



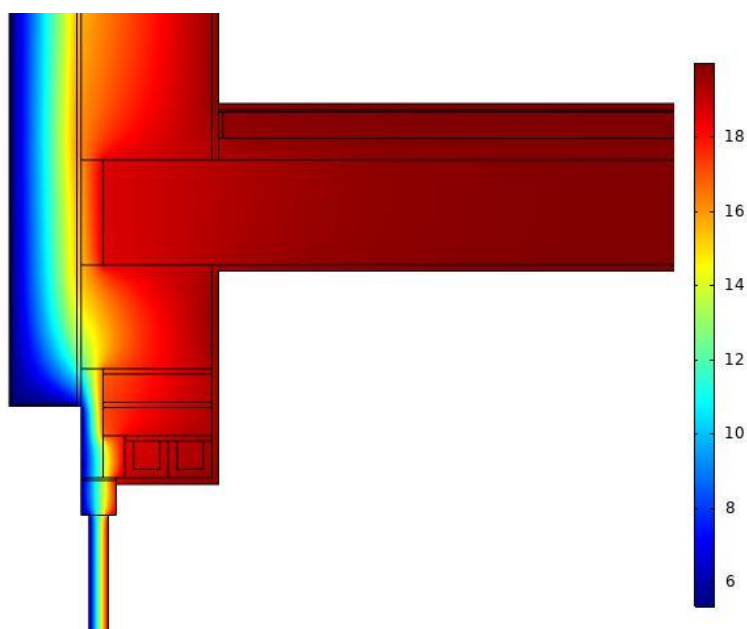
M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR

ÉPÍTŐANYAGOK ÉS MAGASÉPÍTÉS TANSZÉK

A vonalmenti hőveszteségek számítási eljárásainak összehasonlítása



TDK Dolgozat

MAROSVÖLGYI MARTIN

Konzulens:

Dr. Szalay Zsuzsa, egyetemi docens

Dr. Nagy Balázs, egyetemi adjunktus

Budapest, 2020.11.02.

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	1
Ábrajegyzék	2
Táblázatjegyzék.....	3
Jelölések jegyzéke	4
Mellékletek	5
Absztrakt.....	6
Summary.....	6
1. Bevezetés.....	7
2. Szakirodalmi áttekintés	8
2.1. A hőhíd meghatározása, típusai.....	8
2.2. Hőhidak vizsgálatával foglalkozó tudományos kutatások.....	10
2.3. Kapcsolt hő és páratechnikai vizsgálatok alapjai.....	20
3. Módszertan	22
3.1. Az épület bemutatása	22
3.2. Vizsgált csomópontok bemutatása.....	25
3.3. Egyszerűsített számítási eljárás.....	27
3.4. Hőhídkatalógus	32
3.4.1. MSZ EN ISO 14683:2017.....	32
3.4.2. Nemzeti hőhídkatalógus	32
3.5. Numerikus végelelemes vizsgálat.....	33
3.5.1. Peremfeltételek meghatározása	34
3.5.2. Anyagmodellek definiálása.....	34
3.5.3. Hőtechnikai szimuláció.....	38
3.5.4. Kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció.....	38
4. Eredmények.....	40
4.1. 7/2006 TNM szerinti egyszerűsített eljárás eredménye	40
4.2. Hőhídkatalógus alkalmazásával meghatározott eredmény	41
4.3. Stacioner vizsgálatok eredményei.....	43

4.4. Dinamikus vizsgálatok eredményei	46
5. Eredmények értékelése	50
5.1. Módszerek közötti eltérés	50
5.2. Egyes csomópontok hőveszteségeinek összehasonlítása.....	51
5.3. Numerikus vizsgálatok közötti eltérés	52
5.4. Hőveszteségek részarányának összehasonlítása	53
6. Konklúzió	54
7. További kutatási lehetőség	55
8. Köszönetnyilvánítás	56
9. Irodalomjegyzék	56

Ábrajegyzék

1. ábra: a hőveszteségek részarányának alakulása [1]	7
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. [3]	9
3. ábra: háromdimenziós csomópont felosztása véges elemes módszerrel (bal oldalt), illetve a szimuláció lefuttatása utáni eredmény (jobb oldalt) látható [5]	10
4. ábra: Hőveszteségek az egyes vizsgált felületeken keresztül [5]	11
5. ábra: a) az épület látványterve b) általános emeleti alaprajz c) 3D megjelenítése a tipikus hőhidjelenségek helyének [6]	12
6. ábra: az ekvivalens fal módszer vizsgálati lépései: a) a lapostető - fal csatlakozás geometriája b) hőáramok vizsgálata a csomóponton keresztül (adiabatikus sík meghatározása) c) a csomópont 2 régióra történő felosztása d) a csomópont geometriája az egyenértékű fal réteggel [6]	13
7. ábra: az épület fűtési és hűtési energiaigénye (beton szerkezet esetén) [6]	13
8. ábra: a tanulmányban vizsgált lakóépület földszinti és emeleti alaprajza [8]	17
9. ábra: a kutatás során alkalmazott bioklíma zónára jellemző időjárási adatok [8]	17
10. ábra: a vizsgált épület földrajzi (és bioklimatikus) elhelyezkedése [8]	18
11. ábra: az épület teljes energiaigénye. Bal oldalt a szigetelt, jobb oldalon a kevésbé szigetelt kialakítás [8] ..	18
12. ábra szigetelt épület energiaigény megoszlás a különböző vizsgálati módszerek alapján (fűtési, hűtési, világítási és egyéb berendezések) [8]	19
13. ábra: Határoló falszerkezetet érő hő- és nedvességátadások [10]	20
14. ábra: a relatív nedvességtartalom és a nedvességtartalom függvényében a nedvességtárolási módok [9]	21
15. ábra: a vizsgált épület földszinti alaprajz	22
16. ábra: a vizsgált épület emeleti alaprajz	23
17. ábra: a vizsgált épület hosszmetsete	23

18. ábra: a vizsgált épület tömegmodellje.....	24
19. ábra: numerikus modellezéshez egyszerűsített modell	26
20. ábra: MSZ EN ISO 10211:2017 szerinti metszősík a talajban	26
21. ábra: MSZ EN ISO 10211 alapján numerikus vizsgálathoz felépített lábazati modell	27
22. ábra: Az MSZ EN ISO 13370 szerinti talajon fekvő padlószerkezet modellje [18]	30
23. ábra: az expandált polisztirolhab nedvességtárolási képessége	35
24. ábra: expandált polisztirolhab hőszigetelő anyag hőátbocsátási tényezőjének nagysága a hőmérséklet [T] és a relatív nedvességtartalom függvényében [RH]	36
25. ábra: falsarok Ψ értéke szűrés nélkül.....	47
26. ábra: falsarok Ψ értéke $\Delta T_{min}=5K$	47
27. ábra: falsarok Ψ értéke $\Delta T_{min}=10K$	47
28. ábra: falsarok Ψ értéke $\Delta T_{min}=15K$	47
29. ábra: falsarok Ψ értéke $\Delta T=20K$	47
30. ábra: vonalmenti hőveszteségek megoszlása stacioner, 50% RH vizsgálat esetén W/K dimenzióban.....	52
31. ábra: A fal - sarok csomópont esetén az egyes numerikus modellekkel meghatározott vonalmenti hőveszteségek értékei, a vízszintes vonal a módszerek átlagát mutatja.....	53
32. ábra: a hőveszteségek részarányának alakulása az egyes vizsgálati módszerek esetén	54

Táblázatjegyzék

1. táblázat: alternatív lehetőségek a hőhidak meghatározásához különböző országokban [7]	15
2. táblázat: vizsgált csomópontok listája és azonosító sorszámai.....	25
3. táblázat: A csatlakozási hőhidak hatását kifejező korrekciós tényező [16]	28
4. táblázat: Tájékoztató adatok a χ korrekciós tényező kiválasztásához [16].....	29
5. táblázat: különböző talajtípusok hőtechnikai jellemzői [18]	30
6. táblázat: a felületi hőátadási ellenállás értékei (MSZ EN ISO 6946:2017).....	34
7. táblázat: felhasznált építőanyagok áttekintő táblázata.....	37
8. táblázat: az egyes határoló felületek nagyságát, illetve hőátbocsátási tényezőit összefoglaló táblázat (7/2006 TNM szerint meghatározott).....	40
9. táblázat: az egyes határoló szerkezetek és a teljes épület 7/2006 TNM szerint meghatározott hőveszteségeit összefoglaló táblázat.....	41
10. táblázat: a hőhidkatalógus által meghatározott vonalmenti hőveszteségeket összefoglaló táblázat	42
11. táblázat: a két módszer által meghatározott teljes épületre vonatkozó hőveszteségek	43
12. táblázat: stacioner vizsgálatok eredményeit összefoglaló táblázat	44
13. táblázat: a három különböző stacioner állapotban meghatározott teljes épületre vonatkozó hőveszteségek .	46
14. táblázat: falsarok L2D és értékeit összefoglaló táblázat a minimális hőmérsékletkülönbség hatására.....	46
15. táblázat: dinamikus vizsgálatok eredményeit összefoglaló táblázat.....	48
16. táblázat: a négy különböző dinamikus állapotban meghatározott teljes épületre vonatkozó hőveszteségek...	50
17. táblázat: az összes vizsgálati módszer transzmissziós hőveszteségeit áttekintő táblázat.....	51

Jelölések jegyzéke

<u>Jele</u>	<u>Megnevezés</u>	<u>Mértékegység:</u>
U	rétengrend 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 hőhídhatás 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 (páravezetési) 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	$\frac{kg}{m^3}$

Mellékletek

A számítási és további mellékletek az alábbi hivatkozáson megtalálhatóak:

<https://bit.ly/38asy4N>

Absztrakt

Az épületek pontos energiaveszteségének meghatározásához elengedhetetlen a vonalmenti hőveszteségek figyelembevétele. Kutatásomban megvizsgáltam egy teljes lakóépületet és összehasonlítottam, hogy mekkora mértékben térnek el egymástól a különböző hőhíd számítási módszerek. Összevettem a 7/2006 TNM rendelet szerinti egyszerűsített módszert; az MSZ EN ISO 14683:2017 szabvány szerinti egyszerűsített hőhídkatalógus; egy részletes nemzeti hőhídkatalógus eredményeit; továbbá részletes, kétdimenziós hőtechnikai, illetve kapcsolt hő- és nedvességtranszport szimulációk által meghatározott hőveszteséget stacioner és dinamikus állapotban is. A modelleket végeeselemes multifizikai numerikus szimulációs szoftver segítségével vizsgáltam az MSZ EN ISO 10211:2017 és az MSZ EN 15026:2007 szabványban foglaltak szerint. Az átfogó kép eléréséhez az épületet alkotó összes hőtechnikailag releváns csomópont megvizsgáltam.

Summary

For the accurate calculation of building heat losses, we need to consider linear heat losses due to thermal bridges. In my research, a whole building was analysed and different thermal bridge calculation methods were compared. The following methods were included: the simplified method according to the Hungarian energy performance regulation; the simplified thermal bridge catalogue of EN ISO 14683:2017 standard; a detailed national thermal bridge catalogue; a detailed two-dimensional heat as well as a conjugated heat and moisture (HAM) simulation for steady state and dynamic conditions. The modelling was carried out with the help of a finite element multiphysic numeric simulation software according to the rules of EN ISO 10211:2017 and EN 15026:2007. All the relevant details of the building were analysed to get a full picture.

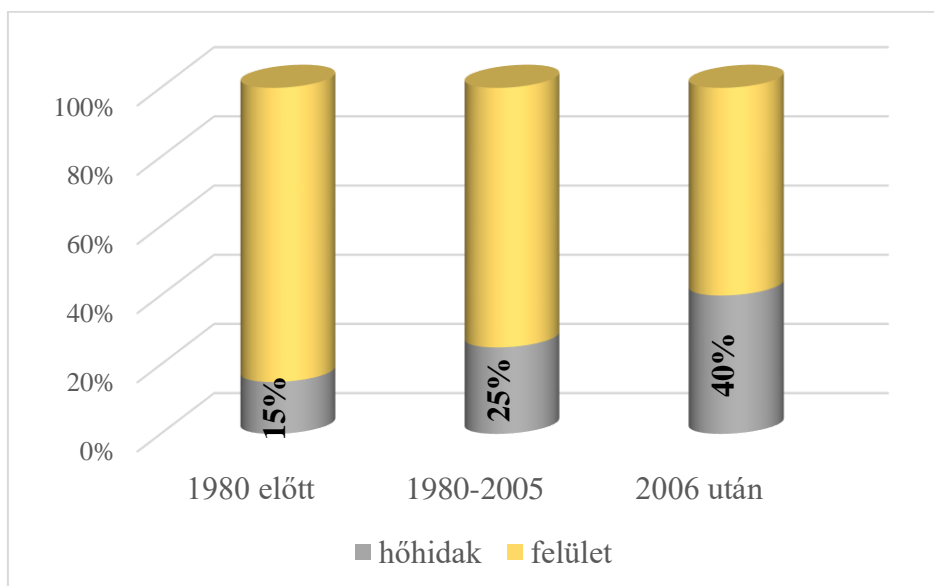
1. Bevezetés

Az elmúlt évek trendjei következtében lakóépületeink a korábbiakhoz képest jelentős hőszigetelő rétegvastagsággal rendelkeznek. Épületszerkezeteink kialakítása ezzel szemben változatos, sok esetben nem átgondolt csomóponti kialakulás valósul meg.

Tudatosan tervezett termikus burok esetén is az épület energiaveszteségének jelentős százaléka a különböző vonalmenti hőhidakon keresztül történik, mely hőáram nagysága jelentősen növekszik helytelen csomóponti kialakítás esetén. Felismerhető, hogy elengedhetetlen a jelenség legpontosabb ismerete az épület energiaigényének számítása során.

Kutatásom célja az épületek hőhíthatását vizsgáló módszerek összehasonlítása egy – a magyar piacon - tipikusnak tekinthető lakóépület példáján. Összevettem a 7/2006 TNM rendelet szerinti egyszerűsített módszert; az MSZ EN ISO 14683:2017 szabvány szerinti egyszerűsített hőhídkatalógus; egy részletes nemzeti hőhídkatalógus eredményeit; továbbá részletes, kétdimenziós hőtechnikai, illetve kapcsolt hő- és nedvességtranszport szimulációk által meghatározott hőveszteséget stacioner és dinamikus állapotban is.

A téma aktualitását Csanaky Judit Emília tanulmányában [1] található ábra szemlélteti legjobban. 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 [1]

A vizsgálatok során minden csomópont esetén meghatároztam a korábban bemutatott eljárásokkal – ahol releváns - 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, illetve a teljes épületre vonatkozó transzmissziós hőveszteséget (H_{tr}).

Az így kapott eredményeket többféle szempont szerint is lehet értékelni:

- Az egyes csomóponti kialakításoknál mekkora a többlet hőveszteség (Ψ) a különböző hőhidak (geometriai, anyageredetű, szerkezeti és periodikusan ismétlődő hőhíd) hatására?
- Mekkora mértékben térnek el a csomópontot vizsgáló különböző eljárások eredményei (U , $T_{s,min}$, f_{Rsi} , Ψ)?
- Mekkora mértékben térnek el a transzmissziós hőveszteség a különböző vizsgálati módok között a teljes épületet vizsgálva?
- Dinamikus vizsgálat esetén mekkora mértékben térnek az eredmények, ha csak a fűtési időszakot (október 15. – április 15.) illetve, ha az egész évet vizsgáljuk (U , Ψ)?
- Hogyan alakul a felületi és vonalmenti hőveszteség százalékos megoszlása a vizsgált épületben?

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.

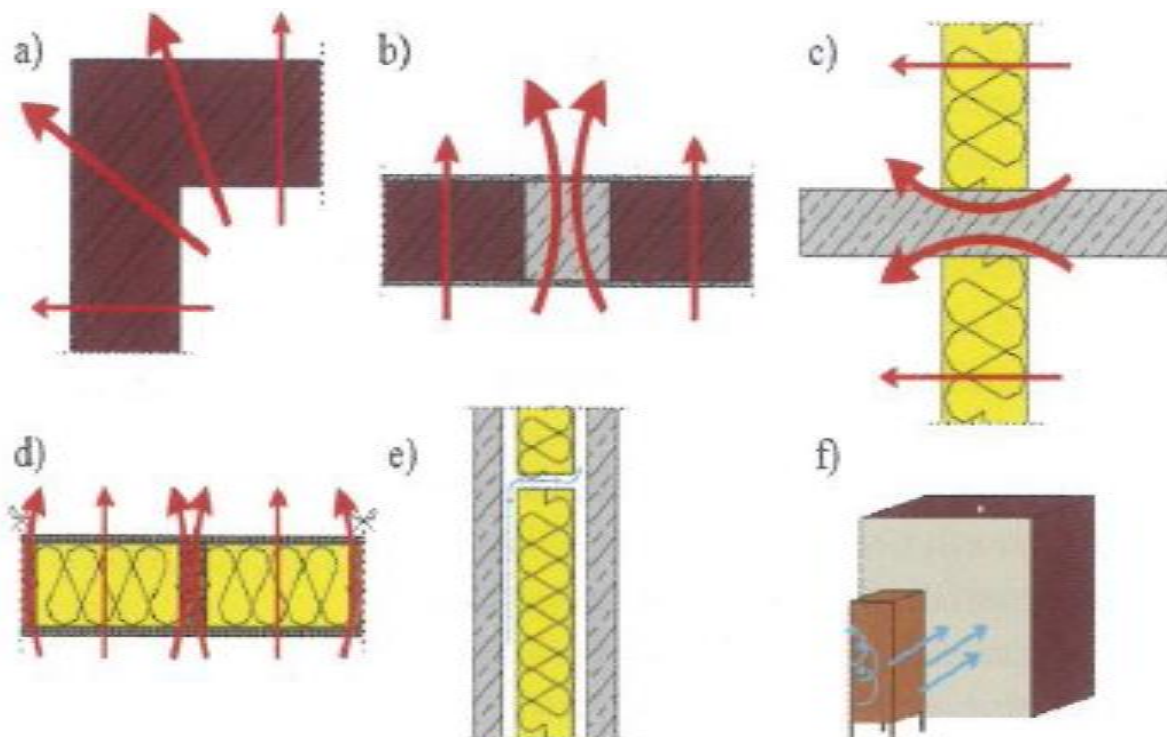
Napjainkban magyar és nemzetközi szinten is számos kutatás foglalkozik a vonalmenti hőveszteség meghatározásának különböző módszereinek vizsgálatával.

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 [2]. 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 [3]. 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.)



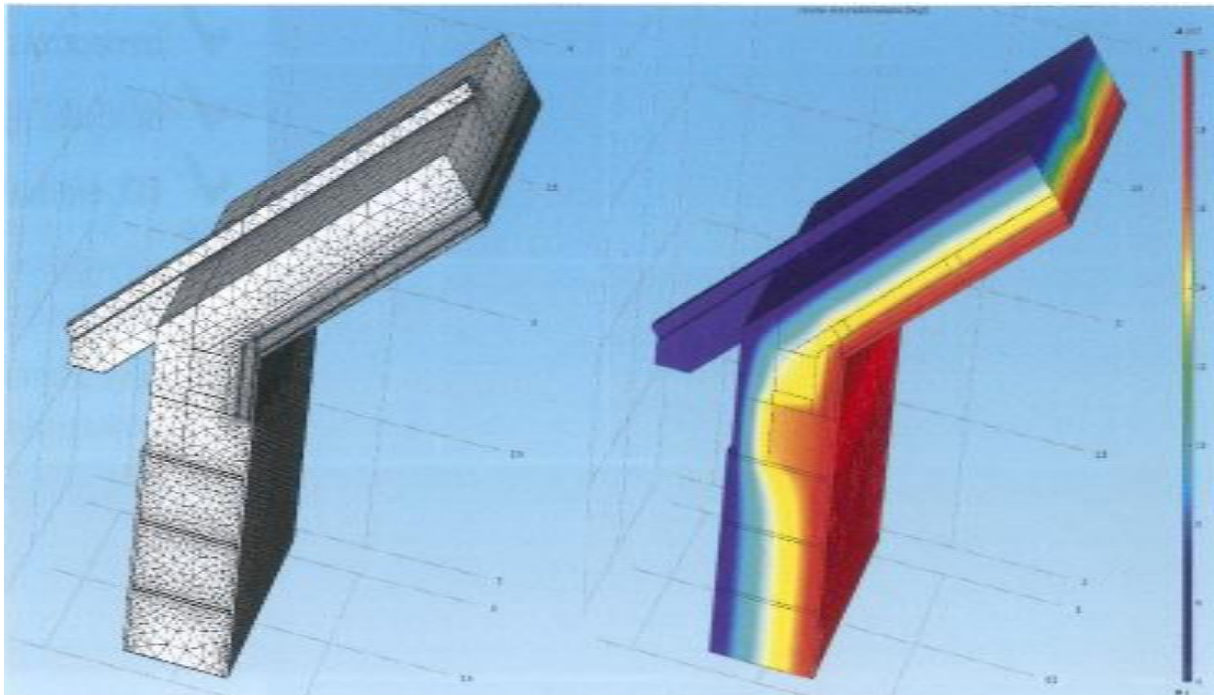
2. ábra: A hőhidak típusai: a) geometria hőhíd b) anyageredetű hőhíd c) szerkezeti hőhíd d) periodikusan ismétlődő hőhíd e) konvektív hőhíd f) környezeti eltérések miatti hőhíd. [3]

2.2. Hőhidak vizsgálatával foglalkozó tudományos kutatások

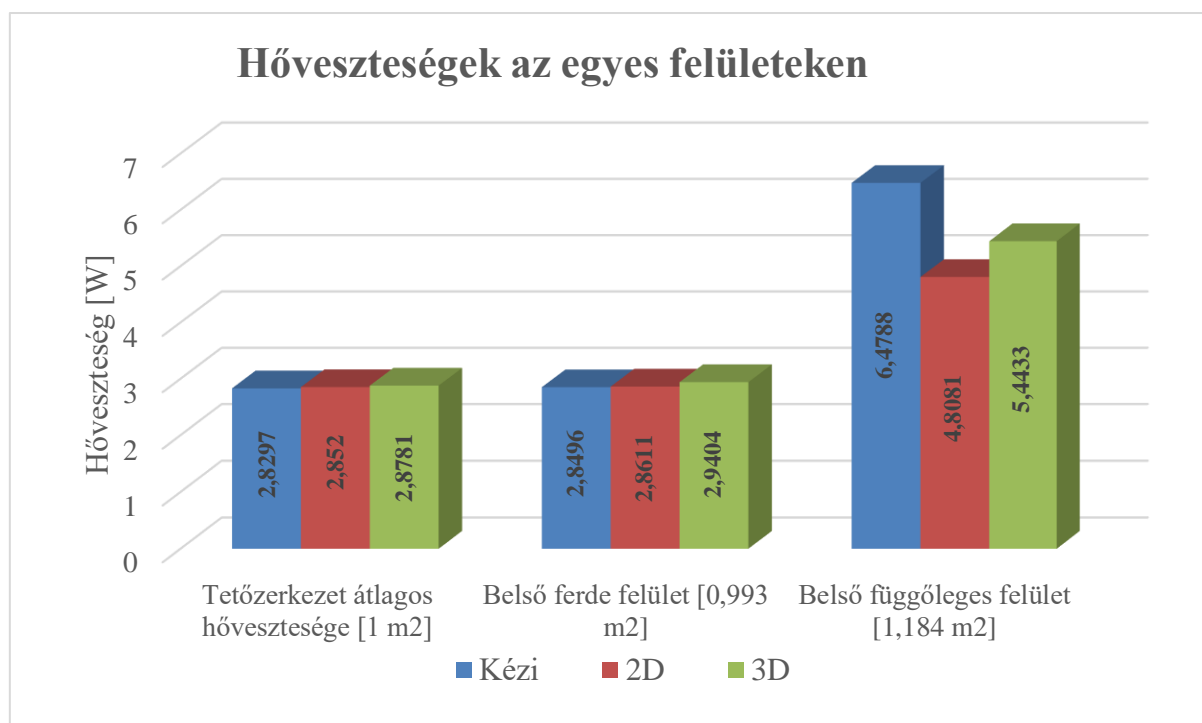
Több nemzetközi és hazai kutatás [4] is foglalkozott már az épületek hőveszteségeinek (és hőhidaknak) figyelembevételi lehetőségeivel, az egyes módszerek közötti eltérések nagyságával. A témában számos esettanulmány is készült.

A hazai mérnökök közül Nagy Balázs is foglalkozott már vizsgálati módszerekből adódó eltérések nagyságának meghatározásával [5]. 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 [5]

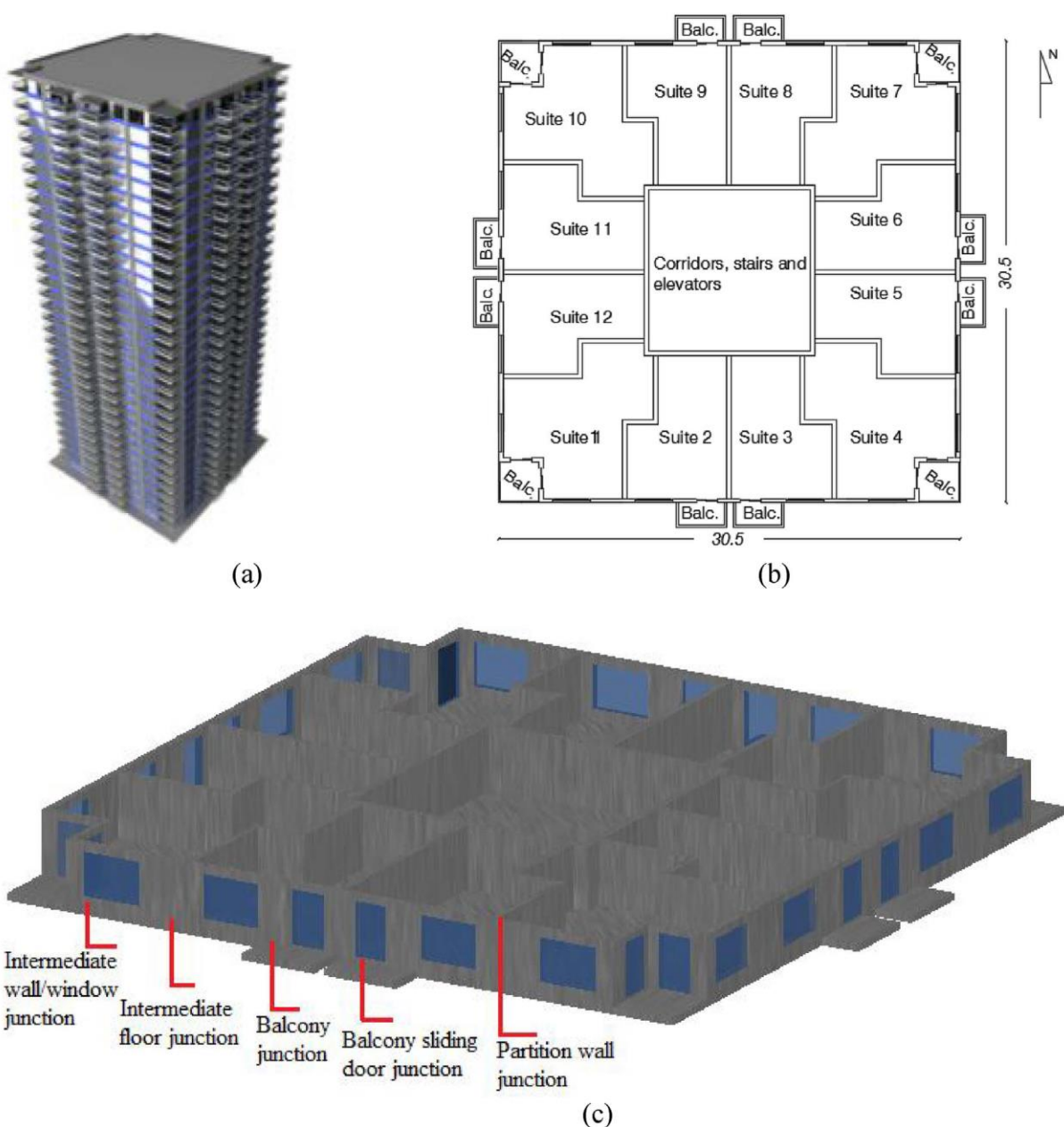


4. ábra: Hőveszteségek az egyes vizsgált felületeken keresztül [5]

A kapott eredményekből (lásd 4. ábra) kiolvasható, hogy a kézi módszer majdnem 20 %-kal túlbecsülte, míg a kétdimenziós számítási módszer 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 hőveszteségre vagyunk kíváncsiak. Egyszerűbb szerkezetek esetén elegendő a kézi, vagy kétdimenziós vizsgálati módszer.

Egy kanadai tanulmány [6] is foglalkozott már a dinamikus modellezés módszerének hőhidakra gyakorolt hatásával. Kutatásukban két típusú (beton és vázkerámia), nagy hőtároló tömeggel rendelkező több szintes (harminc emeletes) épületet (lásd 5. ábra) modelleztek British Columbia (Kanada) 4 különböző klímával rendelkező területén. Az épület hét jelentős vonalmenti hőveszteséggel rendelkező csomópontját vizsgálták. A kétdimenziós hőáram mértékét két eltérő szinten (nem gyengén és erősen szigetelt állapotban) határozták meg. A vizsgált csomópontok a következők:

- közbenső födém csatlakozás
- közbenső födém; nyílászáró-fal csatlakozás
- erkély csatlakozás
- közbenső fal csatlakozás
- fal – lapostető csatlakozás
- lábazat
- erkélyajtó csatlakozás



5. ábra: a) az épület látványterve b) általános emeleti alaprajz c) 3D megjelenítése a tipikus hőhidjelenségek helyének [6]

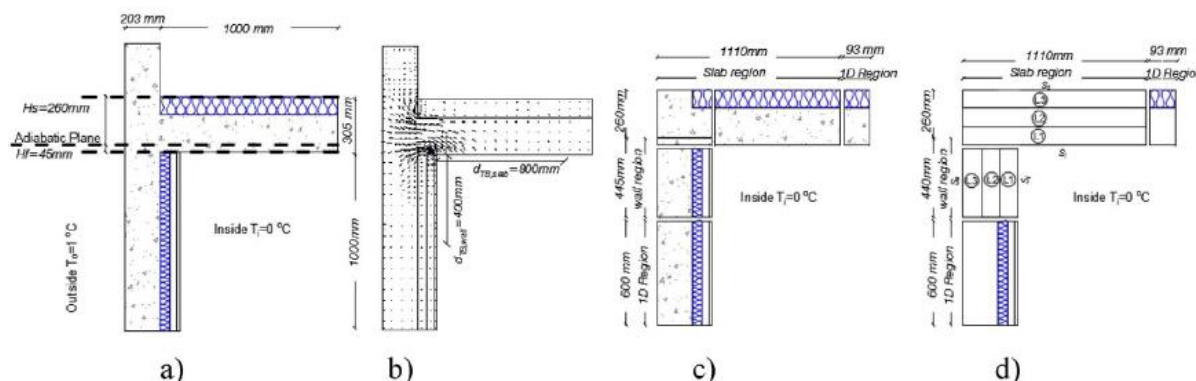
Minden vizsgálat esetén három különböző módszerrel határozták meg a teljes épület fűtési és hűtési igényét. Negyedik vizsgálati állapot, mikor nem veszik figyelembe a teljes épület fűtési és hűtési számítása során a kétdimenziós hőveszteségeket.

A hőhidak hatását az épületek energiateljesítményére jellemzően teljes épületenergetikai modellezéssel értékelik ki ekvivalens U-érték módszerrel. Az ekvivalens U-érték módszer az egydimenziós hőáramot feltételező többrétegű szerkezet beállítása oly módon, hogy hőátbocsátása egyenlő legyen a rétegrend tényleges - hőhidak hatásával növelt - U-értékével, miközben a rétegek anyagi tulajdonságai változatlanok maradnak. Ez a módszer elhanyagolja

a hőhidak hőtehetetlenségét, azonban a hőhidak jelenléte nem csak csökkenti a hőellenállást, de megváltoztatja a dinamikai jellemzőket is.

Következő vizsgálati lehetőség az ekvivalens fal módszer, mely során a komplex falat hőhidakkal ábrázoljuk, ahol egydimenziós hőáramokat feltételezünk a többrétegű szerkezetben. Ez az eljárás magában foglalja a 2D hőhid geometriák adiabatikus síkjának azonosítását és az ábrázolni kívánt ekvivalens falak hőtechnikai tulajdonságainak meghatározását.

A módszer lépéseit a következő ábra szemlélteti:



6. ábra: az ekvivalens fal módszer vizsgálati lépései: a) a lapostető - fal csatlakozás geometriája b) hőáramok vizsgálata a csomóponton keresztül (adiabatikus sík meghatározása) c) a csomópont 2 régióra történő felosztása d) a csomópont geometriája az egyenértékű fal réteggel [6]

A hőhidak pontosabb vizsgálata a közvetlen kétdimenziós vagy háromdimenziós kapcsolat részletes numerikus szimulációkkal történő modellezése, azonban a dinamikus modellezés nagyobb számítási kapacitást követel meg és növeli a vizsgálat komplexitását.

Implementation Methods	Vancouver		Summerland		Prince George		Fort Nelson		
	heating (kW h × 10 ³)	cooling (kW h × 10 ³)	heating (kW h × 10 ³)	cooling (kW h × 10 ³)	heating (kW h × 10 ³)	cooling (kW h × 10 ³)	heating (kW h × 10 ³)	cooling (kW h × 10 ³)	
3D Modeling	Poor	935.69	190.85	996.66	308.34	1589.47	97.81	1609.69	186.99
	Improved	700.26	156.85	751.87	273.84	1201.31	63.81	1192.25	153.30
Eq. wall method	Poor	846.35	191.15	905.75	309.23	1449.72	103.77	1476.35	190.12
	Improved	694.52	157.45	745.87	275.12	1192.86	65.01	1187.72	153.97
Eq. U-value	Poor	814.96	200.39	872.31	316.09	1398.10	107.05	1468.43	199.08
	Improved	679.13	158.05	736.48	276.40	1178.97	65.60	1171.12	154.57
Without TB	Poor	658.00	223.95	709.31	336.67	1143.96	131.51	1164.45	232.82
	Improved	673.09	164.01	724.41	283.29	1161.46	70.08	1155.73	157.71

*TB = Thermal bridge.

7. ábra: az épület fűtési és hűtési energiaigénye (beton szerkezet esetén) [6]

A hőhidak hatása dinamikus vizsgálat esetén az energiateljesítményre (különbség a 3D dinamikus modellezés és az ezzel egyenértékű U-érték módszer között) a hőhidak mennyiségétől és minőségétől függ

- Az ekvivalens U-érték módszer alábecsülheti az éves fűtési energiaigényt akár 13% -kal, és túlbecsüli az éves hűtési energiaigényt akár 10% -kal. A hőhidak a vizsgált épület külső területének mintegy 12% -át teszik ki, ezáltal a dinamikus vizsgálat esetén a hőhidak hatása is megnő.
- A 3D modellezés és az egyenértékű U-érték módszer köti eltérés kevesebb mint 3%, ha a csomópontok átgondolt tervezés hatására jönnek létre. Ez nem csak az éves hűtési és fűtési energiaigényt csökkenti, hanem a hibákat is az általánosan használt egyszerűsített módszer alkalmazása során.

Az ekvivalens fal módszere figyelembe veszi a hőhidak termikus tehetetlenségének hatását, ezért jobban teljesít, mint az ekvivalens U-érték módszer, de még mindig alábecsüli az éves fűtési és hűtési energiaigényt. Tekintettel az ezzel a módszerrel megkövetelt egyenértékű falrétegek termikus tulajdonságainak előállításának bonyolultságára, vélhetően nem alkalmas a gyakorlati felhasználásra.

Minél magasabb a szigetelési szint, annál nagyobb hőhidak hozzájárulása. Ezért ugyanolyan fontos minden éghajlat esetén a hőhidak minimalizálása az épület termikus hőburkának tervezés.

A hőhidak dinamikus modellezésére akkor lehet szükség, amikor az épület termikus burkának magas a szigetelése és nagy a hőtömege, de rossz csatlakozási kialakításokkal.

A számítási költségeket tekintve körülbelül egy napba telik a szimuláció az egész épület 3D hőhid részleteivel a WUFI Plus segítségével. Az ekvivalens U-érték módszernél kevesebb, mint 1 óra szükséges az a WUFI Plus eredményeihez az egész épületenergetikai szimulációhoz, azonban körülbelül egy napra van szükség ahhoz, hogy hatékony U-értékeket kapjunk THERM szoftverből és exportáljuk őket a WUFI Plus-ba. A folyamat az ekvivalens fal módszerrel, a hét csomópont szerkezeti tényezőinek és hőtulajdonságainak kiszámítása esetén körülbelül öt napig tart, bár az egész az épületenergetikai szimuláció az összes csomópont után körülbelül csak egy órát vesz igénybe (WUFI Plus-ban valósulnak meg).

Tekintettel a hőhidak dinamikus hatásának modellezési nehézségeire (többlet idő és kapacitás, nagyobb komplexitás) javasolt átgondolt csomópontokkal kialakított, erősen hőszigetelt és nagy hőtárolótömeggel rendelkező épületek előnyben részesítése a tervezés során, mely hatására elegendő az ekvivalens U-érték által meghatározott éves fűtési és hűtési energiaigény figyelembevétele.

Egy észak tanulmány [7] kilenc európai ország hőhid meghatározási eljárását hasonlított össze. Minden országban van lehetőség a részletes számítások elvégzésére, de alternatív eljárásokkal. Ezen országok összesen öt fő módszert használnak, hogy egyszerűsített módszerrel meghatározzák a hőhidak hőveszteségét, melyet a következő táblázat ismertet:

1. táblázat: alternatív lehetőségek a hőhidak meghatározásához különböző országokban [7]

Hőhid meghatározási módszer	Módszer leírás	Módszert alkalmazó országok
Számítás energetikai tanúsító szoftverrel	A hőhidak értékeit energetikai tanúsító szoftverrel határozzák meg.	Franciaország
Táblázatos értékek az energetikai tanúsító szoftverben	A hőhidak értékei az energetikai számításakor meghatározásra kerülnek a felhasználó adatbevitel nélkül.	Ausztria, Ciprus, Görögország, Spanyolország
Alap ellenőrzési szabályok	Egyszerű szabályok, melyek, ha követésre kerülnek nem szükséges a lineáris hőveszteség számítása.	Belgium
Táblázatos értékek a jogszabályokban	Részletes adatok hiányában felhasználhatóak a jogszabályokban megadott táblázatos értékek.	Észtország
Átlag U-érték	Az épület átlagos U-értéke magában foglalja a vonal és pontszerű hőhidak hatását.	Románia, Svédország

A hőhidak számítási szabályaival az összes vizsgált ország építési szabályzata foglalkozik. A többi szempontoz, például az épület burkolatának hőátbocsátására vonatkozó szigorú követelményekhez képest, a hőhidakon keresztüli energiaveszteségeket gyakran nem veszik kellően figyelembe. A gyakorlatban a fő megoldás valamiféle egyszerűsített megközelítés, ahol a hőhidak számítására nincs szükség, és sok esetben táblázatos vagy alapértelmezett értékeket használnak az energetikai számítási szoftverekben. Erősen szigetelt épületekben, ahol a hőhidaknak jelentős hatása van a fűtési energiaigényre, egyértelműen fontos a helyes vonal és pontszerű hőveszteség meghatározása. A hőhidak lineáris hőátbocsátásának pontos értékei szintén hasznosak lehetnek az épületek tulajdonosai számára, hogy csökkentsék az építési és üzemeltetési költségeket.

A lineáris hőhidak hőveszteségének a számítása nem bonyolultabb eljárás, mint a dinamikus energiaszimulációk, amelyek sok országban szükségesek. Ezért a hőhidak számításának a tervezés során meghatározott feladatnak kell lennie.

Azokban az országokban, ahol a hőhidaknak jogszabályban meghatározott értékei vannak, többnyire 2005-ben határozták meg. A meghatározás során az alapelv a „biztonságos oldalon” lenni, vagyis ezen értékek nagyobb hatást gyakorolnak az épületek energiaigényére, mint a részletes számítások során meghatározott valóságot jobban megközelítő hőveszteségek. A tanulmány megállapította továbbá, hogy a megfelelési és ellenőrzési folyamatok gyakran hiányoznak a vizsgált országokban. Ez azt jelenti, hogy az építési fázis lehetséges változásait nem veszik figyelembe a végleges energiaszámítási eredményekben.

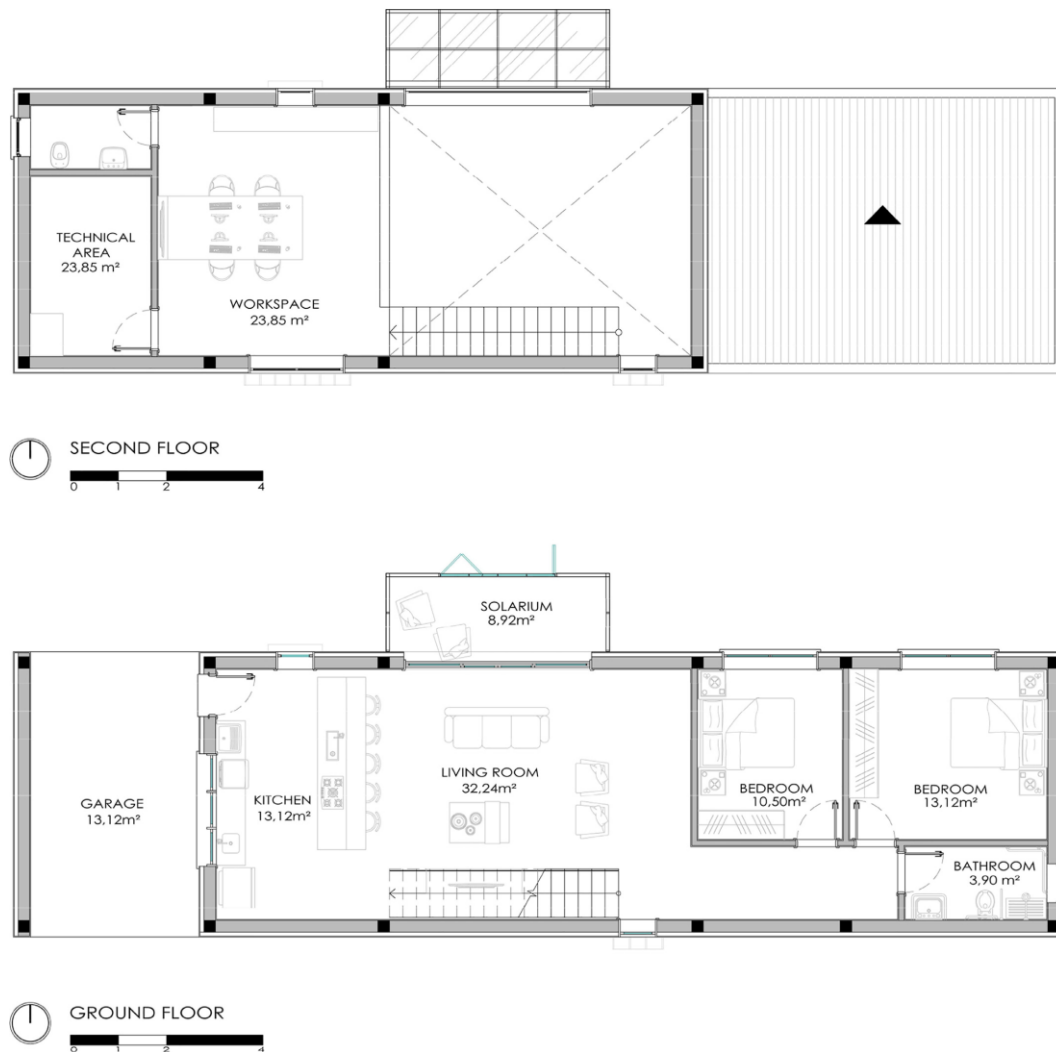
Két brazil kutató tanulmányukban [8] a hőhidak modellezésének három különféle megközelítési módszerét hasonlította össze. A hőhidak hatását a falak hőátbocsátási számításaiban a világ számos országában már hosszú ideje figyelembe veszik, de Braziliában csak néhány éve került a figyelem középpontjába. Világszerte számos országban már vannak szabványok vagy előírások a témában, de Braziliában eddig egyik szabályozás sem foglalkozott ezzel a problémával.

Az energiafogyasztás növekedésével Braziliában az energiahatékonyságról folytatott megbeszélések egyre fontosabbá válnak, és növekszik a jobb hőteljesítményű és alacsonyabb energiafogyasztású épületek szerepe. Az épületek az ország villamos energiájának felét fogyasztják, a lakossági szektor a negyedét teszi ki, ezt követi a kereskedelmi szektor, amely az energia közel 18% -át fogyasztja, és az állami szektor a fogyasztás 8% -ával.

2008-ban jelent meg az NBR 15575 első változata, amely értékeli a lakóépületek teljesítményét, és 13 szempontot mutat be, amelyeket elemezni kell a lakóépületek teljesítményének elemzése során.

Az első megközelítési módszer a valós szerkezet módszere, vagyis a teljes épületet modellezték Energy Plus szoftverben. Az szoftver nem számítja hatékonyan ki a hőhidak hatását, mivel a nem tudja kiszámítani a vonalmenti hőveszteség értékét (ψ). Ez a megközelítés az anyagkonfigurációk tekintetében merevebb, és vizsgálni tudja a hőhid sík, az egész területre gyakorolt hatását. Az energetikai modellezés során a leegyszerűsített megközelítésként meghatározott 2. megközelítést használják a legtöbbet. Az egyenértékű fal hőellenállása, hőátbocsátása és hőteljesítménye megegyezik az eredeti fal szerkezetének értékeivel. A harmadik és egyben utolsó módszer a másodikhoz hasonlóan az ekvivalens fal módszert alkalmazza, de az ISO 10211 szabvány szerint tartalmazza a hőhidak hatását.

A tanulmányban egy átlagosnak tekinthető emeletes, lapostetős lakóépület (lásd 8. ábra) került vizsgálatra. Az épületen 8 különböző hőhidjelenséget vizsgáltak.

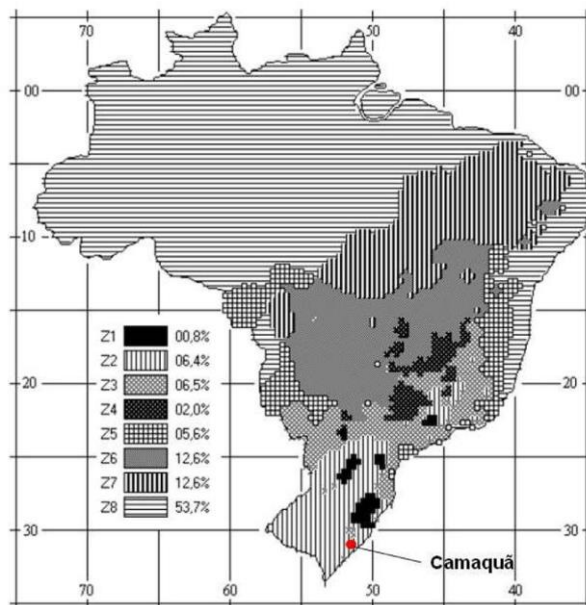


8. ábra: a tanulmányban vizsgált lakóépület földszinti és emeleti alaprajza [8]

A vizsgált épület az NBR 15220 szabvány szerint a második bioklimatikus területén található (a szabvány 8 különböző zónára osztja fel az országot). A szabvány szerinti első, második és harmadik zónában mérhetőek a legalacsonyabb hőmérsékleti értékek. Jelen tanulmány azért készült a második zónában található időjárási modellre, mivel mind közül ez a legextrémebb.

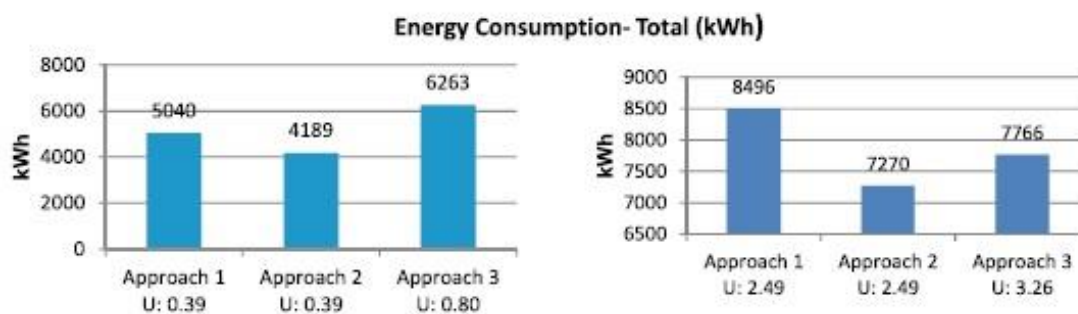
Averages	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
DBT average (°C)	23	22,3	21.9	18.1	15.4	12.0	14.8	13.2	14.5	17.7	20.6	21.6
DBT average of Max. (°C)	36.1	34.8	33.1	32.7	30.0	21.8	28.6	26.3	30.3	31.7	30.7	34.2
DBT average of Min. (°C)	13.2	12.5	14.5	5.8	2.4	1.1	5.0	1.2	6.0	5.7	10.4	11.5
RU average (%)	76	83	81	79	85	88	89	86	85	83	80	78
Wind speed average (m/s)	2.0	1.7	1.5	1.3	1.5	1.3	1.2	1.4	2.0	1.9	2.2	1.9

9. ábra: a kutatás során alkalmazott bioklíma zónára jellemző időjárási adatok [8]



10. ábra: a vizsgált épület földrajzi (és bioklimatikus) elhelyezkedése [8]

Mivel ezt az épületet a 2. bioklimatikus zónán vizsgálják, az energiafogyasztás nagy részét a fűtési energiaigény határozza meg. A világítás és a berendezés fogyasztása mindkét esetben azonos (lásd 11. ábra).



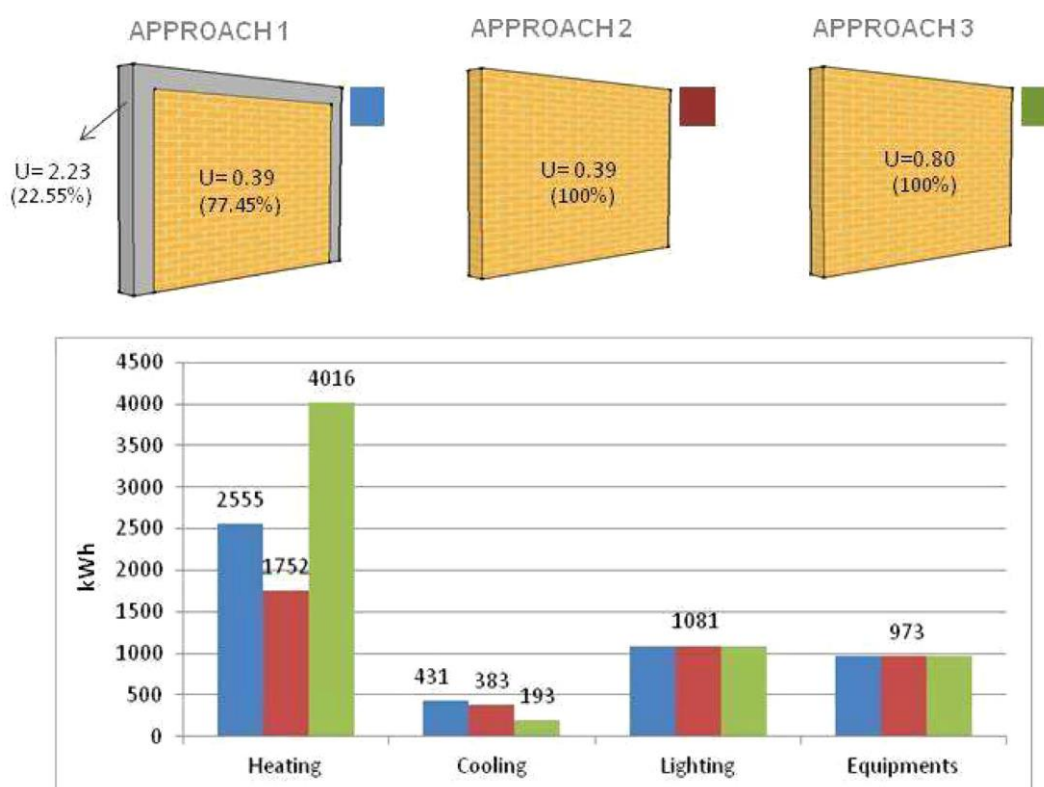
11. ábra: az épület teljes energiaigénye. Bal oldalt a szigetelt, jobb oldalon a kevésbé szigetelt kialakítás [8]

A 2. megközelítést, amely a hagyományos ekvivalens fal módszert alkalmazza a számítási szimulációhoz, összehasonlítjuk a 3. megközelítéssel, amely ugyanazt a módszert alkalmazza, de figyelembe veszi a vonalmenti hőveszteségeket. Körülbelül 33% -os különbség tapasztalható az energiaigényszámítás során ennek következtében a 2. és 3. módszer között. Ezekkel az adatokkal arra lehet következtetni, hogy amikor az energiamodellezést a 2. bioklimatikus zónán hagyományos módon számítjuk ki, a hőhidak figyelembevétele nélkül, akkor ennek az épületnek az energiafogyasztása alábecsült.

Ha azonban összehasonlítjuk a hőhidakat figyelembe vevő két esetet (1. és 3. megközelítés), akkor nagyobb a fogyasztáskülönbség közöttük. Ha az épület jobban hőszigetelt, akkor a 3.

megközelítés fogyasztása 20% -kal nagyobb, mint az 1. megközelítésé, tehát ha az energia modellezéshez az 1. megközelítést alkalmazzuk, akkor az energiafogyasztás alábecsülhető, mivel ez a megközelítés nem számítja ki a hőhidakat hatékonyan.

Ha az épület kevésbé hőszigetelt, akkor az 1. megközelítés szerinti energiamodellezés 9% -kal magasabb fogyasztást mutat, mint a 3. megközelítés. Az 1. megközelítés felhasználásával az energia modellezéséhez az energiafogyasztás túlértékelhető. Megállapíthatjuk, hogy az 1. megközelítés, annak ellenére, hogy megkülönböztetjük a hőhidakat az energetikai modellezésben, nem a legalkalmasabb az energiaigény vizsgálatára, mert alul- vagy túlbecsülheti.



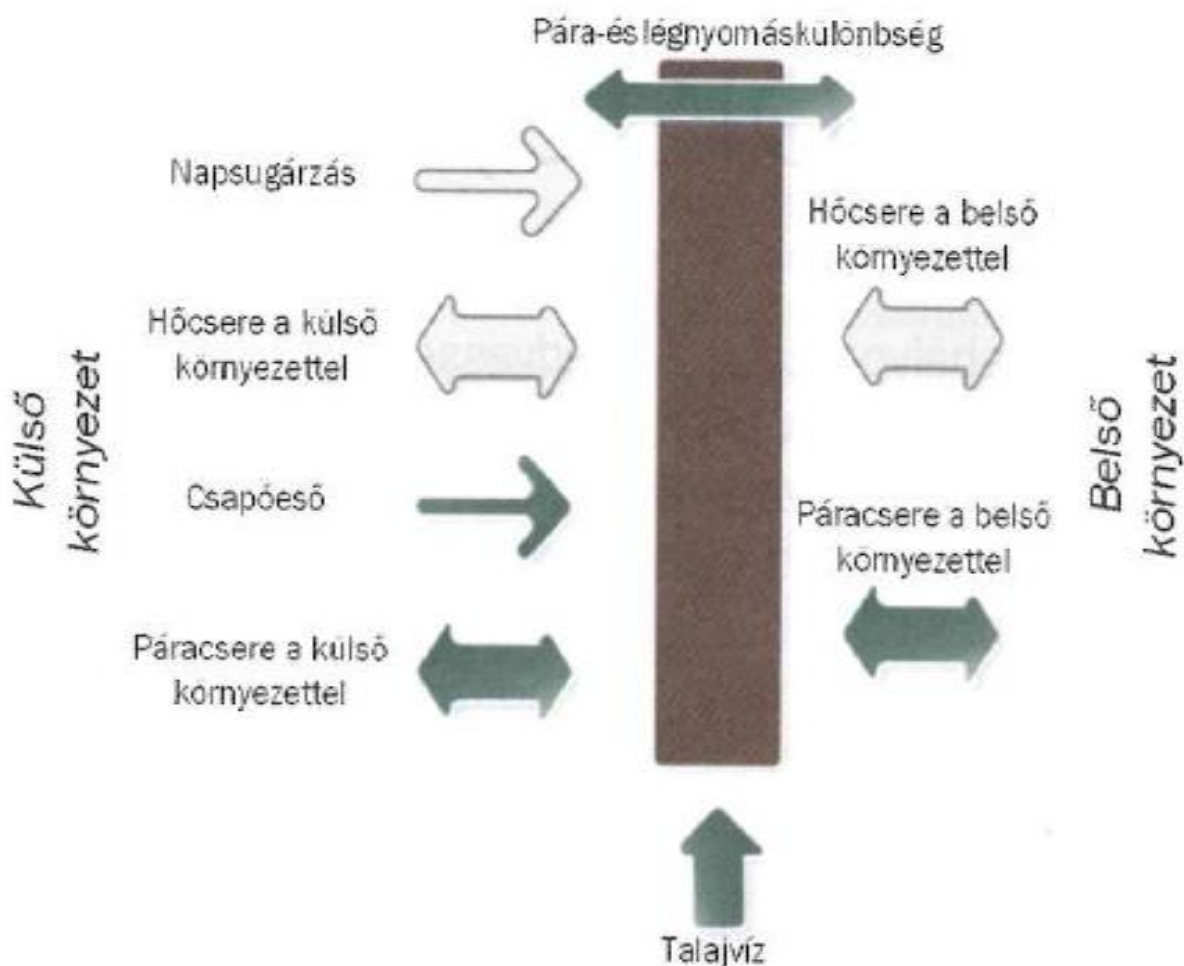
12. ábra szigetelt épület energiaigény megoszlás a különböző vizsgálati módszerek alapján (fűtési, hűtési, világítási és egyéb berendezések) [8]

A tanulmány három különböző típusú energetikai számítás hatását mutatta be, a hőhidak figyelembevételével vagy anélkül, az épület hőkomfortjában és energiafogyasztásában. Megállapítható a hőhidak figyelembevételének és számításának fontossága a számítási szimuláció modellezésében, mivel az eredmények bebizonyították, hogy a szimulációban alkalmazott modellezés típusa befolyásolja az épület hőkomfortját és energiafogyasztását. Ebben a tanulmányban bebizonyosodott, hogy a 3. megközelítés, mely hőhidakat az ISO 10211 szerint számítják ki, pontosabban és valósághűbben ábrázolja a hőhidat hatását az energetikai számítás során.

2.3. Kapcsolt hő és páratechnikai vizsgálatok alapjai

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.

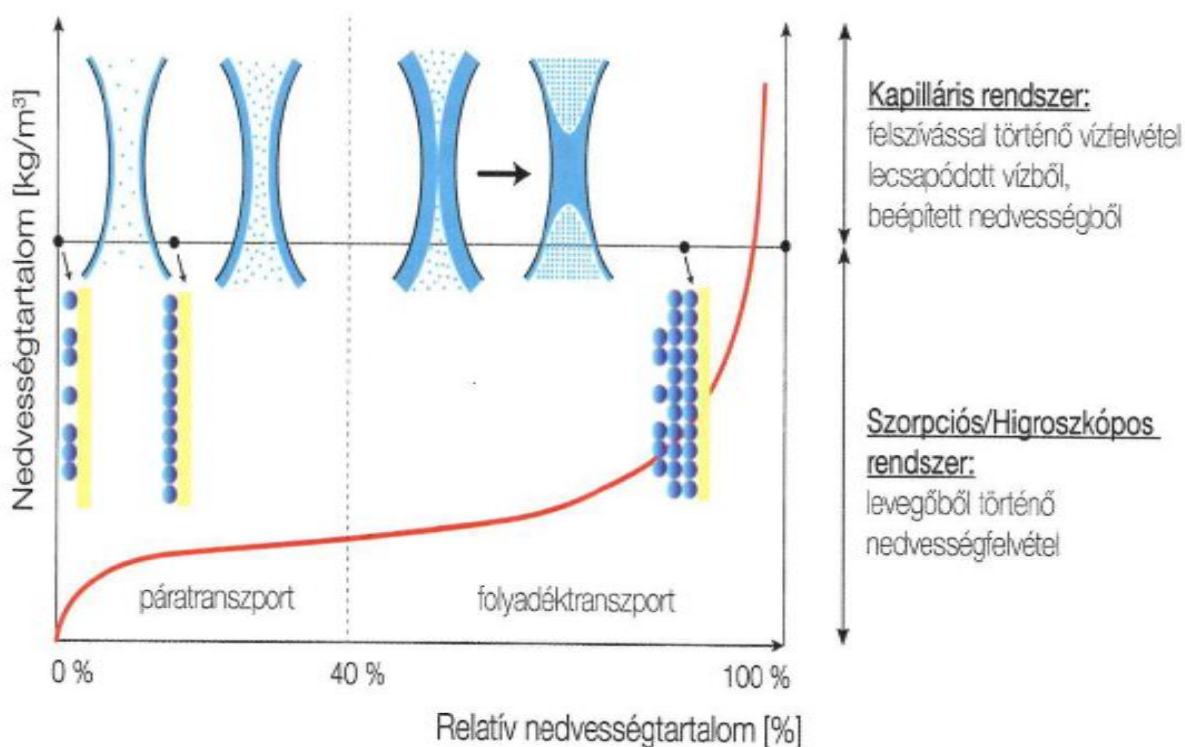
Az épületszerkezeteinket jelentős nedvességtechnikai hatások érik [9] a külső és belső oldalon is (lásd 13. ábra). Ilyen külső oldali hatás például a csapóeső, a talajvízből felszálló nedvesség nem megfelelő szigetelés esetén. Belső oldalon is számos hatás éri a szerkezetünket. Az épület használata során 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.



13. ábra: Határoló falszerkezetet érő hő- és nedvességátadások [10]

Építőanyagainknak két nedvességtárolási módját különböztetjük meg [9], 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 elkezdnek összekapcsolódni (lásd 14. 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.



14. ábra: a relatív nedvességtartalom és a nedvességtartalom függvényében a nedvességtárolási módok [9]

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 leképzése.

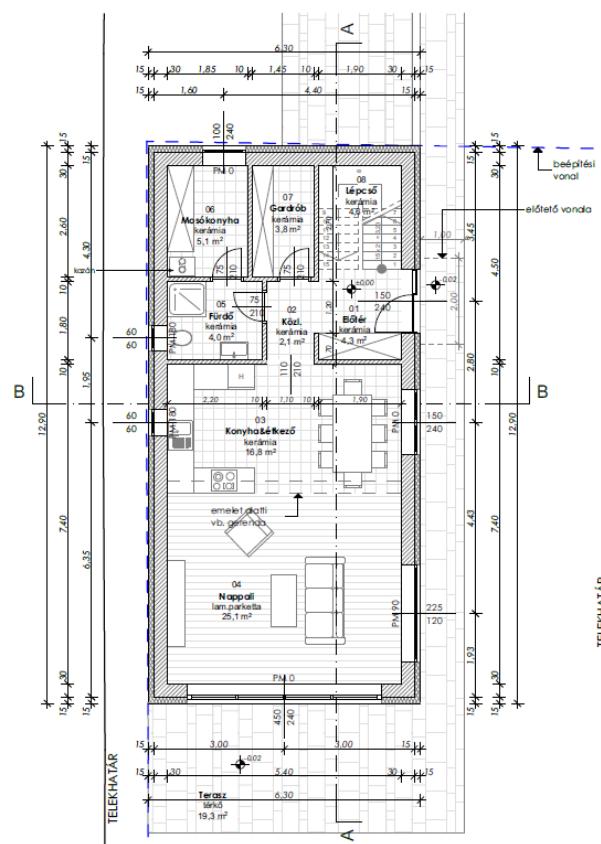
A téma egyik úttörőjének számító Hartwig M. Künzl tanulmányainak megállapításai [11] [12] [13] alapozták meg az épületfizikában a kapcsolt hő- és nedvességtranszport (HAM) számításának alapjait. A legtöbb mai napig is használt építőanyag hővezetési tényezőjének nedvességfelvételre való érzékenységének modelljeit meghatározta [14] 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.

3. Módszertan

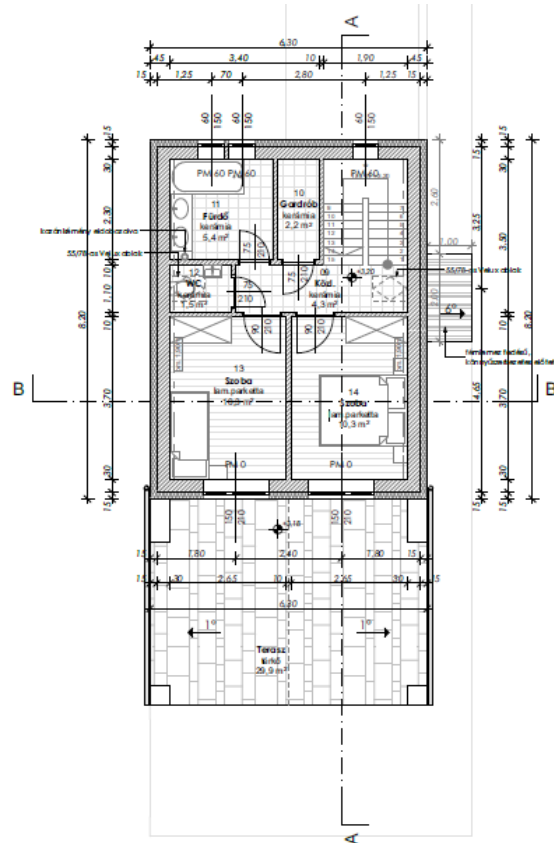
3.1. Az épület bemutatása

Jelen tanulmányban egy újjépítésű, átlagos szerkezeti kialakítású családi házat tanulmányoztam, mely a felhasznált építőanyagokat vizsgálva hazai viszonylatban tipikusnak tekinthető. A hozzávetőlegesen 80 m² alapterületen felépült, magastetős épület 3 fő számára biztosít kényelmet, mely egy nagyméretű lapostetővel is rendelkezik.

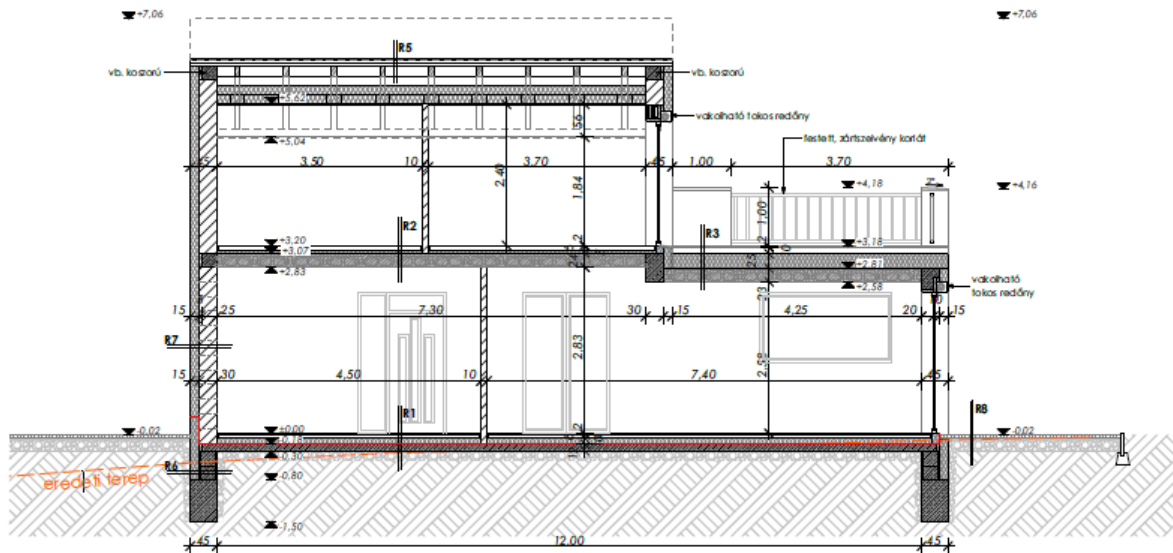
A lakóház egyszerű, letisztult, a XXI. század stílusjegyeit hordozza. Az épület teljes tervdokumentációja a mellékleteknél megtalálható.



15. ábra: a vizsgált épület földszinti alaprajz



16. ábra: a vizsgált épület emeleti alaprajz



17. ábra: a vizsgált épület hosszmetSZete



18. ábra: a vizsgált épület tömegmodellje

Az alábbiakban láthatóak az épület fontosabb rétegrendjei:

Falszerkezet:

1. vékonyvakolat	0,5 cm
2. expandált polisztirolhab hőszigetelés	15 cm
3. külső oldali vakolat	1 cm
4. vázkerámia falazat	30 cm
5. belső oldali vakolat	1,5 cm

Talajon fekvő padló rétegrend:

1. laminált parketta	0,7 cm
2. alátét habfólia	0,9 cm
3. estrich réteg	6 cm
4. elválasztó réteg	1 rtg.
5. terhelhető padló hőszigetelő lemez	10 cm
6. vasalt aljzat	12 cm
7. kavicsfeltöltés	25 cm

Hőszigetelt tető rétegrend:

- | | |
|---|-------------|
| 1. tetőcserép | 1 rtg. |
| 2. tetőlécezés | 2,5 cm |
| 3. ellenlécezés | 5 cm |
| 4. páraáteresztő fólia | 1 rtg. |
| 5. szarufa (közte kőzetgyapot szigetelés) | 15 cm |
| 6. kőzetgyapot szigetelés | 15 cm |
| 7. párazáró fólia | 1 rtg. |
| 8. gipszkarton (profilvázon rögzítve) | 2 x 1,25 cm |

Lapostető rétegrend:

- | | |
|---|---------|
| 1. fagyálló kerámia lapburkolat | 1,5 cm |
| 2. ragasztó + kiegyenlítő réteg | 0,5 cm |
| 3. változó vastagságú beton | 4-10 cm |
| 4. terhelhető extrudált hőszigetelő lemez | 25 cm |
| 5. monolit vasbeton födém | 24 cm |
| 6. mennyezeti vakolat | 1,5 cm |

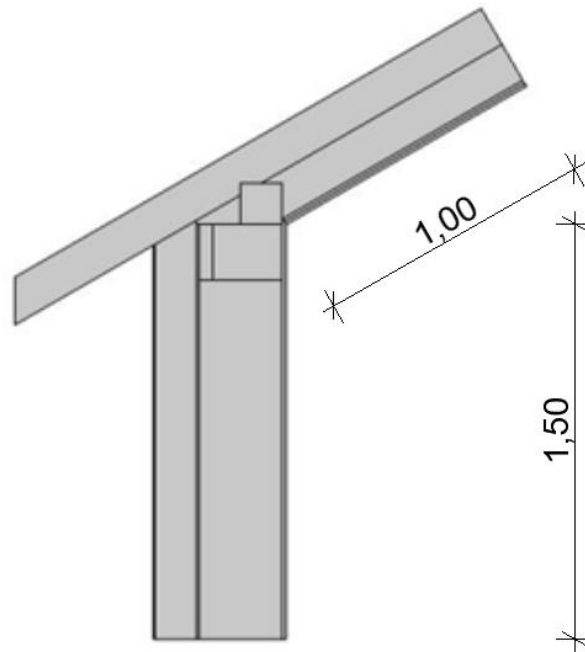
3.2. Vizsgált csomópontok bemutatása

Az eddigiekben bemutatott épület összes hőtechnikai szempontból releváns - összesen 21 darab különböző – kialakítását vizsgálatam. A modelleken a hőtechnikailag nem releváns részleteket elhanyagoltam (pl.: tetőcserép, tetőléc, ellenléc, ...). A mellékletek között az összes vizsgált csomóponti kialakítás megtekinthető. Az alábbi csomópontokról készültek vizsgálatok:

2. táblázat: vizsgált csomópontok listája és azonosító sorszámai

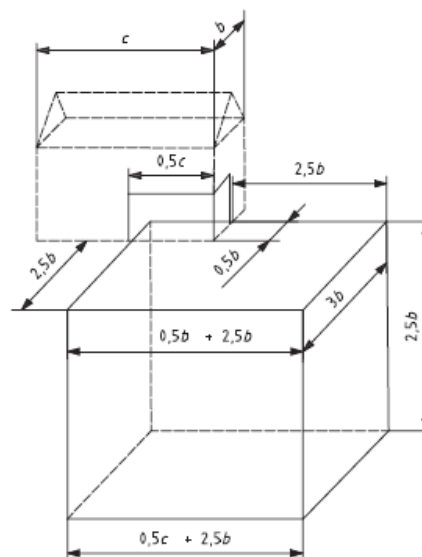
I.	fal – egyenes	XI-XIII.	tetőtér (3 db)
II.	fal – sarok	XIV.	tűzfal
III.	fal – belső válaszfal csatlakozás	XV.	lapostető
IV.	fal – födém csatlakozás	XVI.	lapostető – emeleti fal csatlakozás
V.	nyílászáró – parapettel	XVII.	lapostető – földszinti fal csatlakozás
VI.	nyílászáró – parapet nélkül	XVIII.	emeleti teraszajtó – lapostető csatl.
VII.	nyílászáró – áthidaló	XIX.	teraszajtó - áthidaló
VIII.	nyílászáró – oldalsó beépítés	XX-XXI.	eresz (2 db)
IX-X.	lábazat (2 db)		

A geometria méreteit az MSZ EN 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 -, ahol lehetőség volt rá - minden csomópont esetén 1,5 méteres távolságot vettem figyelembe a központi elemtől.

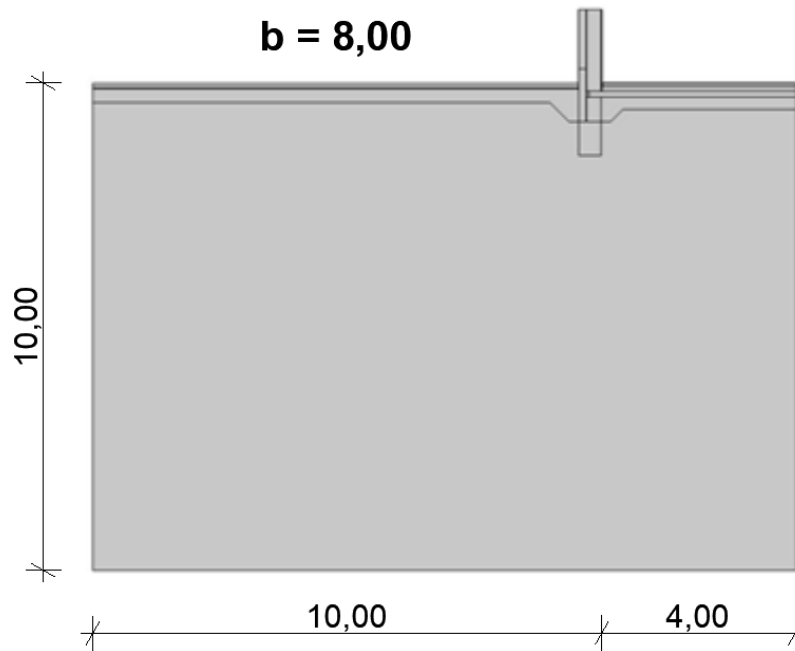


19. ábra: numerikus modellezéshez egyszerűsített modell

Néhány csomópont esetén a szabvány a korábban bemutatott méreteknél nagyobb geometriát követel meg. Ilyen például a lábazati csomópont, mely esetében vízszintes irányban legalább az épületszélességének felét ($0,5b$) szükséges a belső oldalon, illetve két és félszeresét ($2,5b$) a külső oldalon meghatározni. Függőleges irányban felfelé a korábban említett irányelvek érvényesek, míg lefelé haladva szintén az padlóvonal szélességének két és félszeresét szükséges meghatározni. A dinamikus modell felépítéséhez szükséges, hogy a talaj vastagsága tíz méter, vagy azt meghaladó legyen, melynek köszönhetően a felvett alsó metszősík mentén közel állandó hőmérsékleti értéket határozhatunk meg a teljes naptári évre vonatkoztatva.



20. ábra: MSZ EN ISO 10211:2017 szerinti metszősík a talajban



21. ábra: MSZ EN ISO 10211 alapján numerikus vizsgálathoz felépített lábazati modell

3.3. Egyszerűsített számítási eljárás

A hőhidakat a transzmissziós hőveszteség számítása esetén vesszük figyelembe egy épület energiaigényének meghatározásához a következő általános összefüggés alapján [15]:

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

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 hőhíd hossza [m],
- Ψ_k a k csatlakozási hőhíd vonalmenti hőátbocsátási tényezője [W/mK],
- χ_j a j pontszerű hőhíd hőátbocsátási tényezője [W/K].

A hőhidak figyelembevétele egyszerűsített és részletes eljárással is történhet a hatályos magyar épületenergetikai rendelet szerint (hiy: 7/2006 TNM). 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.

Egyszerűsített módszer alkalmazása esetén a hőhidak hatásával növelt transzmissziós hőveszteség a következő összefüggés alapján határozható meg:

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

ahol:

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

A χ korrekciós tényező értékeit a szerkezet típusa és a határolás tagoltsága függvényében az alábbi táblázat tartalmazza:

3. táblázat: A csatlakozási hőhidak hatását kifejező korrekciós tényező [16]

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

4. táblázat: Tájékoztató adatok a χ korrekciós tényező kiválasztásához [16]

	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 tetőttereket határoló szerkezetek	< 0,4	0,4 - 0,5	> 0,5

A talaj felé irányuló hőveszteség a rendelet szerint az épület kerület alapján számítható a padló vonalmenti hőátbocsátási tényezője alapján, egyszerűsített táblázatok segítségével. Ez a módszer azonban a részletes módszerként elfogadott MSZ EN ISO 13370 szabvány eredményeihez képest jelentősen eltérő eredményekhez vezet, ezért itt az utóbbi szabvány számítási módszerét alkalmaztam [17]. A rendelet módosítására irányuló javaslat is az MSZ EN ISO 13370 szabvány szerinti módszert ajánlja egyszerűsített eljárás esetén.

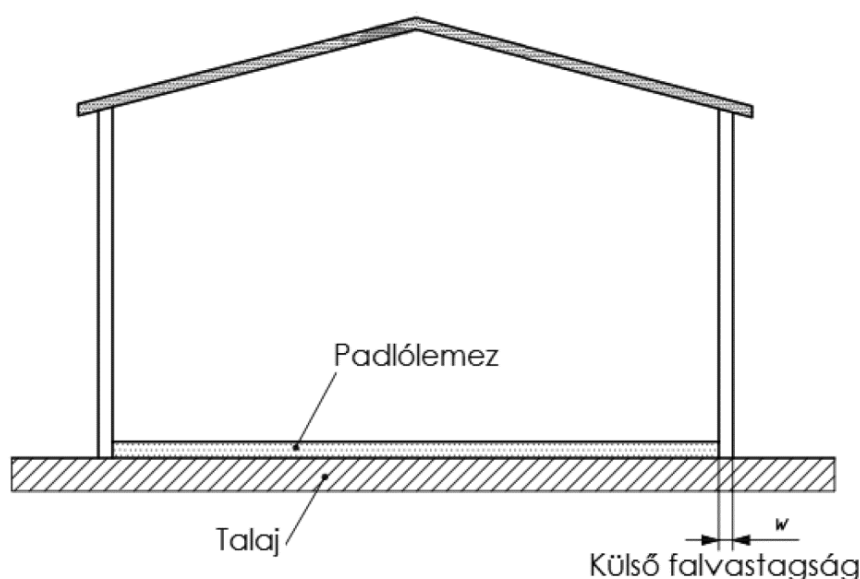
A talaj hőtechnikai tulajdonságai a következő táblázat alapján vehetők fel. Amennyiben a talaj típusa nem ismert, a 2. típus jellemzőit kell figyelembe venni.

5. táblázat: különböző talajtípusok hőtechnikai jellemzői [18]

Talajtípus	Leírás	Hővezetési tényező λ_{talaj} W/(m·K)	Térfogatra vonatkoztatott hőkapacitás ρc , J/(m ³ ·K)
1.	Agyag, iszap	1,5	$3,0 \cdot 10^6$
2.	Homok, kavics	2,0	$2,0 \cdot 10^6$
3.	Homogén kő	3,5	$2,0 \cdot 10^6$

A terepszint alatt beépített építőanyagok hőtechnikai jellemzőinek meghatározásánál figyelembe kell venni a beépítés helyének jellemző nedvesség és hőmérsékletviszonyait. Amennyiben a padlóval közvetlenül érintkező terek belső hőmérséklete eltér egymástól, a helyiséghőmérsékletek területarányos átlagértéke használható.

Az MSZ EN ISO 13370 szabvány számítási eljárásának elvi elrendezési vázlata a talajon fekvő padló számításához az alábbi ábrán látható. A modell szerint homogén, egyetlen hővezetési ellenállással jellemzett padlólemez (melynek vastagsága a modell szempontjából lényegtelen, csupán az ellenállás mértéke fog számítani) és az emellett található „w” falvastagságú külső fal vastagsága alapján és a talaj hővezetési tényezőjének, valamint természetesen a padló szerkezet geometriai méreteinek ismeretében számíthatjuk a padló egyenértékű hőátbocsátási tényezőjét. Ez abban különbözik a padló rétegtervi hőátbocsátási tényezőjétől, hogy a talaj hővezetési ellenállását is tartalmazza.



22. ábra: Az MSZ EN ISO 13370 szerinti talajon fekvő padló szerkezet modellje [18]

A padló hőátbocsátási tényezőjének meghatározásához számítandó a talajon fekvő padló karakterisztikus mérete:

$$B = \frac{A}{0,5P} \quad (4)$$

ahol:

- B a padló karakterisztikus mérete [m],
- A a kondicionált tér padlójának területe [m²],
- P a padló kitett kerülete, melybe beleszámítandó a külső környezettől vagy a szomszédos fűtetlen tértől elválasztó csatlakozások hossza [m].

A padló egyenértékű vastagsága (a padlószerkezet hővezetési ellenállásával azonos hővezetési ellenállású talajréteg vastagsága) a csatlakozó fal vastagsága és a padló hővezetési ellenállása alapján:

$$d_p = d_f + \lambda_{talaj}(R_{si} + R_p + R_{se}) \quad (5)$$

ahol:

- d_p a padló egyenértékű vastagsága [m],
- d_f a csatlakozó külső falak teljes vastagsága [m],
- λ_{talaj} a talaj hővezetési tényezője [W/mK],
- R_p a padlószerkezet hővezetési ellenállása, figyelembe véve a padlón, padló alatt vagy a padlóban elhelyezett teljes felületű hőszigetelést [m²K/W],
- R_{si} a belső felületi hőátadási ellenállás [m²K/W],
- R_{se} a külső felületi hőátadási ellenállás [m²K/W],

A padlószerkezet hővezetési ellenállásának számításakor a szemcsés ágyazat (pl. homokos kavics, zúzottkő) hővezetési ellenállását nem szabad figyelembe venni, a nagy testsűrűségű betonlemez és vékony padlóburkolatok hatása elhanyagolható.

A talajon fekvő padló (a talaj hatását is tartalmazó) egyenértékű hőátbocsátási tényezője a padló egyenértékű vastagságától és a padló a terepszinttől számított z mélységétől függően számítható a következő képletek szerint.

Ha $(d_p + 0,5z) < B$ (hőszigetelés nélküli vagy mérsékelten hőszigetelt padló):

$$U_{T,p} = \frac{2\lambda_{talaj}}{\pi B + d_p + 0,5z} \ln\left(\frac{\pi B}{d_p + 0,5z} + 1\right) \quad (6)$$

Ha $(d_p + 0,5z) \geq B$ (jól hőszigetelt padló):

$$U_{T,p} = \frac{\lambda_{talaj}}{0,457 B+d_p+0,5z} \quad (7)$$

Amennyiben a padló mélysége a külső terepszinthez képest változó, az átlagértéket kell figyelembe venni. Terepszint közelében fekvő padlónak a külső terepszinthez képest $\pm 0,5$ m szintkülönbségen belül elhelyezkedő padlót nevezzük, ekkor $z = 0$ [19].

3.4. Hőhíd-katalógus

3.4.1. MSZ EN ISO 14683:2017

Részletes megoldás esetén az értéket az MSZ EN ISO 14683:2017 egyszerűsített hőhíd-katalógusként alkalmazható szabványból is ki lehet keresni, mely érték kiválasztásához ismernünk kell a csomópont (hőhíd-jelenség) típusát, rétegrendjét, hosszát.

Amennyiben a kialakítás megtalálható a szabványban, a táblázatból kiolvasható a vonalmenti hőátbocsátás (Ψ) értéke, melyet felszorozva a hőhíd-jelenség fajlagos hosszával az adott lineáris hőveszteség által létrejött transzmissziós hőveszteség.

A szabvány hátránya, hogy összesen csak nyolc különféle hőhíd-jelenséggel foglalkozik csak és a szigetelés anyaga – vastagsága – építőanyag használat - szerkezeti kialakítás tekintetében kevésbé változatos.

A teljes épület transzmissziós hőveszteségének meghatározásához a korábbiakban ismertetett (1) egyenletet alkalmazzuk.

3.4.2. Nemzeti hőhíd-katalógus

Másik lehetőség, hogy hőhíd-katalógust alkalmazunk a vonalmenti hőveszteség meghatározásához. Alkalmazása teljesen megegyezik a 3.4.1. fejezetben bemutatott MSZ EN ISO 14683:2017 szabvány használatával. Az általunk alkalmazott magyar, nemzeti hőhíd-katalógus [20] használatával 13 különböző hőhíd-jelenség értéke határozható meg. A korábban bemutatott szabvánnyal szemben sokkal részletesebb.

A hőhíd-katalógus összesen körülbelül 20 ezer vonalmenti hőátbocsátási tényezőt tartalmaz a legjellemzőbb épületszerkezeti csomóponti kialakítások tekintetében. A nagyszámú eredmény annak köszönhető, hogy értékek többféle határolószerkezet esetére is kiszámításra kerültek (pl. számos falszerkezet, többféle födém-szerkezet, stb).

A hőhíd-katalógus tartalmazza továbbá a csomópontokban fellelhető alap határolószerkezeteket is, például az alkalmazott falazatok és magastetők hőátbocsátási tényezőit. Tartalmaz továbbá acél mechanikai rögzítések (dűbelek) hőátbocsátási tényező korrekcióit is, négyféle

hőszigetelőanyag és négyféle hőszigetelés vastagság esetére, közel 60 féle falszerkezeti kialakításnál.

3.5. Numerikus végeleemes vizsgálat

Részletes eljárás esetén egyik lehetőség a numerikus modell létrehozása, mely által sokkal pontosabban megismerhetjük az adott jelenség tulajdonságait. Ha pontosan szükséges meghatározni a hőhídhatás nagyságát akkor elengedhetetlen a számítógépes numerikus szimuláció használata az MSZ EN 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 mindez megtörtént, akkor a modell felosztása következik véges elemes háló segítségével és a szimuláció lefuttatása. Legutolsó lépésként a kapott eredményeket kiértékelése következik. 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.

A vizsgálatok Comsol Multiphysics 5.5 végeleemes szoftverben zajlottak. Minden csomópont esetén hét különféle numerikus vizsgálat zajlott. Vizsgálatra került stacioner (3 db) és dinamikus (4 db) állapotban is a csomópont, előbbi esetében hőtechnikai és kapcsolt hő- és nedvességtechnikai módszerrel is, utóbbi esetében csak hőtechnikai modellt használva, de a napsugárzás hatását is figyelembe véve. A hőtechnikai modellek esetében almodellek is létrehozásra kerültek a napsugárzás és a nedvességtartalom különböző állapotaiban.

3.5.1. Peremfeltételek meghatározása

Ezután a peremfeltételek (külső és belső klímaadatok) felvétele következik. A vizsgálatok stacioner és dinamikus állapotban is történtek, így szükséges volt a külső és belső hőmérséklet és a relatív páratartalmat, a napsugárzást (égtájtól, felület színétől, beesési szögtől függő). A stacioner adatok meghatározása statisztikai alapon a budapesti téli fűtési időszakra történt.

A számítások alapján a külső légköri állapot statisztikai átlag szerint 5,33 °C léghőmérséklet 70,9 százalékos relatív páratartalom mellett (szabvány szerint -2°C, 90%-os relatív páratartalommal), míg a belső állapot 20 °C léghőmérséklet és 45,4 százalékos relatív páratartalom (a szabványban 20°C-os belső léghőmérséklet és 65%-os relatív páratartalom). Fontos peremfeltétel a különböző hőátadási ellenállások [21], melyet az alábbi táblázat tartalmaz:

6. táblázat: a felületi hőátadási ellenállás értékei (MSZ EN ISO 6946:2017)

Felületi hőátadási ellenállás $m^2 \cdot K/W$	A hőáram iránya		
	Felfelé	Vízszintes	Lefelé
R_{si}	0,10	0,13	0,17
R_{se}	0,04	0,04	0,04

A dinamikus vizsgálathoz szükséges időjárási adatok órai bontásban a Budapestre vonatkozó Meteororm 7 alapján kerültek meghatározásra [22]. Ezen adatsorok alapján képzett peremfeltételek függenek a hőmérséklettől, relatív nedvességtartalomtól, hosszú- és rövidhullámú sugárzástól, szélesebségtől is, melyek minden órában változnak. A modellezett időtartam összesen két év, melyből a második év fűtési időszaka került vizsgálatra. A csapóeső hatását dinamikus kapcsolt hő- és nedvességtechnikai modell alkalmazása mellett lehet figyelembe venni, melyet jelen tanulmány nem vizsgál.

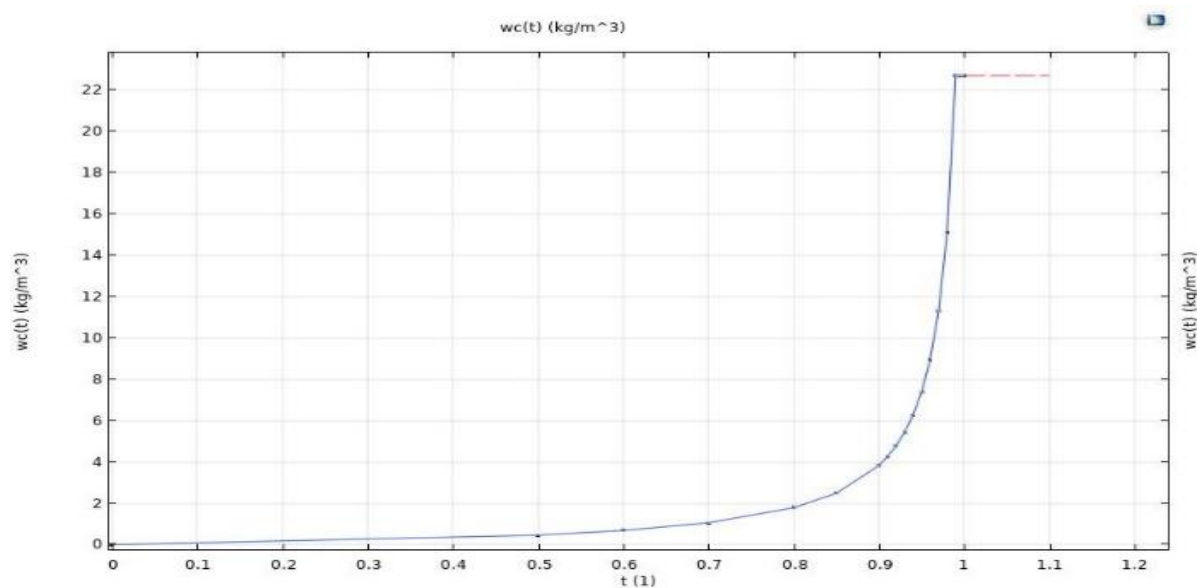
3.5.2. Anyagmodellek definiálása

Az anyagmodellek meghatározása komplex eljárást igényel. Minden anyag esetén szükséges meghatározni a sűrűséget és a fajhőt, mely értékek konstansok. A további bemeneti adatokat (nedvességtároló képesség, vízfelvételi képesség, nedvességgel szembeni ellenállás és a hővezetési tényező) meghatározása a külső páratartalomtól való függéssel interpolálás segítségével vagy analitikusan történt.

A nedvesség hatására változó hőtechnikai tulajdonságok a szabványból [23] és a WUFI 6 szoftver [24] adatbázisából határozhatóak meg.

A pusztán hőtechnikai szimulációkon alapuló modellek esetén a szerkezetben jelen lévő és pontról pontra változó nedvességtartalom hatását nem lehet pontosan meghatározni, így nem lehet nedvesség szerinti korrekciós értéket figyelembe venni az anyagok hővezetési tényezőjében. Közelítő módszerként két eltérő állapotban is vizsgáljuk a hőtechnikai modelleket. Az első állapotban teljesen száraznak tekintjük a kialakítást (0% relatív nedvességtartalom), míg a második állapotban 50 százalékos relatív nedvességtartalmat feltételezünk, mely alapján számítható a nedvesség átszámítási együttható.

A relatív páratartalomtól függő nedvességtárolási képességet, vízfelvételi képességet, nedvességgel szembeni ellenállást minden esetben a WUFI 6 szoftver alapján definiáltam. A szoftverben táblázatos formában találhatóak az adatok, melyből elsőfokú (lineáris) interpolációval létrehozható a görbe a Comsol Multiphysics 5.5 szoftverben. (lásd 23. ábra).



23. ábra: az expandált polisztirolhab nedvességtárolási képessége

A hővezetési tényező a szigetelések esetében (lásd 24. ábra), az MSZ EN ISO 10456 szabvány szerint került meghatározásra az alábbi összefüggéssel:

$$\lambda_2 = \lambda_1 * F_T * F_m \quad (8)$$

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

$$F_T = e^{f_T(T_2 - T_1)} \quad (9)$$

ahol:

f_T hőmérséklet-átszámítási együttható

T_1 az első környezeti állapot hőmérséklete

T_2 a második környezeti állapot hőmérséklete

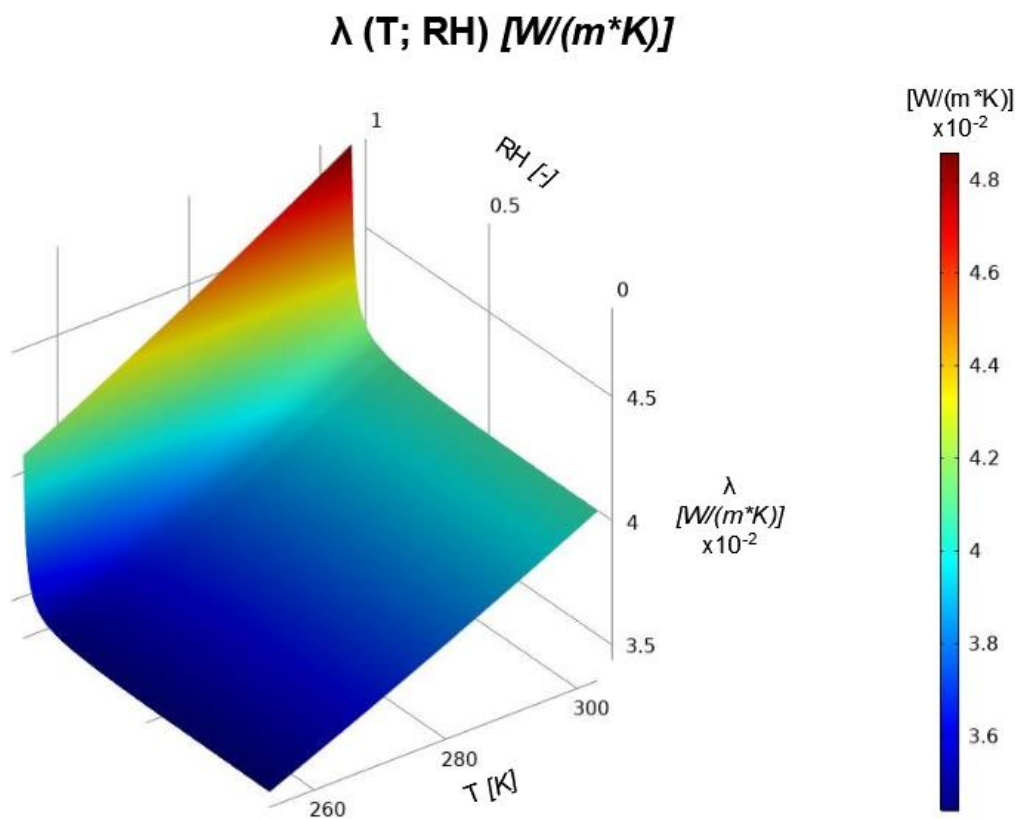
$$F_m = e^{f_u(u_2 - u_1)} \quad (10)$$

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;



24. ábra: expandált polisztirolhab hőszigetelő anyag hőátbocsátási tényezőjének nagysága a hőmérséklet $[T]$ és a relatív nedvességtartalom függvényében $[RH]$

A további anyagok hővezetési tényezői a WUFI 6-ban található adatok lineáris interpolálásával kerültek definiálásra.

7. táblázat: felhasznált építőanyagok áttekintő táblázata

#	Megnevezés	Hővezetés	Hőkapacitás	Mű	Sűrűség
1	Födémszigetelés (Austrotherm AT-N150)	0.034	1450	60	30
2	Lépéshang szigetelés (Austrotherm AT-L2)	0.045	1450	60	15
3	Extrudált polisztirolhab (Austrotherm XPS TOP P)	0.036	1450	150	30
4	Expandált polisztirolhab (Austrotherm AT-H80)	0.038	1450	60	15
5	Ásványgyapot	0.038	1030	1.1	135
7	Vékonyvakolat	0,87-3,49	850	23-18	1330
8	Külső vakolat	1,2 - 3	850	25	2000
9	Vázkerámia	0.17	889	5 - 10	750
10	Belső vakolat	0,2 - 1,42	850	8.3	850
11	Üveg (U=0,6; v=0,044)	0.029301	750	1000000	2200
12	Keret (U=1,1; v=0,08)	0.1075	900	1000000	1390
13	Vasbeton	2.5	1000	130-80	2400
14	Beton	1.65	1000	120-70	2200
15	Talaj	0.505 – 2.2	850	50	1579
16	Tömörített homokos kavics ágyazat	2	1000	50	2500
17	Fenyő	0.09 – 0.2462 és 0.23 – 0.6245	1400	130 és 4.3	455
18	Laminált padló	0.15	1600	2500 - 250	800
19	Kiegyenlítés	1.7	850	45.5 – 16.7	1782
20	Gipszkarton	0.1925 – 0.837	1384	6.8	732
21	Égetett kerámia	0.519	889	5 - 10	1786
22	Kerámia lapburkolat	0.43	840	30	1747
23	PUR hab	0.05	1500	60	70
24	Műanyag	0.2	1500	50000	1500

3.5.3. Hőtechnikai szimuláció

A hőtechnikai szimulációt az MSZ EN ISO 10211:2017 szabvány szerint kerültek elvégzésre. 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 mellett 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:

$$q = \frac{T - T_s}{R_s} \quad (11)$$

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.

3.5.4. 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 [25] előírásai szerint alkalmaztam és a Comsol Multiphysics 5.5 szoftvert segítségével, végeselemes módszerrel (VEM) oldottam meg.

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

$$\nabla * q = Q \quad (12)$$

$$q = -d_z(\lambda_{eff} * \nabla * T + L_v * \delta_p * \nabla * (\varphi * p_{sat})) \quad (13)$$

ahol:

- ∇ nabla vektoriális differenciáloperátor
- q hőáramsűrűség [W/m^2]
- Q hőforrás [W/m^3]
- 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:

$$\nabla * g = G \quad (14)$$

$$g = -d_z(\xi * D_w * \nabla * \varphi + \delta_p * \nabla * (\varphi * p_{sat})) \quad (15)$$

ahol:

- g nedvességáram sűrűség [kg/m^2s]
- G nedvességforrás [kg/m^3s]
- ξ differenciális nedvességkapacitás; $\xi = \frac{dw}{d\varphi}$ [kg/m^3]
- D_w diffúziós tényező (folyadéktranszport tényező) [m^2/s]
- w nedvességtartalom [kg/m^3] az anyagok higroszkópos szorpcióis izotermái szerint

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

$$-n * d_z q_0 = 0 \quad (16)$$

$$-n * d_z q_0 = h_s(T_{air} - T) \quad (17)$$

ahol:

- q_0 felületi hőáramsűrűség [W/m^2]
- h_s hőátadási tényező [W/m^2K]

A a nedvességtranszport peremfeltételei a következőképpen írható fel:

$$-n * d_z g_0 = 0 \quad (18)$$

$$-n * d_z g_0 = \beta_p h_c (\varphi_{air} * p_{sat}(T_{air}) - \varphi * p_{sat}(T)) \quad (19)$$

ahol:

β_p konstans, melynek értéke $7,7 * 10^{-9}$ [kgK/WsPa], és a konvektív hőátadási tényezővel szorozva kaphatjuk meg a felületi nedvességátadási tényezőt [kg/m²sPa, egyszerűsítve s/m]

φ relatív nedvességtartalom [-]

4. Eredmények

Mindegyik módszer esetén a teljes számítási dokumentáció megtalálható a mellékletekben.

4.1. 7/2006 TNM szerinti egyszerűsített eljárás eredménye

A számítás a módszertanban ismertetett eljárás szerint történt. Első lépésként az épület tervdokumentációja alapján az egyes hőhíd típusok hosszát és a határoló szerkezet területét szükséges összegezni, melynek hányadosa segítségével táblázatból a khi korrekciós tényező is meghatározható. Ezután egyirányú hőáramot feltételezve kiszámítható a termikus burkot határoló szerkezetek (külső fal, lapostető, beépített tetőtér, talajon fekvő padló) hőátbocsátási tényezője ($U_{felületi}$). A khi értékkel módosított „U” érték ($U_R=U_{korrigált}$) és az eredetileg kiszámított „U” érték különbsége mutatja a vonalmenti hőveszteség 1 m² határoló felületre vetített mértékét.

Az egyes szerkezetek korrigált hőátbocsátási tényezőjét a határoló belső felület nagyságával felszorozva és összegezve meghatározható az épület teljes transzmissziós hővesztesége W/K dimenzióban.

8. táblázat: az egyes határoló felületek nagyságát, illetve hőátbocsátási tényezőit összefoglaló táblázat (7/2006 TNM szerint meghatározott)

Határoló szerkezet	Felület	$U_{felületi}$	$U_{vonalmenti}$	$U_{korrigált}$
	[m ²]	W/(m ² *K)	W/(m ² *K)	W/(m ² *K)
Külső falak	141.85	0.1676	0.0503	0.2179
Lapostető	29.61	0.1378	0.0138	0.1516
Beépített tetőtér határoló szerkezet	68.97	0.1383	0.0208	0.1591
Padló	64.80	0.1906	0	0
Tokszerkezet	2.33	1.1	0	0
Üveg	21.50	0.6	0	0

9. táblázat: az egyes határoló szerkezetek és a teljes épület 7/2006 TNM szerint meghatározott hőveszteségeit összefoglaló táblázat

Határoló szerkezet	Felületi hőveszteség	Vonalmenti hőveszteség	Teljes hőveszteség
	[W/K]	[W/K]	[W/K]
Külső falak	23.78	7.13	30.92
Lapostető	4.08	0.41	4.49
Beépített tetőteret határoló szerkezet	9.54	1.43	10.97
Padló	12.35	0.00	12.35
Tokszerkezet	2.56	0.00	2.56
Üveg	12.90	0.00	12.90
Összesen:	65.21	8.97	74.18

A padló felületi hőveszteségének a meghatározása a módszertanban leírtak alapján az MSZ EN ISO 13370 szabvány alapján történt, a lábazati vonalmenti többlet hőveszteség hatása a külső falaknál lett figyelembe véve.

Az eredményekből jól látható, hogy az egyszerűsített számítás alapján a felületi hőveszteség közel 40 százaléka a falakon keresztül történik, míg második legnagyobb veszteséggel - összesen majdnem 25 százalék - a nyílászárók (tokszerkezet és üveg együttesen) rendelkeznek. Természetesen a számítási módszerben a nyílászárók szoláris nyeresége (és tájolása) nincsen figyelembe véve, mely az energiamérleget tovább árnyalhatná.

A vonalmenti hőveszteségeket okozó hatások döntő többségét a külső határoló falszerkezet korrekciós tényezője tartalmazza.

A számítás menete nem igényel komplex tudást, a lépések könnyen követhetőek. A hőhidak által okozott többlet hőveszteség jelentős pontatlanságokat tartalmazhat, mivel méretükre a fajlagos nagyságukból (egy négyzetméterre vetített hőhidhossz) következtettünk, nem vettük figyelembe az eltérő hőhidak okozta eltérő hatásokat. A rendelet által 2006-ban meghatározott értékek az akkor alkalmazott csomóponti kialakítások alapján történtek, mely részletrajzok az elmúlt másfél évtizedben jelentős változásokon mentek keresztül a hazai piacon.

4.2. Hőhidkatalógus alkalmazásával meghatározott eredmény

A termikus burkot határoló szerkezetek (külső fal, lapostető, beépített tetőtér, talajon fekvő padló) hőátbocsátási tényezője továbbra is az egyszerűsített eljárás szerint kiszámított értékek (összesen: 65.21 W/K), de a vonalmenti hőveszteségeket ezúttal hőhidkatalógusban meghatározott értékekkel vesszük figyelembe. A hőhidkatalógus alkalmazásához elegendő ismerni a hőhid típusát, hosszát, illetve a csomóponti kialakítást és az azt alkotó építőanyagokat.

A kétdimenziós hőveszteségek 2 különböző pszi (Ψ) értékeket tartalmazó táblázat alapján is meghatározásra kerültek. Ha egy csomópont nem volt a hőhídkatalógusokban megtalálható, az esetben a számítás során nem vettem figyelembe.

10. táblázat: a hőhídkatalógus által meghatározott vonalmenti hőveszteségeket összefoglaló táblázat

Hőhíd megnevezése	Hossz	Ψ érték		Hőveszteség	
		[W/(m*K)]		[W/K]	
	[m]	MSZ EN ISO 14683	Nemzeti hőhíd-katalógus	MSZ EN ISO 14683	Nemzeti hőhíd-katalógus
Fal - sarok	18.60	0.15	0.05	2.79	0.93
Fal - közbenső födém csatlakozás	20.90	0.10	0.07	2.09	1.46
Nyílászáró - áthidaló	16.75	-	0.19	0.00	3.18
Nyílászáró beépítés	55.15	0.00	0.02	0.00	1.10
Lábazat	34.80	0.75	0.06	26.10	2.09
Magastető ([W/m ² K] dimenzióban)	68.97	-	0.026	0.00	1.79
Lapostető - fal	20.20	-	0.10	0.00	2.02
Összesen:				30.98	12.58

A vonalmenti hőveszteségek értékein jól látható, hogy – ahol tartalmaz értéket - az MSZ EN ISO 14683 szabvány jelentősen túlbecsüli az egyes csomópontok vonalmenti hőátbocsátási tényezőket. Ennek egyik oka, hogy a régebbi, 1999-ban létrehozott MSZ EN ISO 14683-as egyszerűsített hőhídkatalógusként alkalmazható szabványt 2017-ben frissítették utoljára, de sem meglévő csomóponti kialakításokhoz tartozó értékeket nem vizsgálták felül és nem bővítették a szabványt sem további csomópontokkal, sem eltérő anyagi tulajdonságokkal. Az eredményeken is jól látható, hogy a Nemzeti hőhídkatalógushoz képest csak fele annyi kialakítás volt megtalálható a szabványban. További hátránya, hogy a csomóponti kialakítások sematikusak, a szigetelés elhelyezkedést ábrázolják csak (nem lehet eltérő vastagságú fal és szigetelés vastagságokat választani).

A fentiekben említett eltérések legnagyobb mértékben a lábazati hőhíd jelenségének vizsgálata során csúcsosodik ki, ahol több, mint tizenkétszeres eltérés tapasztalható a 2 hőhídkatalógus által meghatározott vonalmenti hőátbocsátási tényező értékei között. A szabvány által meghatározott nagyobb hőveszteség egyik legnagyobb oka, hogy a minta csomópontokban nem alkalmaznak lábazati szigetelést, míg a Nemzeti hőhídkatalógus által tartalmazott pszi érték egy lábazati hőszigeteléssel rendelkező kialakítás esetén került meghatározásra.

11. táblázat: a két módszer által meghatározott teljes épületre vonatkozó hőveszteségek

Hőhídkatalógus	Felületi hőveszteség	Vonalmenti hőveszteség	Teljes hőveszteség
	[W/K]	[W/K]	[W/K]
MSZ EN ISO 14683	65.21	30.98	96.19
Nemzeti hőhídkatalógus	65.21	12.58	77.79

A Nemzeti hőhídkatalógus anyagi (szinte az összes hazai piacon megtalálható falazóelemet és szigetelést tartalmazza) és kialakítási változatosságának (eltérő rétegvastagságok, csomópontot alkotó anyagok és a szigetelések kialakítása is változik) köszönhetően több, az épületet alkotó csomópont is jó megközelítéssel megtalálható volt, a nagy adathalmaz ellenére (összesen közel 20.000 pszi értéket tartalmaz) áttekinthető, jól alkalmazható.

A felületi hőveszteségek és az egyes hőhíd típusokhoz tartozó hosszuk meghatározását követően a hőhídkatalógus alkalmazásával a vonalmenti hőveszteségek nagyon gyorsan és egyszerűen meghatározhatóak, nem igényelnem komplex szaktudást.

4.3. Stacioner vizsgálatok eredményei

A numerikus vizsgálat során a Comsol Multiphysics 5.5 szoftver segítségével stacioner (időben állandósult) állapotban meghatározható a különböző kialakítások átlagos hőáramsűrűsége, illetve a belső felület minimum hőmérséklete. A belső felület minimum hőmérsékletéből számítható a csomópont saját léptékben mért hőmérséklete az alábbi összefüggéssel:

$$f_{Rsi} = \frac{T_{s,min} - T_e}{T_i - T_e} \quad (20)$$

ahol:

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

T_e a külső levegő hőmérséklete [K]

T_i a belső levegő hőmérséklete [K]

Az átlagos hőáramsűrűség nagyságából és a belső – külső léghőmérséklet különbségéből meghatározható az egyes határoló szerkezeteken (fal, lapostető, magastető, padló), hogy egy kelvin hőmérsékletkülönbség hatására mekkora hőátbocsátási tényező alakul ki 1 m² határoló felületen.

$$U_{ekvivalens} = \frac{q_{\text{átl}}}{T_i - T_e} \quad (21)$$

ahol:

$U_{ekvivalens}$ belső oldal hőátbocsátási tényezője [W/(m²*K)]

$q_{\text{át}}$ teljes belső oldal átlagos hőáramsűrűsége [W/m²]

Az egyes csatlakozások vonalmenti hőátbocsátási tényezője (többszörös hővesztesége) az alábbi összefüggéssel számítható:

$$\Psi_k = \frac{q_{\text{át}} * z}{T_i - T_e} * l_{\text{teljes}} - \sum U_i * l_i \quad (22)$$

ahol:

z vizsgált elem szélessége (1 méter) [m]

Ψ_k „k” csatlakozási hőhíd vonalmenti hőátbocsátási tényezője [W/(m*K)]

l_{teljes} vizsgált kialakítás teljes belső oldali hossza [m]

U_i ismert határoló szerkezet hőátbocsátási tényezője [W/(m²*K)]

l_i ismert határoló szerkezet hossza [m]

12. táblázat: stacioner vizsgálatok eredményeit összefoglaló táblázat

			Hőtechnikai vizsgálat - 0% relatív nedvességtartalom	Hőtechnikai vizsgálat - 50% relatív nedvességtartalom	Kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció
Felület	Fal	$U_{ekvivalens}$	0.1680	0.1731	0.1723
		T_{min}	19.6800	19.6700	19.6740
		f_{Rsi}	0.9782	0.9775	0.9778
	Lapostető	$U_{ekvivalens}$	0.1375	0.1392	0.1390
		T_{min}	19.7990	19.7990	19.7990
		f_{Rsi}	0.9863	0.9863	0.9863
	Tető	$U_{ekvivalens}$	0.1437	0.2519	0.1773
		T_{min}	19.7570	19.5440	19.6960
		f_{Rsi}	0.9834	0.9689	0.9793
	Padló	$U_{ekvivalens}$	0.1026	0.1343	0.1379
		T_{min}	burkolat függő		
		f_{Rsi}	burkolat függő		
Vonalmenti hőhidak	Falsarok	Ψ	0.0736	0.0876	0.0869
		T_{min}	18.9070	18.9970	19.0010
		f_{Rsi}	0.9255	0.9316	0.9319
	Válaszfal	Ψ	0.0273	0.0409	0.0394
		T_{min}	19.5890	19.6270	19.6280
		f_{Rsi}	0.9720	0.9746	0.9746
	Közbenső födém	Ψ	0.0797	0.0865	0.0856
		T_{min}	19.6800	19.6700	19.6740
		f_{Rsi}	0.9782	0.9775	0.9778
	Térfal - magastető	Ψ	0.0728	0.1246	0.1083
		T_{min}	18.9480	18.6160	0.5649
		f_{Rsi}	0.9283	0.9057	0.8979
	Nyílászáró - parapettel	Ψ	0.0384	0.0439	0.0436
		T_{min}	17.4650	17.4720	17.4680
		f_{Rsi}	0.8272	0.8277	0.8274

12. táblázat: stacioner vizsgálatok eredményeit összefoglaló táblázat (folytatás)

		Hőtechnikai vizsgálat - 0% relatív nedvességtartalom	Hőtechnikai vizsgálat - 50% relatív nedvességtartalom	Kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció	
Vonalmenti	Nyílászáró - parapet nélkül	Ψ	0.0632	0.0610	0.0620
		T_{\min}	17.3950	17.3970	17.3960
		f_{Rsi}	0.8224	0.8226	0.8225
	Nyílászáró - áthidaló	Ψ	0.2035	0.2546	0.2567
		T_{\min}	17.2630	17.2750	17.2750
		f_{Rsi}	0.8134	0.8142	0.8142
	Nyílászáró - beépítés	Ψ	0.0312	0.0549	0.0536
		T_{\min}	17.4910	17.5040	17.5010
		f_{Rsi}	0.8290	0.8299	0.8297
	Lábazat	Ψ	0.0488	0.0790	0.0823
		T_{\min}	18.9820	18.7270	18.6810
		f_{Rsi}	0.9306	0.9132	0.9101
	Tetőtér	Ψ	0.0105	0.0172	0.0128
		T_{\min}	19.6190	19.4410	19.5910
		f_{Rsi}	0.9740	0.9619	0.9721
	Tűzfal	Ψ	0.0853	0.1227	0.0905
		T_{\min}	18.5910	18.4090	18.6150
		f_{Rsi}	0.9040	0.8915	0.9056
	Lapostető - emeleti ajtó	Ψ	0.0307	0.0318	0.0316
		T_{\min}	19.8020	19.7990	19.7990
		f_{Rsi}	0.9865	0.9863	0.9863
	Lapostető - emeleti fal	Ψ	0.0628	0.1437	0.0747
		T_{\min}	19.8020	19.7980	19.7980
		f_{Rsi}	0.9865	0.9862	0.9862
Lapostető - főlszíni ajtó	Ψ	0.2270	0.2544	0.2558	
	T_{\min}	17.3670	17.3800	17.3780	
	f_{Rsi}	0.8205	0.8214	0.8213	
Lapostető - főldszíni fal	Ψ	0.0380	0.0440	0.0405	
	T_{\min}	19.3800	19.3610	19.3000	
	f_{Rsi}	0.9577	0.9564	0.9523	

A három stacioner állapotú vizsgálat közül a kapcsolt hő- és nedvességtechnikai (HAM) vizsgálat tekinthető pontosabb eredményt szolgáltató módszernek. A várakozásoknak megfelelően minden esetben a száraz (0% relatív nedvességtartalommal rendelkező), csak hőtechnikán alapuló vizsgálat eredményezte a legkisebb felületi és vonalmenti hőátbocsátási eredményeket és a legmagasabb felületi minimum hőmérsékletet. A maximális értékek esetén a rétegrendek nedvességre való érzékenysége volt a legnagyobb befolyással. Ha a kialakítás érzékenyebb a nedvességre, akkor könnyen kialakulhat 50% feletti relatív nedvességtartalom is, melynek következtében a kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimulációhoz képest alábecsüli az 50% relatív nedvességtartalom mellett vizsgált hőtechnikai modell eredménye. Ha kevésbé érzékeny, az esetben viszont nagy mértékben túl is becsülheti a hőveszteségek mértékét. Összességében kijelenthető viszont, hogy az 50% relatív nedvességtartalom mellett

vizsgált hőtechnikai modell jobban megközelíti a jelenleg pontosabbnak tekinthető HAM modell eredményeit.

13. táblázat: a három különböző stacioner állapotban meghatározott teljes épületre vonatkozó hőveszteségek

Modell	Felületi hőveszteség	Vonalmenti hőveszteség	Teljes hőveszteség
	[W/K]	[W/K]	[W/K]
Hőtechnikai vizsgálat - 0% relatív nedvességtartalom	59.92	13.81	73.73
Hőtechnikai vizsgálat - 50% relatív nedvességtartalom	70.22	18.93	89.15
Kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimuláció	65.18	18.05	83.23

A korábbiakkal párhuzamban a transzmissziós hőveszteség mértékéből is jól látható, hogy a 3 módszer közül a 0 százalékos relatív nedvességtartalom mellett vizsgált hőtechnikai szimuláció közel 12 százalékkal kisebb értéket ad a kapcsolt hő- és nedvességtechnikai vizsgálatához képest, míg az 50 százalékos relatív nedvességtartalommal számított csomópont 7 százalékkal nagyobbat.

4.4. Dinamikus vizsgálatok eredményei

Dinamikus hőtechnikai modell esetén az eredmények kiértékelése azonos a stacioner állapotban ismertetett módszerrel. A különbség, hogy instacioner vizsgálat esetén 4369 (téli fűtési időszak óra egységre bontva) eltérő környezeti állapotot (külső és belső léghőmérséklet és relatív páratartalom) vizsgálunk október 15 és április 15 között, mely a téli fűtési időszaknak feleltethető meg.

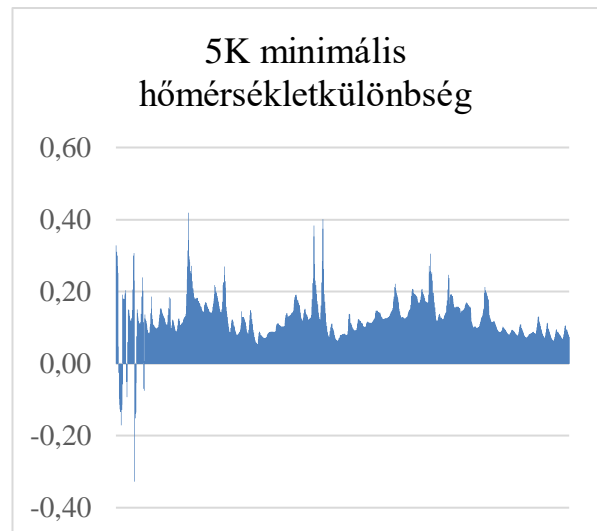
A kiértékelés előtt fontos megvizsgálni, hogy a különböző épületelemek hőátbocsátási tényezőjét (L_{2D}) a numerikus vizsgálatokból legalább mekkora mértékű hőmérsékletkülönbség esetén vegyük figyelembe. Ha kicsi a hőmérsékletkülönbség, akkor csökken a hőáramsűrűség nagysága is, de fontos, hogy ez a csökkenés nem egyenes arányossággal csökken. Ezeket a kiugrásokat ki tudjuk szűrni (minimalizálni) a helyes minimális hőmérsékletkülönbség megválasztásával.

14. táblázat: falsarok L_{2D} és értékeit összefoglaló táblázat a minimális hőmérsékletkülönbség hatására

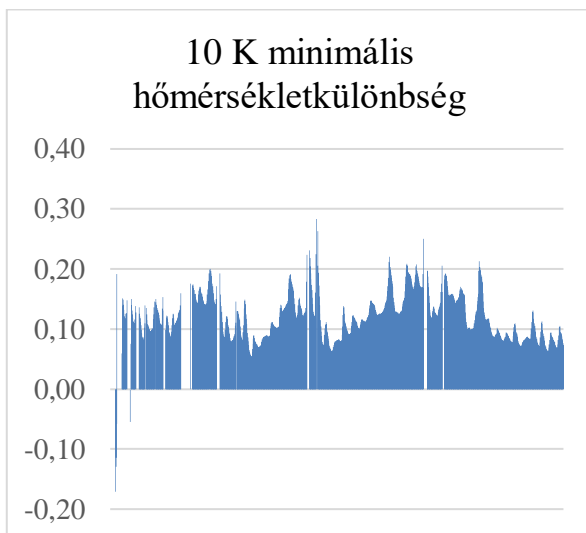
	szűrés nélkül	5K	10K	15K	20K
L_{2D}	0.2557	0.2437	0.1965	0.1879	0.1755
Ψ	0.10480	0.10248	0.10044	0.09674	0.08969



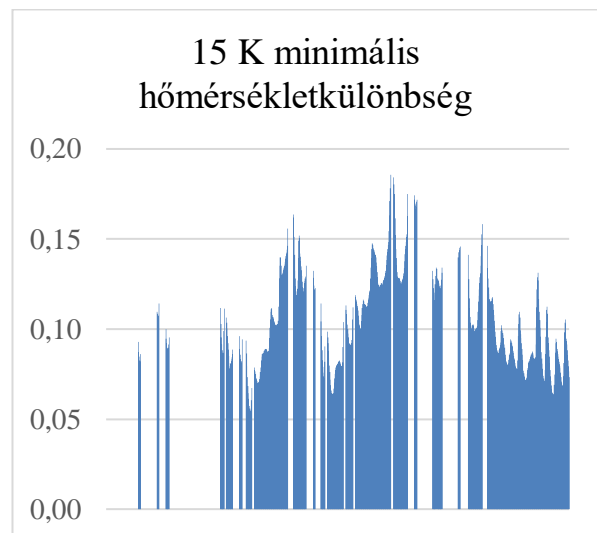
25. ábra: falsarok Ψ értéke szűrés nélkül



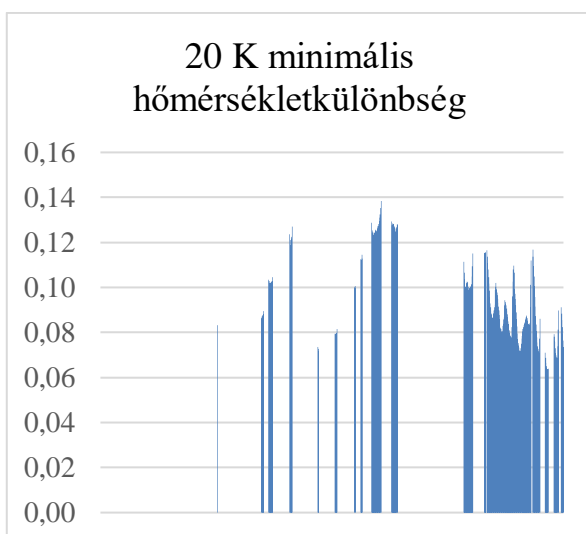
26. ábra: falsarok Ψ értéke $\Delta T_{min}=5K$



27. ábra: falsarok Ψ értéke $\Delta T_{min}=10K$



28. ábra: falsarok Ψ értéke $\Delta T_{min}=15K$



29. ábra: falsarok Ψ értéke $\Delta T=20K$

Az eredményeket megvizsgálva a számítás során figyelembe veendő legkisebb minimális hőmérsékletkülönbséget 10 Kelvinben határoztam meg. Ez esetben jelentős adatvesztés még nem tapasztalható, de a nagyméretű kiugrások már kiszűrésre kerültek.

Négy különféle vizsgálatot hajtottam végre dinamikus állapotban:

- sugárzást tartalmazó, 0 % relatív nedvességtartalom
- sugárzást tartalmazó, 50 % relatív nedvességtartalom
- sugárzást nem tartalmazó, 0 % relatív nedvességtartalom
- sugárzást nem tartalmazó, 50 % relatív nedvességtartalom

15. táblázat: dinamikus vizsgálatok eredményeit összefoglaló táblázat

		Sugárzást tartalmazó vizsgálat		Sugárzás nem tartalmazó vizsgálat		
		0% relatív nedvességtartalom	50% relatív nedvességtartalom	0% relatív nedvességtartalom	50% relatív nedvességtartalom	
Felület	Fal	$U_{ekvivalens}$	0.1592	0.1646	0.1576	0.1631
		T_{min}	19.4300	19.4130	19.4580	19.4420
		f_{Rsi}	0.9727	0.9750	0.9776	0.9776
	Lapostető	$U_{ekvivalens}$	0.1519	0.1640	0.1376	0.1500
		T_{min}	19.6250	19.6170	19.6640	0.9863
		f_{Rsi}	0.9851	0.9849	0.9861	0.0000
	Tető	$U_{ekvivalens}$	0.1194	0.2614	0.1194	0.2614
		T_{min}	19.6690	19.1170	19.6690	19.1170
		f_{Rsi}	0.9864	0.9694	0.9864	0.0000
	Padló	$U_{ekvivalens}$	0.0653	0.0600	0.0557	0.0653
		T_{min}	burkolat függő			
		f_{Rsi}	burkolat függő			
Vonalmenti hőhidak	Falsarok	Ψ	0.0704	0.1004	0.0532	0.0827
		T_{min}	18.0270	18.2300	18.1640	18.3160
		f_{Rsi}	0.8782	0.9011	0.8974	0.9194
	Válaszfal	Ψ	0.0630	0.0952	0.0586	0.193700
		T_{min}	19.2710	19.3380	19.3070	19.3700
		f_{Rsi}	0.9593	0.9683	0.9710	0.9742
	Közbenső födém	Ψ	0.1664	0.1967	0.1675	0.1982
		T_{min}	19.2320	19.2350	19.2680	19.2730
		f_{Rsi}	0.0000	0.9674	0.9692	0.9697
	Térdfal - magastető	Ψ	0.0458	0.0638	0.0471	0.0683
		T_{min}	18.1430	17.5060	18.1440	17.5080
		f_{Rsi}	0.8854	0.8807	0.8854	0.8808
	Nyílászáró - parapettel	Ψ	0.0340	0.0387	0.0145	0.0193
		T_{min}	14.6370	14.6480	15.0360	15.0440
		f_{Rsi}	0.8200	0.8204	0.8334	0.8337
	Nyílászáró - parapet nélkül	Ψ	0.0487	0.1212	0.0568	0.0386
		T_{min}	14.4390	14.4580	14.9070	14.9290
		f_{Rsi}	0.8206	0.8212	0.8297	0.8304

15. táblázat: dinamikus vizsgálatok eredményeit összefoglaló táblázat (folytatás)

			Sugárzást tartalmazó vizsgálat		Sugárzás nem tartalmazó vizsgálat	
			0% relatív nedvességtartalom	50% relatív nedvességtartalom	0% relatív nedvességtartalom	50% relatív nedvességtartalom
Vonalmenti	Nyílászáró - áthidaló	$U_{ekvivalens}$	0.2656	0.3344	0.2475	0.3157
		T_{min}	14.1310	14.1590	14.5780	14.6060
		f_{Rsi}	0.8031	0.8040	0.8181	0.8190
	Lapostető - emeleti fal	$U_{ekvivalens}$	0.0588	0.0651	0.0542	0.0604
		T_{min}	19.6310	19.6220	19.6690	19.6620
		f_{Rsi}	0.9854	0.9851	0.9864	0.9865
	Lapostető - fölszíni ajtó	$U_{ekvivalens}$	0.1967	0.2183	0.1683	0.1891
		T_{min}	14.3670	14.3890	14.8120	14.8370
		f_{Rsi}	0.8110	0.8117	0.8259	0.8267
	Lapostető - földszinti fal	$U_{ekvivalens}$	0.0834	0.0905	0.0777	0.0848
		T_{min}	18.6980	18.7470	18.7910	18.8360
		f_{Rsi}	0.9453	0.9486	0.9492	0.8267
	Nyílászáró - beépítés	$U_{ekvivalens}$	0.0249	0.0486	0.0051	0.0281
		T_{min}	14.6870	14.7040	15.0890	15.0440
		f_{Rsi}	0.8217	0.8223	0.8352	0.8337
	Lábazat	$U_{ekvivalens}$	0.0140	0.0954	0.0279	0.0424
		T_{min}	18.9040	18.7310	19.0160	18.8590
		f_{Rsi}	0.9493	0.9410	0.9200	0.9008
	Tetőtér	$U_{ekvivalens}$	0.0374	0.0283	0.0374	0.0283
		T_{min}	18.9830	18.9830	19.2710	18.9830
		f_{Rsi}	0.9520	0.9571	0.9520	0.9571
Tűzfal	$U_{ekvivalens}$	0.0721	0.1582	0.0982	0.0710	
	T_{min}	17.5590	17.2770	17.6670	17.3770	
	f_{Rsi}	0.8979	0.8861	0.8560	0.8983	
Lapostető - emeleti ajtó	$U_{ekvivalens}$	0.1611	0.1909	0.1418	0.1715	
	T_{min}	19.6310	19.6220	19.6690	19.6620	
	f_{Rsi}	0.9854	0.9851	0.9864	0.9865	

A dinamikus vizsgálati módszer igényli a legkomplexebb tudást, illetve ennek a számítási módszerhez szükséges a legnagyobb időtartam az összes bemutatott vizsgálati mód közül. A számítási módszer sajátossága, hogy nagy számítógépes erőforrást követel meg, mely kapcsolt hő- és nedvességttechnikai szimuláció esetén hatványozottan igaz.

A négy vizsgálati módszer közül a legnagyobb hőveszteség a sugárzást tartalmazó 50 százalékos relatív nedvességtartalommal rendelkező modell esetén adódott, míg a legkisebb a sugárzás nélküli, száraz vizsgálat esetén. A két modell egymástól való eltérése összesen közel 30 százalék, mely eltérésnek hozzávetőlegesen 42 százaléka a hőhidaknál jelentkezik.

16. táblázat: a négy különböző dinamikus állapotban meghatározott teljes épületre vonatkozó hőveszteségek

Modell	Felületi hőveszteség	Vonalmenti hőveszteség	Teljes hőveszteség
	[W/K]	[W/K]	[W/K]
sugárzást tartalmazó, 0% relatív nedvességtartalom	55.01	16.41	71.42
sugárzást tartalmazó, 50% relatív nedvességtartalom	65.58	23.99	89.57
sugárzást nem tartalmazó, 0% relatív nedvességtartalom	53.74	15.21	68.95
sugárzást nem tartalmazó, 50% relatív nedvességtartalom	65.30	19.64	84.94

5. Eredmények értékelése

5.1. Módszerek közötti eltérés

A felületi hőveszteségek tekintetében megközelítőleg +/- 10 százalékon belül mozog az összes módszer által meghatározott érték, jelentősebb eltérések a vonalmenti hőveszteségek vizsgálata során tapasztalhatóak.

A vonalmenti hőveszteségeket a legkisebb mértékben az egyszerűsített eljárás során vettük figyelembe, majdnem 50 százalékkal alulmaradt a többi módszer átlagához képest. Ennek oka, hogy a korrekciós értéket csak a hőhidak fajlagos mennyisége alapján szükséges meghatározni, a típusát nem tudjuk figyelembe venni.

A várakozásoknak megfelelően jól látható, hogy az a legkimagaslóbb érték az MSZ EN ISO 14683:2017 szabvány használata során adódott, közel 90 százalékkal meghaladta a többi módszer vonalmenti hőveszteségének átlagát. Ennek oka a korábban említett elavultság, és kevésbé részletgazdagság.

A Nemzeti hőhidkatalógus használatával csak 24 százalékkal határoztunk meg kisebb vonalmenti hőveszteséget az összes módszer átlagához képest, de használata lényegesen egyszerűbb és gyorsabb az összes többi bemutatott módszerhez képest.

A vizsgálatokból jól látható, hogy a sugárzás figyelembevételének hatása átlagosan 5 százalékkal növeli a végeredményt, mely többlet hőveszteség főként a vonalmenti hőhidaknál jelentkezik. A csomópontban jelen lévő 50 százalékos nedvességtartalom hatására körülbelül 20 százalékkal romlik a kialakítás teljesítőképessége. Megállapítható tehát, hogy a

nedvességtartalom figyelembevétele mellett a napsugárzás hatása sem elhanyagolható részletes vizsgálat esetén. Az eredményeket az alábbi áttekintő táblázat tartalmazza.

17. táblázat: az összes vizsgálati módszer transzmissziós hőveszteségeit áttekintő táblázat

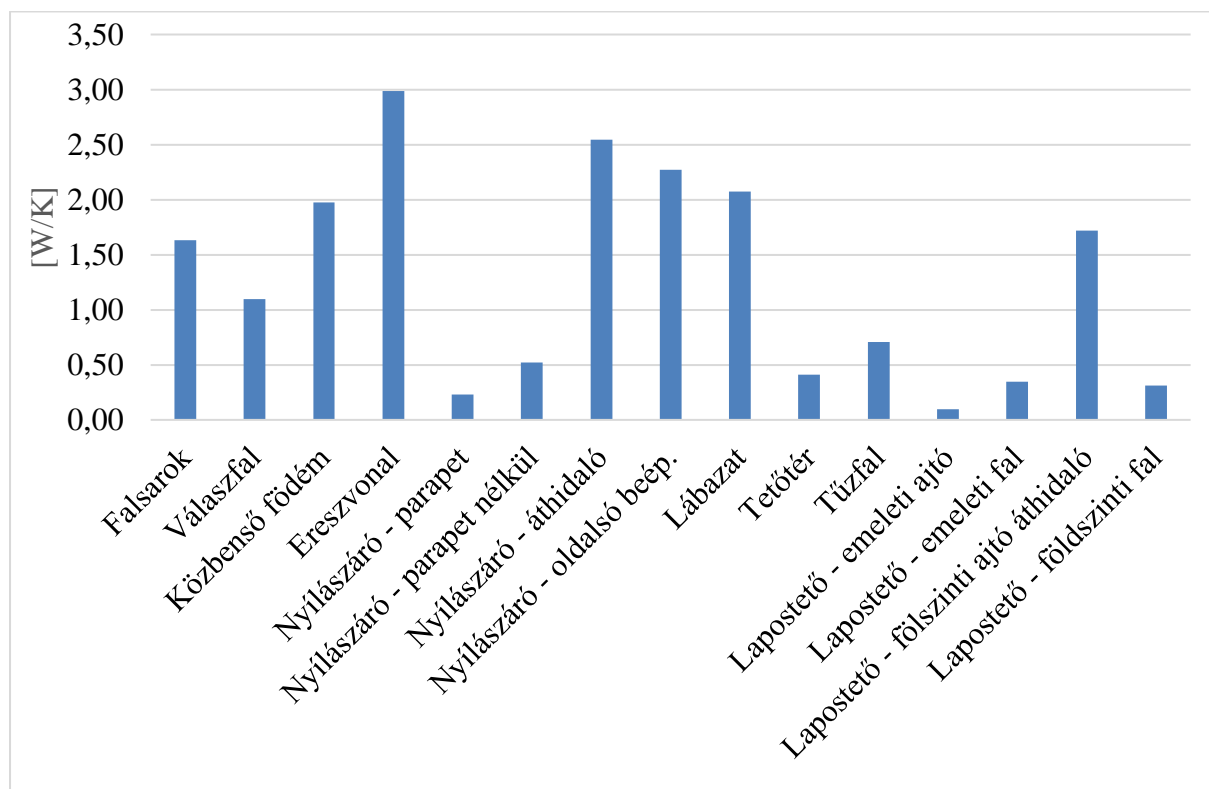
Modell	Felületi hőveszteség	Vonalmenti hőveszteség	Teljes hőveszteség
	[W/K]	[W/K]	[W/K]
Egyszerűsített eljárás	65.21	8.97	74.18
MSZ EN ISO 14683	65.21	30.98	96.19
Nemzeti hőhidkatalógus	65.21	12.58	77.79
Hőtechnikai vizsgálat - 0% relatív nedvességtartalom	59.92	13.81	73.73
Hőtechnikai vizsgálat - 50% relatív nedvességtartalom	70.22	18.93	89.15
Kapcsolt hő- és nedvességttechnikai szimuláció	65.18	18.05	83.23
sugárzást tartalmazó, 0% relatív nedvességtartalom	55.01	16.41	71.42
sugárzást tartalmazó, 50% relatív nedvességtartalom	65.58	23.99	89.57
sugárzást nem tartalmazó, 0% relatív nedvességtartalom	53.74	15.21	68.95
sugárzást nem tartalmazó, 50% relatív nedvességtartalom	65.30	19.64	84.94

5.2. Egyes csomópontok hőveszteségeinek összehasonlítása

Az alábbiakban összehasonlítom a dinamikus, sugárzási hatást és 50 százalékos relatív nedvességtartalommal vizsgált hőtechnikai szimuláció egyes csomópontjainak a teljes hőveszteségre gyakorolt hatását. A kiszámított pszi tényezők a hozzájuk tartozó hosszúsággal megszorozva lettek figyelembevéve, W/K dimenzióban.

Az 30. ábrán jól látható, hogy a stacioner állapotban 50 százalékos relatív nedvességtartalommal vizsgált modell vonalmenti hőveszteségére legnagyobb hatással az eresz – térdfal kialakítás volt, de jelentős veszteség volt meghatározható a közbenső födém, nyílászáró beépítés és áthidaló, lábazat és a lapostető – földszinti ajtó áthidalók esetén. Az említett hőhidak vagy jelentős hosszúsággal, vagy számottevő pszi értékkel rendelkeznek. A tűzfal, tetőtér ferde és vízszintes sík váltása, lapostető emeleti fal, lapostető földszinti fal,

lapostető emeleti ajtó, nyílászáró parapet nélkül és parapettel kialakítások hatására jelentős vonalmenti hőveszteség nem következett be.



30. ábra: vonalmenti hőveszteségek megoszlása stationer, 50% RH vizsgálat esetén W/K dimenzióban

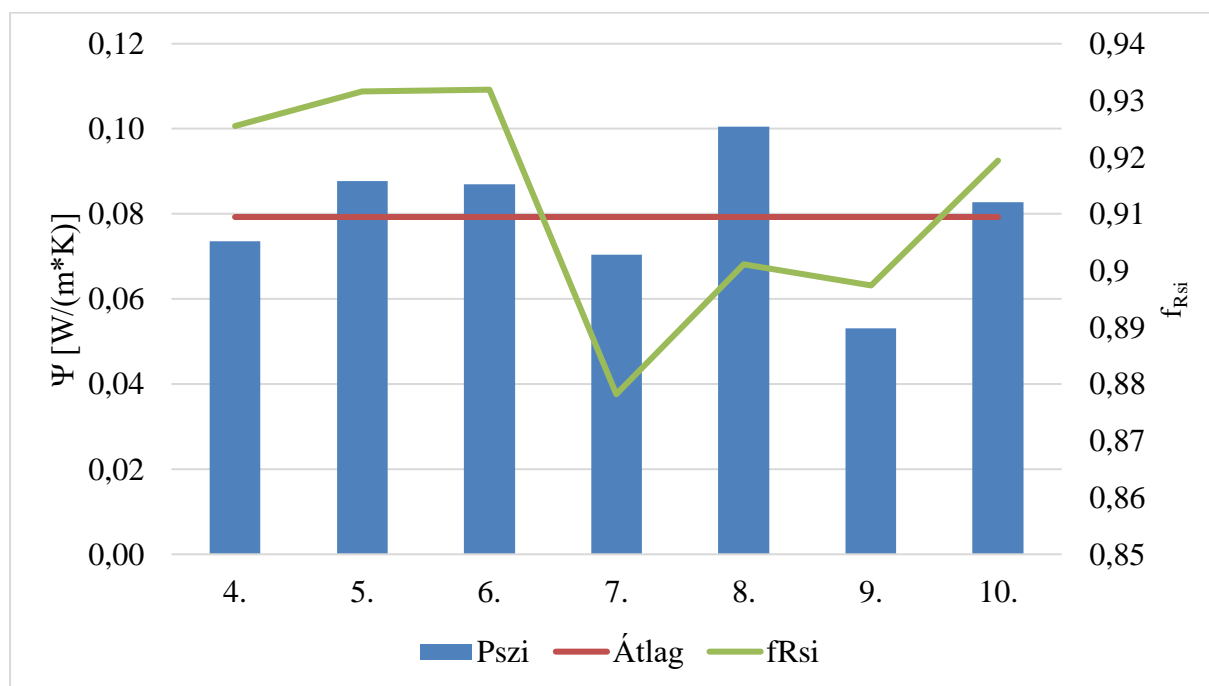
5.3. Numerikus vizsgálatok közötti eltérés

Az alábbiakban bemutatásra kerül a falsarok kialakítás numerikus modellekkel meghatározott kapcsolt hő és páratechnikai tulajdonságai. Emlékeztetőül az MSZ EN ISO 14683 szabvány alapján 0,015, míg a Nemzeti hőhídkatalógus alapján 0,05 W/(m*K) vonalmenti hőátbocsátási tényező feltételezhető.

A numerikus vizsgálatok eredményei a 31. ábrán jól láthatóak, a 7 vizsgálati modell átlagos pszi értéke 0,07928 W/(m*K), melyet a vízszintes vonal szimbolizál. Jól látható, hogy legkisebb és legnagyobb eredményt szolgáltatató 2 modell közti eltérés, majdnem 50 százalék (+/-30% az átlagtól)! A további értékek +/- 10 százalékon belül találhatóak az átlaghoz képest. Fontos kiemelni, hogy itt viszonyított helyzetekről beszélhetünk, nem tudjuk meghatározni, hogy a vizsgálati módszerek közül a dinamikus, de nedvességáramlást nem tartalmazó, vagy a stationer állapotú, de nedvességáramlást is tartalmazó modell közelíti-e jobban a valóságot.

A saját léptékben mért hőmérséklet megbízható eredményt nyújt, az összes csomópont esetén +/- 3 % belül találhatóak az értékek, melyet felhasználva magabiztosan kijelenthető, hogy egy

szerkezeti kialakítás felületén páralecsapódás és penészedés bekövetkezhet-e. (minimális követelmény, hogy az $f_{Rsi} > 0,8$ esetén állagvédelmi szempontból biztonságosnak tekinthető).



31. ábra: A fal - sarok csomópont esetén az egyes numerikus modellekkel meghatározott vonalmenti hőveszteségek értékei, a vízszintes vonal a módszerek átlagát mutatja.

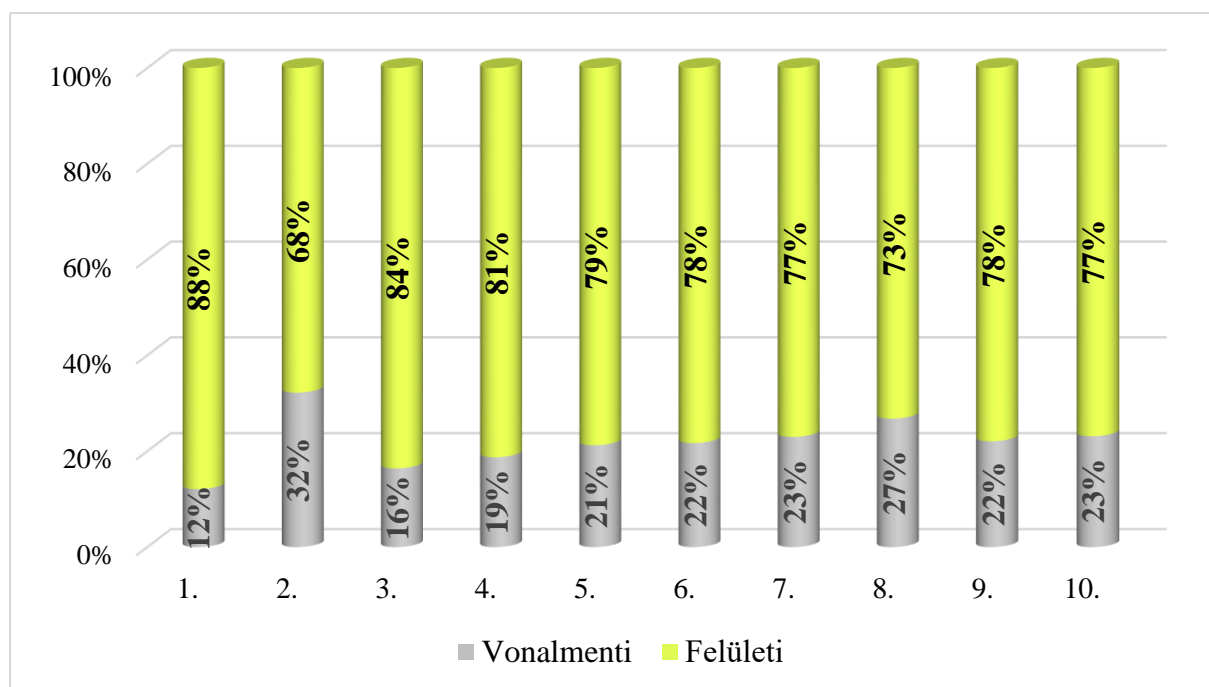
Balról jobbra haladva:

4) stacioner, 0 % RH 5) stacioner, 50 % RH 6) kapcsolt hő- és nedvességtechnikai 7) dinamikus, sugárzással, 0% RH 8) dinamikus, sugárzással, 50% RH 9) dinamikus, sugárzás nélkül, 0% RH 10) dinamikus, sugárzás nélkül, 50% RH

5.4. Hőveszteségek részarányának összehasonlítása

A vizsgált teljes épület hőveszteségének hozzávetőlegesen a 22 százaléka történik hőhidakon keresztül, mely alapján a bevezetésben ismertetett Csanaky Judittól Emiliától származó állítás változni látszik. Tanulmánya 2012-ben készült, mely óta szigorodtak az energetikai követelmények, illetve a szakemberek széles köre is felismerte a vonalmenti hőveszteségek hatását, így tudatosabb csomóponti kialakítások jelentek meg a magyar piacon is.

Természetesen a magyar meglévő épületállományra nem jelen tanulmányban ismertetett kialakítások jellemzőek, így összességében továbbra is az épületeink hőveszteségének hozzávetőleges 30-40 százaléka különböző vonalmenti hőhidakon keresztül történik. Az elkövetkezendő évtizedben ez az arány 20-30 százalékig is lecsökkenhet, ahogyan a régi építésű épületek helyén újjépítésűek jelennek meg.



32. ábra: a hőveszteségek részarányának alakulása az egyes vizsgálati módszerek esetén
Balról jobbra haladva:

1) egyszerűsített eljárás 2) MSZ EN ISO 14683 3) Nemzeti hőhídkatalógus 4) stacioner, 0 % RH 5) stacioner, 50 % RH 6) kapcsolt hő- és nedvességtechnikai 7) dinamikus, sugárzással, 0% RH 8) dinamikus, sugárzással, 50% RH 9) dinamikus, sugárzás nélkül, 0% RH 10) dinamikus, sugárzás nélkül, 50% RH

6. Konklúzió

Kutatásom célja az épületek hőhídhátását vizsgáló módszerek összehasonlítása volt egy – a magyar piacon - tipikusnak tekinthető lakóépület példáján. Összevettem a 7/2006 TNM rendelet szerinti egyszerűsített módszert; az MSZ EN ISO 14683:2017 szabvány szerinti egyszerűsített hőhídkatalógus; a részletes Nemzeti hőhídkatalógus eredményeit; továbbá részletes, kétdimenziós hőtechnikai, illetve kapcsolt hő- és nedvességtranszport szimulációk által meghatározott hőveszteséget stacioner és dinamikus állapotban is.

Elsősorban fontos kiemelni, hogy az összes numerikus modell alapján a csomóponti kialakítások saját léptékben mért értéke minden esetben meghaladja a 0,800 értéket, melyet követően kijelenthető, hogy általános felhasználói feltételek mellett biztonságosnak tekinthetőek.

Az egyszerűsített számítás a felületi hőveszteségeket kielégítő pontossággal határozza meg a többi vizsgálati módszer átlagához képest, de a vonalmenti hőveszteség mértékét alábecsüli. Alkalmazása csak abban az esetben javasolt, ha elegendő nagyságrendileg meghatározni az épület hőveszteségeit.

Az MSZ EN ISO 14683:2017 szabvány alkalmazása nem ajánlott semmilyen helyzetben sem, nem nyújt megfelelő alternatív megoldást. Elavultsága, változatosságának hiánya miatt ennek a szabványnak a frissítése javasolt.

A vizsgált épület esetén kitűnő alternatívát nyújtott a Nemzeti hőhídkatalógus, mely mind könnyű áttekinthetősége, mind egyszerű használatával, mind rövid időigényével (ennek ellenére nagyságrendileg a vizsgálati módszerek átlagát megközelíti) kiemelkedik a többi módszer közül. A Nemzeti hőhídkatalógus további előnye, hogy egyszerűbben bővíthető, sűrűbben felülvizsgálható, mint az MSZ EN ISO 14683 szabvány. A hőhídkatalógusban minden kialakítás nem található meg, így abban az esetben az adott vonalmenti többlet hőveszteséget a számítás során nem lehetséges figyelembe venni. Továbbá a hőhídkatalógus csak típusmegoldásokat esetén alkalmazható, ettől való eltérés esetén 2D stacioner numerikus vizsgálat szükséges.

A 2D stacioner vizsgálati modell kitűnően alkalmazható összetettebb rétegrendek és számos hőhídjelenség vizsgálatára, kevésbé időigényes, mint a dinamikus verzió, de nem igényel sokkal több időt, mint a korábban bemutatott egyszerűsített számítási eljárás.

A dinamikus hőtechnikai vizsgálat hosszabb futási ideje miatt jelenleg csak kutatási célra javasolt alkalmazni, de a számítógépek fejlődésével idővel az általános tanúsítási feladatra is alkalmazhatóvá válhat.

7. További kutatási lehetőség

További kutatási lehetőség lehet a valósághoz közelebbi, kapcsolt hő- és nedvességtechnikai dinamikus szimulációkkal is megvizsgálni az épületet alkotó csomópontokat. Ez a vizsgálati mód jelentős számítógépes erőforrást követel meg, illetve hosszú időtartamú, de hosszútávú kutatási témaként mindenképpen érdemes vele foglalkozni.

Az eredmények további pontosításának lehetősége, hogy 3D vizsgálatokat is végezzünk, ahol releváns, mivel jelen tanulmány 2D keretein belül számos hőhidat nem volt lehetőség pontosan modellezni (pl.: falsarok-lábazat kialakítás) vagy csak súlyozott átlagot volt lehetőség alkalmazni (térdfal – magastető csatlakozás). 3D vizsgálat esetén a számítás során a különböző pontszerű hőveszteségek meghatározására is van lehetőség.

További kutatási lehetőség egy másik épület esetén a vizsgált 10 módszerrel elvégezni a számításokat, az átfogóbb kép elérése érdekében.

8. 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.

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

9. Irodalomjegyzék

- [1] Csanaky Judit Emília: Épületszerkezetek energiatudatos fejlesztése az építészeti és épületfizikai tervezés határfelületén [doktori értekezés, SZIE Építészeti és Épületszerkezet-tani Tanszék, Győr, (2012)]
- [2] Zöld András: Az épületfizika alapjai [Műegyetemi Kiadó (1998)]
- [3] Nagy Balázs: Többdimenziós hőáramlás modellezés összehasonlító eredménye [szakmérnöki szakdolgozat, BME Épületenergetikai és épületgépészeti tanszék, Budapest, (2013)]
- [4] Nagy Balázs - Pontszerű és vonalmenti hőhidak I.: A hőhidak, meghatározásuk módszerei és hatásuk az épületek energiaveszteségeire [MEGTÉRÜLŐ ÉPÜLETENERGETIKA I. évf : 5 pp. 44-48., 5 p. (2014)]
- [5] 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)]
- [6] Hua Ge, Fuad Baba: Effect of dynamic modeling of thermal bridges on the energy performance of residential buildings with high thermal mass for cold climates [Sustainable Cities and Society, October 2017, Volume 34, Pages 250-263 (2017)]
- [7] Kalle Kuusk, Jarek Kurnitski, Targo Kalamees: Calculation and compliance procedures of thermal bridges in energy calculations in various European countries [Energy Procedia, October 2017, Volume 132, Pages 27-32 (2017)]
- [8] Julye Ramalho de Freitas, Eduardo Grala da Cunha: Thermal bridges modeling in South Brazil climate: Three different approaches [Energy and Buildings, June 2018, Volume 169, Pages 271-282 (2018)]
- [9] John Straube – Moisture and Materials [Building science digest 138, 1-7. oldal, (2006)]

- [10] Nagy Balázs, Szagri Dóra, Dr. Tóth Elek - Dinamikus hő- és nedvességtranszport szimulációk alapjai [MEGTÉRÜLŐ ÉPÜLETENERGETIKA IV. évf. 1 pp. 33-39., 7 p. (2017)]
- [11] Künzel H. M. – Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and two-dimensional calculation using simple parameters (1995)
- [12] 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)]
- [13] D. Zirkelbach, H. M. Künzel, B. Schafaczek, R. Borsch-Laaks - Dampfkongvektion wird berechenbar - Instationäres Modell zur Berücksichtigung von konvektivem Feuchteintrag bei der Simulation von Leichtbaukonstruktionen
- [14] Andreas Holm, H. M. Künzel: Non-Isothermal Moisture Transfer in Porous Building Materials [MATERIALS WEEK, München, Németország (2000)]
- [15] MSZ EN ISO 10211: Hőhidak az épületszerkezetekben. Hőáramok és felületi hőmérsékletek. Részletes számítások
- [16] 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról
- [17] Nagy Balázs: Talajjal érintkező szerkezetek épületfizikája: Részletes számítások és dinamikus szimulációk [MEGTÉRÜLŐ ÉPÜLETENERGETIKA III. évf : 3 pp. 39-44. , 6 p. (2016)]
- [18] MSZ EN ISO 13370: Épületek hőtechnikai viselkedése. Hőátvitel a talajban. Számítási módszerek
- [19] Csoknyai Tamás: Az épületek energetikai jellemzői meghatározásának módszertana a 7/2006. V. 24. TNM rendeletben található számítási módszer felülvizsgálata, 2020.06.30.
- [20] Nagy Balázs: Nemzeti Hőhidkatalógus, 2020
- [21] MSZ EN ISO 6946: Épületszerkezetek és épületelemek. Hővezetési ellenállás és hőátbocsátás. Számítási módszerek
- [22] Nagy Balázs: Hygrothermal Behavior of Modern Masonry Building Constructions [Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Vásárhelyi Pál Építőmérnöki és Földtudományi Doktori Iskola, Stocker György Disszertáció benyújtásának éve: 2019, Védés éve: 2019 Megjelenés/Fokozatszerzés éve: 2019]
- [23] MSZ EN ISO 10456: Építési anyagok és termékek. Hő- és nedvességtechnikai tulajdonságok. Táblázatos tervezési értékek, illetve eljárások a közölt és tervezési hőtechnikai értékek meghatározására
- [24] WUFI PRO 6.0 szoftver anyagadatbázisa, 2018
- [25] EN 15026:2007 Épületszerkezetek és épületelemek hő- és nedvességtechnikai viselkedése. A nedvességvándorlás becslése numerikus szimulációval