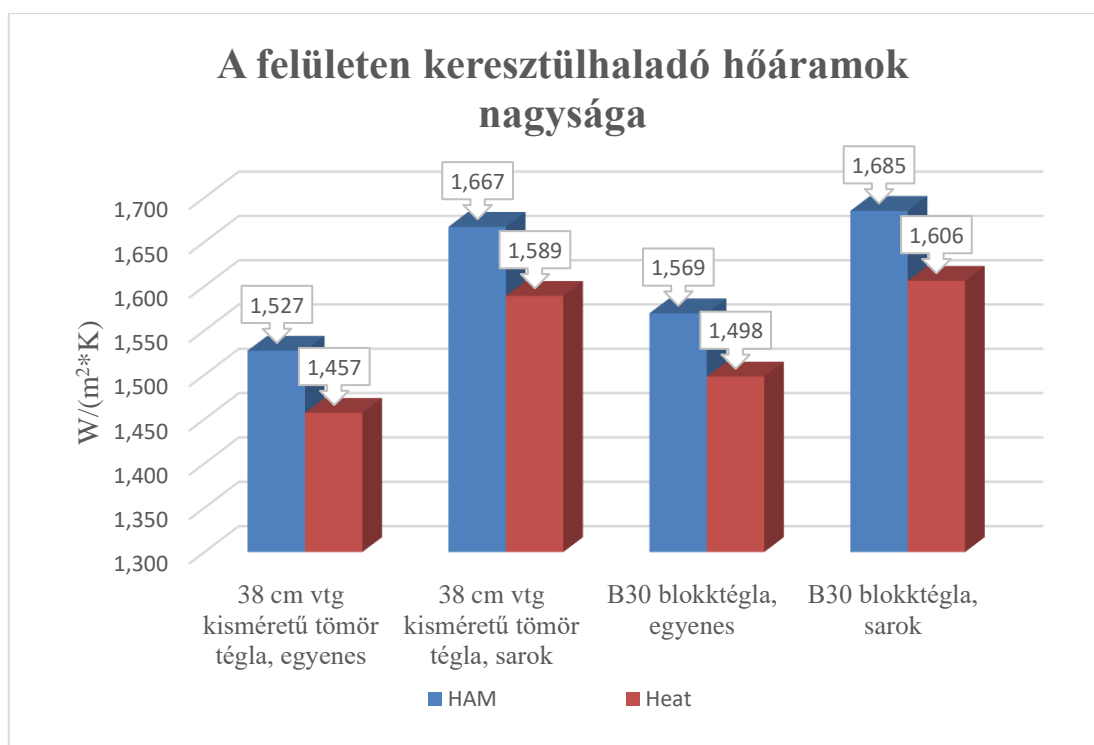
Itt is látható, hogy a modern, fa könnyűszerkezetes kialakítás a 16 cm vastagságú EPS szigetelésű vázkerámia falazathoz képest 30,9 százalékkal kisebb rétegrendi hőátbocsátási tényezővel és 58,9 százalékkal kevesebb többlet hőveszteséggel rendelkezik a sarok csomópontban. Ennek hatására 0,1 százalékkal, vagyis 0,04 °C vált kedvezőbbé a felület hőmérséklete, de a sarokban 0,3 °C emelkedés volt tapasztalható.

Számottevő eltérés itt sem tapasztalható az RW és EPS szigetelések között, melynek egyik oka, hogy nem szélsőértékek a környezeti peremfeltételek, hanem statisztikai átlagok. Jelen tanulmánynak nem ez a fő témája, így szélsőértékekkel nem vizsgáltam meg minden egyes EPS és RW csomópontot.

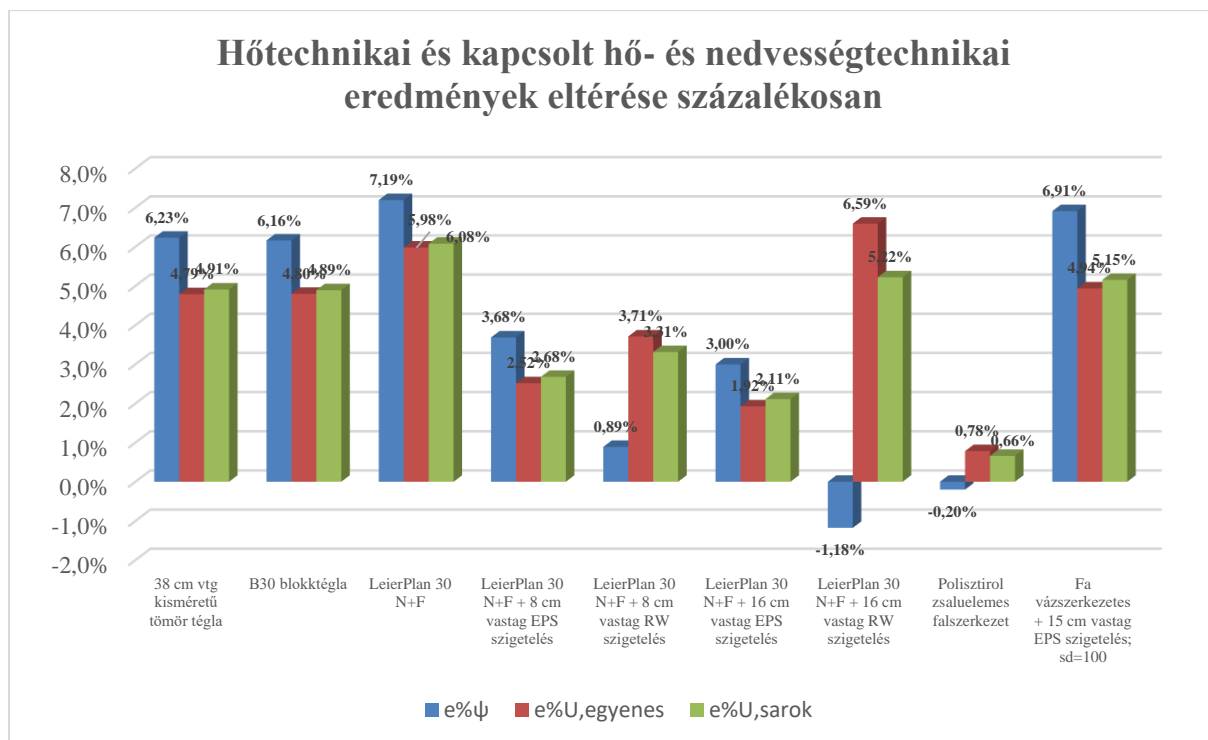


25. ábra: a ψ értékek kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimulációk alapján számított nagysága modern csomópontok esetén

4.3. A két módszer eredményeinek az összehasonlítása



26. ábra: Hagyományos csomóponti kialakítások hőtechnikai és kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció által meghatározott U értéke



27. ábra: Szimulációs módszerek eredményei közti eltérés, százalékosan

Kategória	Megnevezés	Szimuláció típusa	Típus	T _{min}	f _{Rsi}
				[°C]	[-]
Hagyományos kialakítás	38 cm vtg kisméretű tömör téglá	hőtechnika	egyenes	17,067	0,818
			sarok	14,776	0,676
		kapcsolt hő- és nedvességtechnika	egyenes	16,926	0,809
			sarok	14,600	0,665
	B30 blokk téglá	hőtechnika	egyenes	16,986	0,813
			sarok	14,724	0,672
		kapcsolt hő- és nedvességtechnika	egyenes	16,842	0,804
			sarok	14,545	0,661
Innovatív kialakítás	LeierPlan 30 N+F	hőtechnika	egyenes	19,047	0,941
			sarok	17,689	0,856
		kapcsolt hő- és nedvességtechnika	egyenes	18,990	0,937
			sarok	17,589	0,850
	LeierPlan 30 N+F + 8 cm vastag EPS szigetelés	hőtechnika	egyenes	19,519	0,970
			sarok	18,571	0,911
		kapcsolt hő- és nedvességtechnika	egyenes	19,507	0,969
			sarok	18,549	0,910
	LeierPlan 30 N+F + 8 cm vastag RW szigetelés	hőtechnika	egyenes	19,539	0,971
			sarok	18,616	0,914
		kapcsolt hő- és nedvességtechnika	egyenes	19,522	0,970
			sarok	18,624	0,915
	LeierPlan 30 N+F + 16 cm vastag EPS szigetelés	hőtechnika	egyenes	19,680	0,980
			sarok	18,944	0,934
		kapcsolt hő- és nedvességtechnika	egyenes	19,673	0,980
			sarok	18,934	0,934
	LeierPlan 30 N+F + 16 cm vastag RW szigetelés	hőtechnika	egyenes	19,697	0,981
			sarok	18,991	0,937
		kapcsolt hő- és nedvességtechnika	egyenes	19,677	0,980
			sarok	18,982	0,937
	Polisztirol zsaluelemes falszerkezet	hőtechnika	egyenes	19,650	0,978
			sarok	19,065	0,942
		kapcsolt hő- és nedvességtechnika	egyenes	19,647	0,978
			sarok	19,069	0,942
Fa vázszerkezetes + 15 cm vastag EPS szigetelés; sd=100	hőtechnika	egyenes	19,735	0,984	
		sarok	19,320	0,958	
	kapcsolt hő- és nedvességtechnika	egyenes	19,701	0,981	
		sarok	19,293	0,956	

5. táblázat: belső felületi minimum hőmérsékleti értékek és saját léptékben mért hőmérsékleti értékek hőtechnikai és kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimulációval meghatározva

A fenti diagrammokból (26. és 27. ábra) és táblázatból (5. táblázat) látható, hogy a hőtechnikai szimuláció az esetek döntő többségében alul becsüli a sarokban jelentkező hőhid nagyságát.

Átlagosan 3,6 százalékos eltérés tapasztalható a két szimulációtípus között ilyen téren. A szimuláció típusából adódóan a hőtechnikai szimuláció mindig túlbecsüli a szerkezet U értékét átlagosan 4 százalékkal. Ezzel ellenben a felületi minimum hőmérséklet nagyságában nem tapasztalható 1 százaléknál nagyobb eltérés (lásd 5. táblázat) sem egyenes sem sarok csomópont esetében.

4.4. Érzékenység vizsgálat

Kategória	Megnevezés	Szimuláció típusa	Típus	T _{min}	f _{Rsi}	Átlagos hőáramsűrűség	U	ψ	
				[°C]	[-]	[W/m ²]	[W/(m ² *K)]	[W/(m*K)]	
Érzékenység vizsgálat	Geometria	38 cm vtg kisméretű tömör téglá, részletes geometriai modell	hőtechnika	egyenes	17,034	0,816	23,634	1,468	0,1331
				sarok	14,745	0,674	25,777	1,601	
			kapcsolt hő- és nedvességtechnika	egyenes	16,861	0,805	25,041	1,555	0,1409
				sarok	14,517	0,659	27,309	1,696	
	Anyag-tulajdonság	38 cm vtg kisméretű tömör téglá, részletes anyagtulajdonsági modell	hőtechnika	egyenes	17,069	0,818	23,448	1,456	0,1318
				sarok	14,772	0,675	25,570	1,588	
			kapcsolt hő- és nedvességtechnika	egyenes	15,678	0,732	34,573	2,147	0,1863
				sarok	13,062	0,569	37,572	2,334	
	Környezeti peremfeltételek	Fa vázszerkezetes + 15 cm vastag EPS szigetelés; sd=100	hőtechnika	egyenes	19,641	0,716	2,326	0,106	0,0130
				sarok	19,080	0,690	2,612	0,119	
			kapcsolt hő- és nedvességtechnika	egyenes	19,595	0,713	2,452	0,111	0,0140
				sarok	19,034	0,688	2,760	0,125	
		Fa vázszerkezetes + 15 cm vastag EPS szigetelés; sd=16	kapcsolt hő- és nedvességtechnika	egyenes	19,572	0,712	2,516	0,114	0,0143
				sarok	19,018	0,687	2,830	0,129	
		Fa vázszerkezetes + 15 cm vastag EPS szigetelés; sd=0	kapcsolt hő- és nedvességtechnika	egyenes	19,390	0,704	3,299	0,150	0,0267
				sarok	18,621	0,669	3,885	0,177	
		LeierPlan 30 N+F + 8 cm vastag EPS szigetelés	hőtechnika	egyenes	19,348	0,702	5,216	0,237	0,0381
				sarok	18,060	0,644	6,053	0,275	
kapcsolt hő- és nedvességtechnika	egyenes		19,316	0,701	5,475	0,249	0,0408		
	sarok		17,995	0,641	6,373	0,290			

6. táblázat: Érzékenységvizsgálatok eredményei

Érzékenység vizsgálatot végeztem a geometriai modellemre, az anyagmodellemre és a környezeti peremfeltételekre is. Összesen 6 szerkezeti kialakítás 10 csomópontján 20 szimulációt (lásd 6. táblázat) futtattam le.

A geometria modellre való érzékenység vizsgálatához a 38-as kisméretű tömör téglafal részletes geometriai modelljét is felépítettem, vagyis a kisméretű tömör téglafal téglakötéseit rajzoltam meg a habarcsrétegekkel együtt a sematikus modell helyett. A vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy az egyszerűsített és részletes geometriai modell esetén nem tapasztalható még egy százalékos eltérés sem az eredmények tekintetében.

Az anyagmodellre való érzékenység vizsgálatához szintén a 38-as kisméretű tömör téglafal vizsgálatát választottam. Az eredeti, szabvány szerinti modell helyett egy labormérésekkel megállapított anyagmodellt vettem figyelembe a Fraunhofer IFB által kiadott WUFI nevezetű szoftverből importálva. Az eredmények alapján a WUFI által használt modell kapcsolt hő- és nedvességtranszport szimulációjának eredménye lényegesen eltér (33,3 százalékkal) a szabvány szerint folytatott vizsgálat eredményétől. Szükséges a lehető legpontosabb anyagmodellel dolgozni minden anyagtípus esetén, illetve a kisméretű tömör téglafal nedvességtechnikai tulajdonságait is szükséges újra meghatározni.

A környezeti peremfeltételre való érzékenységi vizsgálatnál a statisztikai adatok helyett a szabvány által előírt extrém terhelésnek vettem alá a szerkezetet. A korábbiakban már bemutatott -2 °C külső léghőmérsékletet, 90% relatív páratartalommal és 20 °C belső léghőmérsékletet 65% relatív páratartalommal vettem figyelembe. A LeierPlan 30 N+F vázkerámia falazat 8 cm vastag expandált polisztirolhab szigetelésű csomóponton a hőtechnikai szimuláció esetén nem mutatkozott érzékenynek, de kapcsolt hő és nedvességtechnikai szimuláció után már 2,9% eltérés volt tapasztalható a ψ értékben. A fa vázszerkezetes kialakításon nem mutatkozott számottevő eltérés (véltetően a jó minőségű fólia miatt), így megvizsgáltam mi történik, ha a jó minőségű párazáró fóliát lecserélem egy gyenge minőségűre, vagy akár el is hagyom. A várakozásnak megfelelően a fa vázszerkezetes épület U értékét és ψ értékét nagyban befolyásolja a fólia minősége kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció esetén. A nedvesség, mely a szerkezetbe hatol jelentősen rontja a szerkezetet. Emiatt elengedhetetlen a párazáró fólia pontos definiálása (pontosan melyik fog a szerkezetre kerülni). Természetesen a hőtechnikai szimuláción alapuló vizsgálatban ez nem okoz eltérést, mivel a nedvesség hatása el van hanyagolva.

Összességében kijelenthető, hogy fontos a beépítésre kerülő anyagok pontos ismerete, mivel ez okozza a legnagyobb eltérést a szerkezetünk hő és nedvességtechnikai tulajdonságaiban.

5. Összefoglalás és megállapítások

Az érzékenység vizsgálatok elvégzése után összességében kijelenthető, hogy a hőtechnikai szimulációk eredménye jó becslést ad mind a falszerkezet rétegtrendi hőátbocsátási tényezőjéről, mind a pszi értékről, de a pontos értékekhez mindenképpen szükséges a kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció elvégzése.

Jellemzően a nedvességre érzékenyebb csomópontoknál alakul ki nagyobb eltérés a kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimulációk során, és ezek az érzékenyebbek is a bemeneteli adatokra.

A korábbiakban már említettem, hogy a kisméretű tömör téglá anyagtulajdonságainak felülvizsgálata szükséges a jövőbeli pontos modellezés érdekében.

A jövőben érdemes megvizsgálni ezt a hőhíd jelenséget háromdimenziós modell használásával is, mivel a legpontosabb eredményt a valósághoz legközelebbi modell adja.

6. Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni konzulenseimnek Dr. Szalay Zsuzsa egyetemi docensnek, és Dr. Nagy Balázs egyetemi adjunktusnak, hogy a kutatás alatt segítették a munkámat, hasznos szakmai tanácsokkal láttak el. Nélkülük jelen tanulmány nem jöhetett volna létre.

Az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-19-1 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság programjának szakmai támogatásával készült.

Ez a kutatás kapcsolódik az „Épületek és épületszerkezetek életciklus- és épületfizikai szemléletű optimalizációja komplex numerikus modellezéssel” című kutatási projekthez. Az FK 128663 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, az FK_18 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

Az „Épületek és épületszerkezetek életciklus- és épületfizikai szemléletű optimalizációja komplex numerikus modellezéssel” című, FK 128663 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, az FK_18 pályázati program finanszírozásában valósult meg.

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a BME FIKP-VÍZ tématerületi programja keretében.

7. Irodalomjegyzék

- [1] Karl-Heinz Fingerling, Wolfgang Feist, Joachim Otte Rainer Pfluger – Konstruktionshandbuch für Passivhäuser
- [2] Debreczy Zoltán – Passzívházak tervezésének alapjai [Passzívház Akadémia Kft. kiadásában (2010)]
- [3] 20/2014 (III.7.) BM rendelet
- [4] Csanaky Judit Emília: Épületszerkezetek energiatudatos fejlesztése az építészeti és épületfizikai tervezés határfelületén [doktori értekezés, SZIE Építészeti és Épületszerkezettani Tanszék, Győr, (2012)]
- [5] Zöld András: Az épületfizika alapjai [Műegyetemi Kiadó (1998)]
- [6] Nagy Balázs: Többdimenziós hőáramlás modellezés összehasonlító eredménye [szakmérnöki szakdolgozat, BME Épületenergetikai és épületgépészeti tanszék, Budapest, (2013)]
- [7] MSZEN ISO 10211: Hőhidak az épületszerkezetekben. Hőáramok és felületi hőmérsékletek. Részletes számítások
- [8] 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról
- [9] YTONG Hőhidkatalógus [Xella Magyarország Kft. Kereskedelmi Iroda (2007)]
- [10] Nagy Balázs - Pontszerű és vonalmenti hőhidak I.: A hőhidak, meghatározásuk módszerei és hatásuk az épületek energiavesztéseire [MEGTÉRÜLŐ ÉPÜLETENERGETIKA I. évf: 5 pp. 44-48., 5 p. (2014)]
- [11] Nagy Balázs - Pontszerű és vonalmenti hőhidak III.: Összetett épületszerkezetek egyszerűsített és részletes hőtechnikai modellezése [MEGTÉRÜLŐ ÉPÜLETENERGETIKA II. évf: 2 pp. 44-48., 5 p. (2015)]
- [12] Bakonyi Dániel, Kakasy László – Vasbeton erkélylemezek utólagos hőszigetelése [MAGYAR ÉPÍTÉSTECHNIKA 50 12 pp. 34-37, 4 p. (2012)]
- [13] Bakonyi Dániel, Becker Gábor – A gerébtokos ablakok cseréjének épületfizikai következménye [I. Épületszerkezeti Konferencia: Gábor László professzor születésének 100. évfordulója tiszteletére; Budapest, BME Épületszerkezettani Tanszék (2010)]
- [14] John Straube – Moisture ad MAterials [Building science digest 138, 1-7. oldal, (2006)]
- [15] Nagy Balázs, Szagri Dóra, Dr. Tóth Elek - Dinamikus hő- és nedvességtranszport szimulációk alapjai [MEGTÉRÜLŐ ÉPÜLETENERGETIKA IV. évf. 1 pp. 33-39., 7 p. (2017)]
- [16] Künzel H. M. – Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters (1995)
- [17] Künzel H. M. – Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtgehalt die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen [Bauphysik 8 Nr.2, S.33-39 ISSN: 0171-5445 (1986)]

- [18] D. Zirkelbach, H. M. Künzle, B. Schafaczek, R. Borsch-Laaks - Dampfkonvektion wird berechenbar - Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteeintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen
- [19] Andreas Holm, H. M. Künzle: Non-Isothermal Moisture Transfer in Porous Building Materials [MATERIALS WEEK, München, Németország (2000)]
- [20] Nagy Balázs, Tömböly Cecília - Nyílászáró beépítések higrotermikus (kapcsolt hő- és nedvességtranszport) elemzése numerikus szimulációk segítségével [Épületeink és Műemlékeink 2018, Budapest, Magyarország: konferencia Iroda Bt. (2018)]
- [21] Nagy Balázs - Hygrothermal Behavior of Modern Masonry Building Constructions. [PhD Thesis, Budapest University of Technology and Economics, (2019.)]
- [22] MSZ EN ISO 10456: Építési anyagok és termékek. Hő- és nedvességtechnikai tulajdonságok. Táblázatos tervezési értékek, illetve eljárások a közölt és tervezési hőtechnikai értékek meghatározására
- [23] EN 15026:2007 Épületszerkezetek és épületelemek hő- és nedvességtechnikai viselkedése. A nedvességvándorlás becslése numerikus szimulációval
- [24] Comsol Multiphysics 5.3a felhasználói kézikönyv, 2017.
- [25] WUFI PRO 6.0 szoftver anyagadatbázisa, 2018
- [26] MSZ EN ISO 10077-2:2012 Ajtók, ablakok és társított szerkezetek hőtechnikai viselkedése. A hőátbocsátási tényező kiszámítása. 2. rész: Numerikus módszer tok- és szárny szerkezetekhez