

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR
ÉPÍTŐANYAGOK ÉS MAGASÉPÍTÉS TANSZÉK

Acélszálerősítésű ipari padlók laborvizsgálatokkal támogatott dinamikus hő- és páratechnikai modellezése

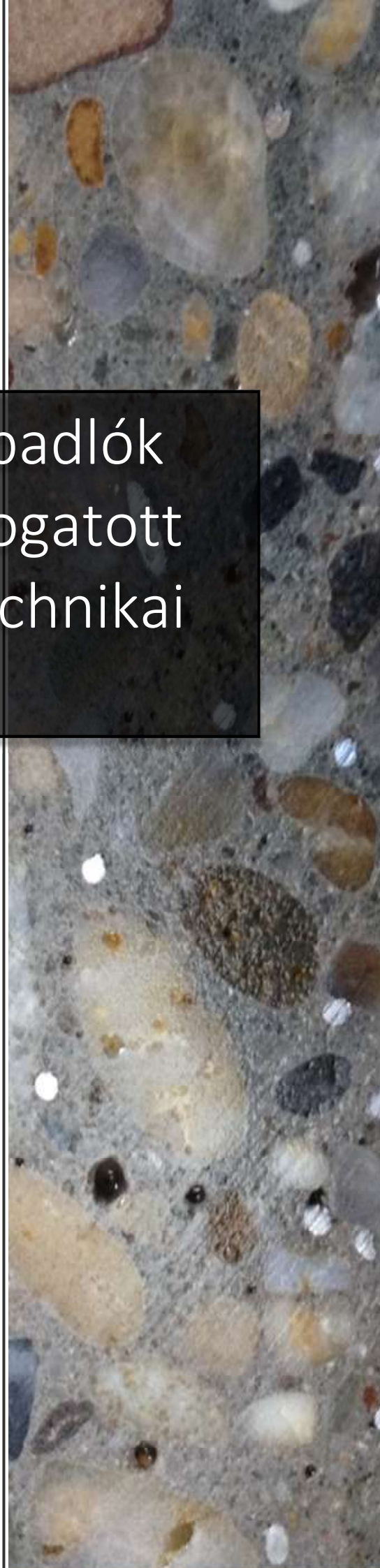
TDK dolgozat

Szagri Dóra

Konzulens:

Nagy Balázs, doktorandusz

Budapest, 2015. 10. 30.



Tartalomjegyzék

Ábrajegyzék	2
Táblázatjegyzék	3
Jelölések jegyzéke	4
1. Absztrakt.....	6
2. Summary	7
3. Bevezetés.....	8
3.1 A kutatás előzménye.....	8
3.2 Szakirodalmi áttekintés.....	9
4. Laboratóriumi vizsgálatok	15
4.1 Felhasznált beton próbatestek jellemzői.....	15
4.1.1 Betonreceptúrák.....	15
4.1.2 Próbatestek tulajdonságai.....	15
4.2 Hővezetési tényező mérése	16
4.3 Fajlagos hőkapacitás vizsgálata	18
4.4 Páradiffúziós képesség vizsgálata	20
4.5 Szorpciós és deszorpciós képesség meghatározása	23
4.6 Vízfelvétel részleges bemenéssel	24
4.7 Nedvességtranszport tényező számítása.....	26
5. Szimuláció.....	29
5.1 Számítógépes modellezés folyamata.....	29
5.2 Hő- és páratechnikai szimuláció elméleti háttere	30
5.3 Vizsgált csomópont bemutatása.....	33
5.4 1D szimuláció	34
5.5 2D szimuláció	37
5.5.1 Szimulációs eljárás validálása	40
5.5.2 Vizsgált változatok	45
5.5.3 Bemeneti adatok	46
5.5.4 Peremfeltételek.....	49
6. Kétdimenziós szimulációk eredményei	52
6.1 Eredmények összefoglalása	61
6.2 További vizsgálati lehetőségek	62
Köszönetnyilvánítás.....	62
7. Irodalomjegyzék	63
8. Mellékletek.....	65

Ábrajegyzék

1. ábra: betonminták elhelyezése nyugati tájolású homlokzaton, illetve az NMR-szkenner, mellyel a nedvességprofilok meghatározásra kerültek (Künzel, Holm, Krus, 2008)	11
2. ábra: bal oldal: mért és számított nedvességprofilok, jobb oldal: mért és számított nedvességtartalom a próbatestben (Künzel, Holm, Krus, 2008)	11
3. ábra: hővezetési tényező és nedvességtartalom közti összefüggés (Jespersen alapján)	12
4. ábra: Kőzetgyapot hővezetési tényezője hőmérséklet és nedvességtartalom függvényében (Ochs és Müller- Steinhagen alapján).....	13
5. ábra: hővezetési tényező mérése, Taurus TLP 300 DT(X)	16
6. ábra: próbatest kizsaluzása (2014), alkalmazott HUMIX 50 acélszál.....	16
7. ábra: hővezetési tényező mérésének folyamata	17
8. ábra: fajlagos hőkapacitás meghatározása	19
9. ábra: fajlagos hőkapacitás meghatározásának lépései	19
10. ábra: páradiffúziós képesség vizsgálata	21
11. ábra: vizsgált betonminták nedvességtartalom függvényei.....	24
12. ábra: vízfelszívás mérése és elve.....	25
13. ábra: vízfelszívás mérésének eredményei.....	26
14. ábra: Dws nedvességtranszport tényező	27
15. ábra: Dww diagram, a nedvességtranszport tényező erősen függ a nedvességtartalomtól.....	28
16. ábra: modellezés folyamatábrája.....	29
17. ábra: számítási modell folyamatábrája	32
18. ábra: vizsgált lábazati és padlócsomópont	33
19. ábra: lábazati fal 1D szimulációja – rétegrend	34
20. ábra: lábazati fal 1D szimulációja – belső hőmérséklet és relatív páratartalom	35
21. ábra: padló 1D szimulációja - padló rétegrend	35
22. ábra: MSZ-04-140-2:1991 - hőszigetelés alkalmazása padló szerkezetek esetén.....	36
23. ábra: Blomberg 1996, padló modellezése VDM.....	37
24. ábra: Rees kísérlete, talajjal érintkező padló szerkezetek szimulációja és a mért eredmények összehasonlítása (Nagy Balázs 2014)	38
25. ábra: Talajban lévő hőmérsékletek fűtési idény alatt (Nagy Balázs 2013)	38
26. ábra: tranziens szimulációs futtatása Heat 3-ban (Nagy Balázs 2014)	39
27. ábra: Mért (fekete) és számított (türkiz) relatív páratartalom illetve mért (sötétkék) és számított (sárga) hőmérsékleti adatok összehasonlítása a fal külső részében	41
28. ábra: Mért (fekete) és számított (türkiz) relatív páratartalom illetve mért (sötétkék) és számított (sárga) hőmérsékleti adatok összehasonlítása a fal közbenső részében	42
29. ábra: Mért (fekete) és számított (türkiz) relatív páratartalom illetve mért (sötétkék) és számított (sárga) hőmérsékleti adatok összehasonlítása a fal külső részében.	42
30. ábra: Mért (fekete) és számított (türkiz) relatív páratartalom illetve mért (sötétkék) és számított (sárga) hőmérsékleti adatok összehasonlítása a beépített rétegben, a párazáró fólia mögött	42
31. ábra: Rétegtelt lemez nedvességtartalma, WUFI 1D és mért adatok összehasonlítása	43
32. ábra: Szarufában lévő nedvességtartalom, a mért eredmények és a WUFI 2D szimuláció összehasonlítása	44
33. ábra: szimulációs modellek változatai.....	45
34. ábra: 2 dimenziós modell geometriai kialakítása	46
35. ábra: modell hálógenerálása.....	47
36. ábra: ipari padló anyagtulajdonságainak megadása	47

37. ábra: ipari padló anyagtulajdonságainak megadása - nedvességtranszport tényező	48
38. ábra: határoló részek peremfeltételeinek megadása	49
39. ábra: Bécs klímaadatai	50
40. ábra: belső hőmérséklet és nedvességterhelés	51
41. ábra: Talaj és külső hőmérséklet alakulása	51
42. ábra: talaj hőmérséklete különböző mélységben	51
43. ábra: lábazati falak hőveszteségei.....	52
44. ábra: padló hőveszteségei	53
45. ábra: SZD1-SZD6 modellek eredményei.....	54
46. ábra: SZD7-SZD18 modellek eredményei.....	54
47. ábra: SZD1-7-13-19-25 modellek eredményei.....	55
48. ábra: SZD1 modell hőveszteségei	56
49. ábra: Hőmérsékleti eloszlás az SZD1 modell esetén	56
50. ábra: SZD10 modell hőveszteségei	57
51. ábra: SZD10 hőmérsékleti adatok	57
52. ábra: Padlón mért hőáramok.....	58
53. ábra: Fűtési időny eltolódása	58

Táblázatjegyzék

1. táblázat: betonreceptúra (Künzel, Holm, Krus 2008).....	10
2. táblázat: Hővezetési tényezők értéke különböző acélszál típusok esetén (Morel, 1970):	14
3. táblázat: Szálerezősített betonok hővezetési tényezője (Szagri, 2014)	14
4. táblázat: egyszerűsített betonreceptúrák.....	15
5. táblázat: próbatestek szilárdsági jellemzője, konzisztencia osztálya.....	15
6. táblázat: mért és számított hővezetési tényezők értékei.....	18
7. táblázat: páradiffúziós képesség vizsgálatának eredményei.....	22
8. táblázat: próbatestek víztartalma a relatív nedvességtartalom függvényében [m^3/m^3].....	23
9. táblázat: látszólagos porozitás értékei.....	23
10. táblázat: vízfelszívás együttható, szabadvíz tartalom eredmények	27
11. táblázat: Dws és Dww nedvességtranszport tényező közötti összefüggés	28
12. táblázat: szimulációs modellek hőátbocsátási tényezői.....	36
13. táblázat: vonalmenti hőátbocsátási tényezők (Nagy Balázs 2015).....	40
14. táblázat: Hőveszteségek összegzése I.	59
15. táblázat: Hőveszteségek összegzése II.	59
16. táblázat: Hőveszteségek összegzése III.	59

Jelölések jegyzéke

Jelölés	Megnevezés	Mértékegység
λ_2	hővezetési tényező, tervezett	W/mK
λ_1	szabványos, deklarált hővezetési tényező	W/mK
f_T	hőmérséklet konverziós együttható	1
T_1	deklarált hőmérséklet	°C
T_2	tényleges hőmérséklet	°C
c_p	a próbatest fajlagos hőkapacitása	J/kgK
c_v	a termosz fajlagos hőkapacitása	J/kgK
m_v	termosz tömege	kg
m	próbatest tömege	kg
T	a próbatest keverés előtti hőmérséklete	K
T_k	a keverés után beállt közöt hőmérséklet	K
T_i	a víz és termosz keverés előtti hőmérséklete	K
d	vastagság	m
$m_2 - m_1$	tömegmegváltozás állandósult állapotban	kg
$t_2 - t_1$	időkülönbség	s
A	a minta szabad felülete	m ²
p_{kamra}	kamrában lévő gőznyomás	Pa
$p_{edény}$	mérőedényben lévő gőznyomás	Pa
δ	páradiffúziós tényező	kg/msPa
μ	páradiffúziós egyenértékű szám	-
R_v	vízpára gázállandója	Nm/kgK
p_0	standard barometrikus nyomás	hPa
T	termodinamika hőmérséklet	K
p_{kamra}	páranyomás	Pa
A_w	vízfelszívás együttható	kg/m ² s ^{1/2}
$\Delta m'_{f'}$	„t _{f'} ” időpontban felszívott vízmennyiség	kg/m ²
$\Delta m'_{o'}$	a kiindulási pontban felszívott vízmennyiség	kg/m ²
$\sqrt{t_{f'}}$	bemerítés utáni időtartam négyzetgyöke „f'” időpontban s ^{1/2}	

Jelölés	Megnevezés	Mértékegység
w_f	szabadvíz tartalom	kg/m ³
w	beton nedvességtartalma	kg/m ³
H	nedves építőanyag entalpiája	J/m ³
ϑ	hőmérséklet	K
t	idő	s
x	tartomány 1D	m
λ	hővezetési tényező	W/mK
h_v	víz párolgáshője	J/kg
p	parciális páranyomás	Pa]
ρ_w	víz sűrűsége	kg/m ³
u	víz tartalom	m ³ /m ³
φ	relatív páratartalom	-
D_w	nedvességtranszport tényező	m ² /s

1. Absztrakt

Acélszálerősítésű ipari padlók laborvizsgálatokkal támogatott dinamikus hő- és páratechnikai modellezése

Kutatásomban ipari csarnokok általános metszetben vett lábazat- és padlócsatlakozási csomópontjait vizsgáltam közép-európai éghajlati körülmények között. A csarnok határoló szerkezeteinek rétegrendjének meghatározása a hatályos 7/2006. TNM rendelet általános és költségoptimalizált követelményszintek szerint készült, valamint a hőszigetelés nélküli szerkezet is elemzésre került.

A padló szerkezet rétegrendi felépítésében található acélszálerősítésű betonréteg hő- és páratechnikai tulajdonságainak meghatározásához 2014-es TDK munkámban bemutatott és vizsgált próbatestek további laboratóriumi vizsgálata volt szükséges. A mérések során a dinamikus hő- és páratechnikai szimulációkhoz elengedhetetlen anyagtulajdonságokat (hőmérséklet- és nedvességfüggő hővezetési tényező, páradiffúziós képesség, vízfelvétel, fajlagos hőkapacitás, szorpció és deszorpció képesség, nedvességtranszport tényező) a rendelkezésre álló, egy éves próbatesteken határoztam meg. A próbatestek 3 féle változó acélszáladagolással készültek (35 kg/m^3 ; $27,5 \text{ kg/m}^3$; 20 kg/m^3), valamint vizsgáltam etalon próbatesteket is.

A dinamikus hő- és páratechnikai szimulációkat WUFI 2D szoftverrel készítettem, a kapott eredményeket a padló szerkezet és a lábazati falszerkezetnél tapasztalható hőveszteségekre gyakorolt hatásuk szempontjából értékeltem. A kutatásom hozzájárulhat az ipari csarnokok lábazati csomópontjainak optimális és energiatudatos tervezésének további fejlődéséhez, valamint a vizsgált acélszálas betonok hő- és páratechnikai tulajdonságainak megismerése bármely épületszerkezeti szimuláció alapja lehet.

2. Summary

Laboratory test supported dynamic heat and moisture modeling of steel fibre reinforced industrial floors

In this paper an investigation of steel fibre reinforced industrial floors is presented. I have analyzed a general segment of wall and foundation connection of the building in Middle-European weather conditions. The designing of the floor and wall components was performed according to the current and the more strict version of Hungarian regulations (TMN Decree No. 7/2006), furthermore I was investigated a model without any insulation.

To determine the most important material properties of the steel fibre reinforced concrete - which are necessary for the dynamic heat and moisture simulations – I used those specimens, which were examined in my previous TDK study. These properties are: moisture and temperature dependent thermal conductivity, specific heat capacity, vapor diffusion coefficient and resistance, moisture storage functions, water absorption coefficient and liquid transport coefficient. These specimens were made with 3 different fibre concentrations (35 kg/m³; 27,5 kg/m³; 20 kg/m³)

The dynamic heat and moisture simulations were performed using WUFI 2D software. I evaluated the results according to the effect of the heat loss on the internal surfaces of the floor and the walls. In conclusion, my simulations can improve the energy efficient design of industrial buildings, furthermore my measurements could be the base of any simulations in the field of building and energy design.

3. Bevezetés

Az építőiparban egyre nagyobb igény van az építőanyagok nedvességgel szembeni viselkedésének modellezésére, számítására. Az aktuális felújítási, helyreállítási munkálatok illetve az újonnan épülő szerkezetek teljesítőképességének meghatározó eleme a hő- és nedvességtechnikai viselkedés. Ez a folyamat egy jól ismert területe a szakmának, számos modellt fejlesztettek ki és validáltak világszerte.

A módszer bizonytalanságát egyrészt az építőanyagok anyagtulajdonságainak pontatlan ismerete, a peremfeltételek hibás megadása jelenti. Az igény egyre inkább a pontos, realiztikus modellek iránt növekszik, ezért tanulmányomban a tavalyi kutatásomban készített ipari padló anyagtulajdonságait vizsgáltam, ezzel meghatározva a dinamikus szimulációhoz szükséges főbb adatokat.

Dolgozatom célja, hogy megállapítsam, az acélszálerősítésű betonnal készült ipari padló milyen hő- és páratechnikai tulajdonságokkal rendelkezik, továbbá a szimulációk kiértékelésénél adódnak-e eltérések és milyen mértékűek az alkalmazott lábazati és padló hőszigetelés illetve a padló vastagságának függvényében.

3.1 A kutatás előzménye

2014 tavaszán kezdtem el a szálerősítésű ipari padlók hővezetésével és modellezésével foglalkozni. Az eredmények alapján megállapítottam, hogy az általam készített próbatestek magasabb hővezetési tényezővel rendelkeznek a gyakorlatban alkalmazott értékeknél, így kézenfekvő volt annak vizsgálata, hogy ez miként befolyásolja egy ipari csarnok padló szerkezetének viselkedését.

Az eredmények alapján az acélszálerősítésű betonmintákkal foglalkozom részletesebben jelen dolgozatban, vizsgálva azok részletes hő- és páratechnikai tulajdonságait, úgy, mint hőmérséklet- és nedvességfüggő hővezetési tényező, páradiffúziós képesség, vízfelvétel, fajlagos hőkapacitás, szorpciós és deszorpciós képesség, nedvességtranszport tényező. Ezek az adatok elsősorban a dinamikus higrotermikus szimuláció (HAM – Hőtechnikai és Nedvességtechnikai modellezés) bemenő paramétereit képezik a továbbiakban.

3.2 Szakirodalmi áttekintés

Hartwig M. Künzel, Andreas H. Holm és Martin Krus 2008-ban készült [1]-es tanulmányában a beton higrotermikus tulajdonságait és viselkedését elemezték, tanulmányukban az alábbi fontos tulajdonságokat emelték ki:

- Nedvességgel összefüggő tartóssági kérdések:

A fagyási károktól eltekintve a beton nem különösebben érzékeny a nedvességre. Ám a betonban található betonacél érzékennyé válik a magas nedvességtartalomra, ha a beton felülete karbonátosodott. Ha a lúgos környezet nyújtotta védelem megszűnik, elkezdődik a betonacél korróziója, mely súlyos szerkezeti hibához vezethet. Habár az ötvöztelen acélok 60% RH mellett kezdenek korrodálni, amennyiben annak felületét karbonátosodott beton fedi, úgy 80% RH eléréséig az acél nem mutatja korrodáció jeleit. Azaz, amennyiben sikerül a karbonátosodott betonban a relatív páratartalmat 80% RH alatt tartani, úgy ez megoldhatja a problémát, nincs szükség speciális eljárásokra, mint például a betonacél felületi védelme.

- A beton nedvességtranszportjának előrejelzése – a tartós tervezés előfeltétele:

Régebben ezek az előrejelzések főként kísérleteken, gyakorlati tapasztalatokon és egyszerűsített számításokon alapultak, manapság számos szimulációs szoftver elérhető, többek között a WUFI, melyet tanulmányukban használtak.

- A beton nedvességforrásként viselkedik:

Ebben az esetben a betonban jelentős nedvességtartalom van jelen, melynek csak egy része szükséges a hidratációhoz. A maradék nedvességtartalom az építés során távozik párolgás útján. Ez a szerkezeti nedvesség gyakori oka például a festék leválásának, penészképződésnek, több évet vesz igénybe, míg a szerkezet kiszárad.

Amikor a beton fő szerepe a talajvíz elleni védelem pincékben, akkor az anyag állandó nedvességforrásként viselkedik. A vízzáró beton a folyékony halmazállapotú talajvízzel szemben ugyan vízzáró, viszont a vízpárával szemben nem. Az [2]-es számú tanulmányban arra a következtetésre jutottak, hogy ez a hosszú távú páradiffúziós áram a vízzáró betonon keresztül állandósult állapotban $5 \text{ g}/(\text{m}^2\text{d})$ nagyságrendű. Ez az érték nem elhanyagolható a lakossági épületek nedvességterheléséhez képest, melyet a lakók termelnek főzés, takarítás, zuhanyzás során (általában $24 \text{ g}/\text{m}^2\text{d}$). Azaz a betonon keresztüli páravándorlás majdnem a belső nedvességterhelés 20%-a. Habár frissebb kutatások [3] azt írják, hogy kisebb ez a nedvességvándorlás, abban biztosak a kutatók, hogy ez az érték nem zérus. Ez a helyzet kritikus lehet, amennyiben a pincefal belsején hőszigetelés is van. Mivel a legtöbb ilyen szerkezet

belülről párazáró fóliával készül, úgy a vízzáró betonon keresztül áthatoló pára megszorul és a felhalmozódik a hőszigetelésben.

A kutatásuk további részében 20x20x20 cm-es betonkockákat vizsgáltak, amiket a zsalu eltávolítása után 3 hónapig tároltak 23°C és 80% relatív páratartalom mellett. Az adszorpciós és deszorpciós kísérletekhez összetört mintákat használtak, maximálisan 20 mm szemnagyság mellett.

Általuk használt beton receptúrája:

Cementtartalom [kg/m ³]	314
Víztartalom [kg/m ³]	186
Adalékanyag [kg/m ³] 0-4	810
4-8	362
8-16	629
Víz-cement tényező	0.6

1. táblázat – betonreceptúra (Künzel, Holm, Krus 2008)

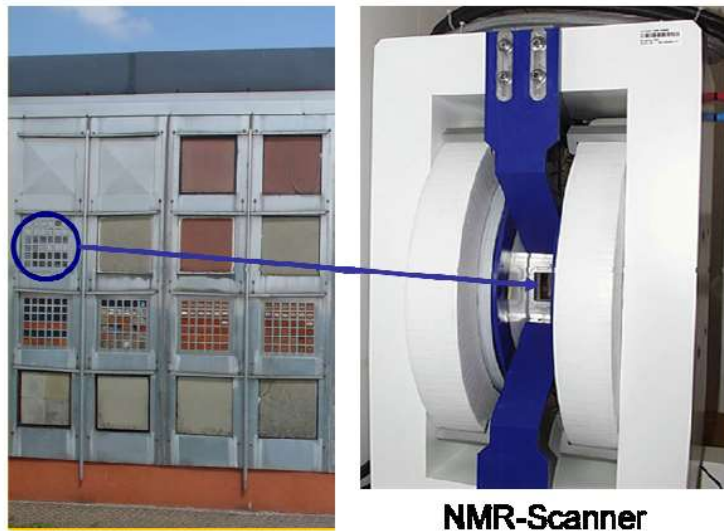
A számítógépes szimuláció eredménye csak annyira lehet pontos, mint amennyire az alkalmazott anyagok tulajdonságai. A megbízható anyagtulajdonságok hiánya miatt, a modern számítási módszerek nehezen voltak elfogadhatóak, így szükség volt laboratóriumi vizsgálatokra. Alább olvasható, mik azok az anyagtulajdonságok, amik elengedhetetlenek a dinamikus szimuláció készítéséhez.

- testsűrűség (2300 kg/m³)
- fajlagos hőkapacitás (0.85 kJ/(kgK))
- szárított állapotban mért hővezetési tényező (1.6 W/mK)
- porozitás (13,5%)
- szorpciós, deszorpciós képesség
- páradiffúziós ellenállási szám
- nedvességtranszport tényező

Amikor a beton természetes időjárásnak van kitéve, akkor annak nedvességtartalma függ az esőterheléstől, a száradási körülményektől, amik pedig a napsugárzással, külső levegő hőmérsékletével, páratartalmával állnak összefüggésben. Ezt a jellegű problémát jól sikerült

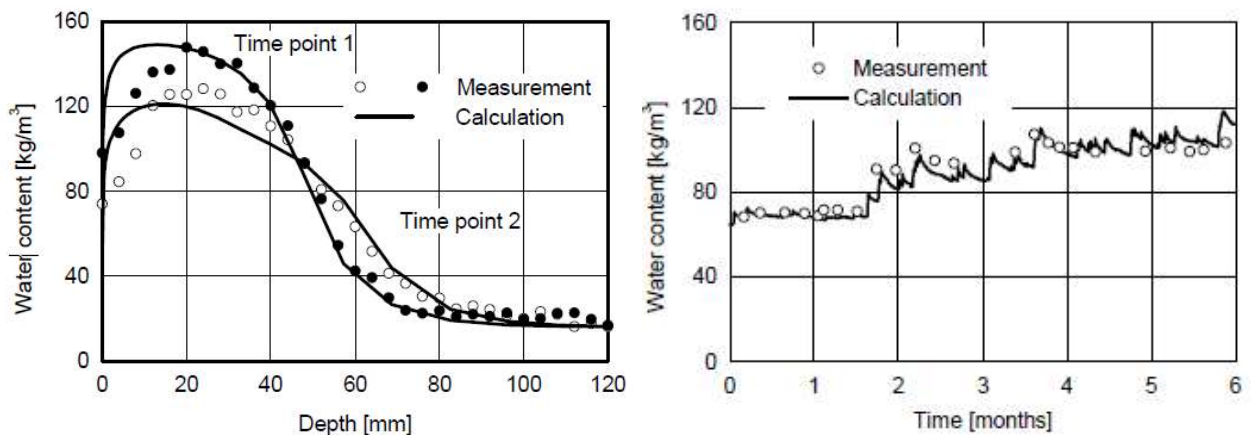
korábban WUFI szoftverrel szimulálni, a számított és mért nedvességtartalom jó egyezést mutatott homokkő homlokzatok, vakolat nélküli téglafalak esetében. Ebben a kutatásban megvizsgálták ezt a készített betonnal is.

A próbatesteket két évig vizsgálták (nyugati homlokzati tájolással), mérve a külső és belső hőmérsékleteket, páratartalmat, napsugárzást, csapadékadatok értékét. Ezek a klímaadatok szolgáltatták a szimuláció bemeneti adatait.



NMR-Scanner

1. ábra: betonminták elhelyezése nyugati tájolású homlokzaton, illetve az NMR-szkenner, mellyel a nedvességprofilok meghatározásra kerültek (Künzel, Holm, Krus, 2008)



2. ábra: bal oldal: mért és számított nedvességprofilok, jobb oldal: mért és számított nedvességtartalom a próbatestben (Künzel, Holm, Krus, 2008)

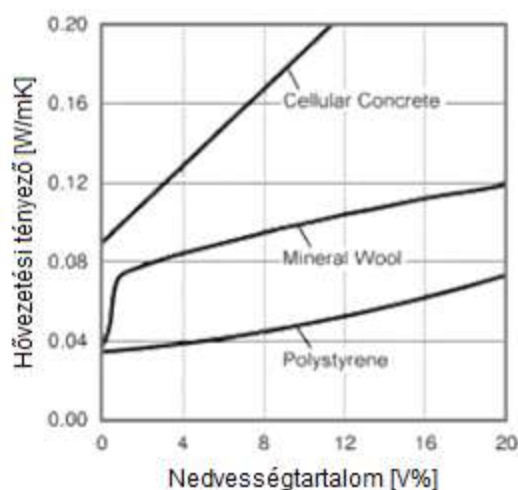
A jobb oldali fenti ábrán megfigyelhető a mért nedvesség fluktuáció illetve a bal oldali képen az NMR-szkennerrel mért nedvességprofilok. Ezek alapján jól látható, hogy a mért és számított eredmények egészen jól közelítik egymást.

Kutatásuk eredményeként fontos megemlíteni, hogy amennyiben a higrotermikus szimuláció általános gyakorlat lesz az épületenergetikai tervezésben, úgy fontos több kutatást

is végezni például az adalékanyagok függvényében, illetve több szimuláció és nedvességtartalom mérés szükséges a létező modellek validációjához, így kapva részletes képet a különböző típusú anyagok viselkedéséről.

Nedvesség okozta hőveszteségek

Az épületekben a hő- és nedvességtranszport folyamatok erősen összefüggnek egymással. Ezt a különösen nyilvánvaló kapcsolatot szemlélteti az alábbi ábra, melyben 3 különböző anyag (pórusbeton, ásványgyapot, polisztirol) hővezetési tényezője látható a nedvességtartalom függvényében, a vizsgálatokat Jespersen végezte 1952-ben.

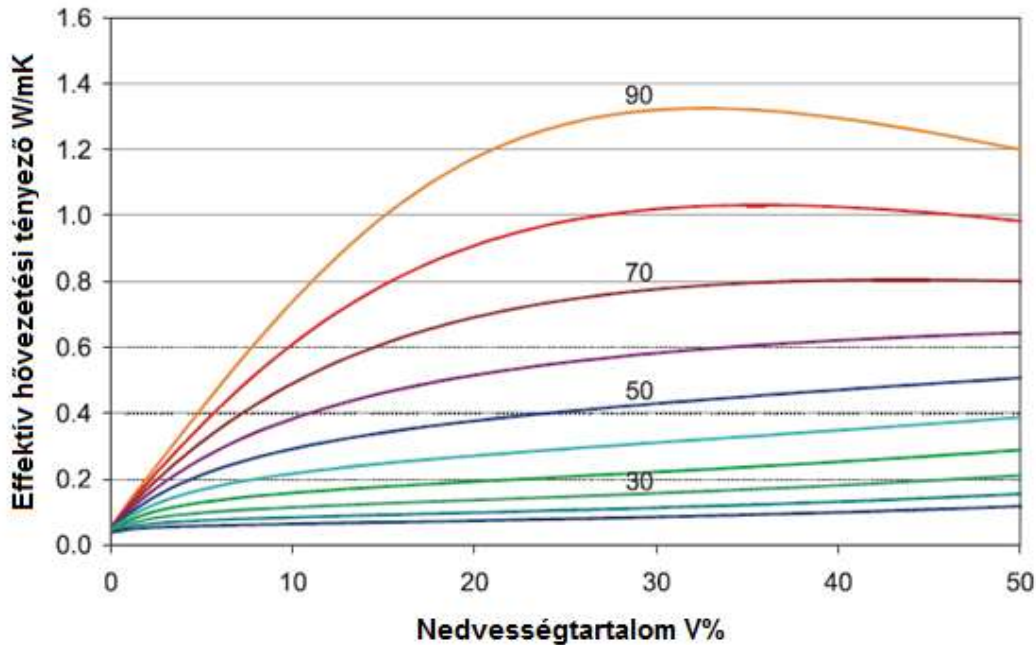


3. ábra: hővezetési tényező és nedvességtartalom közti összefüggés (Jespersen alapján)

Amíg a pórusbeton hővezetési tényezője a nedvességtartalommal lineárisan arányosan növekszik, addig az ásványgyapot esetében például nagyon kis nedvességtartalom változás is elég ahhoz, hogy a hővezetési tényező értéke jelentősen növekedjen. A mérések alapján körülbelül 1% nedvességtartalomnál az ásványgyapot hővezetési tényezője ~ 0,04-ről 0,07 W/mK-re változik. Ez a hirtelen növekedés csak a nedvesség fázisváltásával magyarázható.

Ez az úgynevezett látens hőeffektus, mely az anyagban lévő nedvesség fázisváltásából adódik a mérés folyamán. Ez a folyamat általában rövid időtartamú, és nem kapcsolódik a hőszigetelő anyag valódi hővezetési tényezőjéhez, mivel ennek hatása erősen függ az ásványgyapot melletti egyéb anyagoktól. Az így megállapított hővezetési tényező nem megfelelő dinamikus számításokhoz, viszont megmutatja, hogyha a látens hőeffektust elhanyagoljuk, akkor a hővezetési tényező nedvességtől való függése egészen hasonló a polisztiroléhoz.

F. Ochs és H. Müller-Steinhagen [20]-as cikkében szintén vizsgálta a kőzetgyapot hővezetését nedvesség hatására. A magas nedvességtartalom és hőmérséklet az effektív hővezetési tényező erős emelkedését vonja maga után. A nedvességtartalom főként a hőszigetelő anyag pórustartalmától, pórusszerkezetétől függ.



4. ábra: Kőzetgyapot hővezetési tényezője hőmérséklet és nedvességtartalom függvényében (Ochs és Müller-Steinhagen alapján)

Ismertetném továbbá az American Concrete Institute [15]-ös cikkét, melyben szálerezősített betonokat tanulmányoztak, többek között a hővezetési tényezők értékét is vizsgálták. Ezt tranziens és állandósult hőáramok alapján lehetséges meghatározni. Előbbi jól működik homogén anyagok esetében, míg utóbbi az inhomogén anyagoknál (mint például a beton, habarcs) használt megoldás.

Az alábbi táblázatban olvashatóak Morel 1970-es mérései, melyben különböző típusú acélszállal erősített habarcsokat vizsgált. Látható, hogy a száladagolás mennyiségének emelésével a hővezetési tényezők értéke emelkedett, bár vizsgálatok alapján ez a növekedés kisebb mértékű, mint a betonban található adalékanyag hatása a hővezetési tényezőre. A táblázat alatt található a tavalyi TDK dolgozatom eredménye, látható, hogy a két táblázat adatai egészen hasonlóak, ebből következtethetünk arra, hogy Morel 1970-es vizsgálatainak során szintén a próbatestek 28 napos kora után közvetlenül mérte meg a hővezetési tényezők értéket, ugyanis az ideai vizsgálataim kimutatták, hogy azok értéke már alacsonyabb (lásd: 6. táblázat: mért és számított hővezetési tényezők értékei), mivel a próbatest víztartalma csökkent az 1 éves tárolási időtartam alatt.

Szálmennyiség [%]	Száltípus	Hővezetési tényező [W/mK]
-	-	2,75
0,5	egyenes	2,67
1	egyenes	2,80
1,5	egyenes	3,03
0,5	hullámos	3,03
1	hullámos	2,74
1,5	hullámos	2,84

2. táblázat: Hővezetési tényezők értéke különböző acélszál típusok esetén (Morel, 1970):

Név	λ (W/mK) 10 °C-on
SZD35-200	2,89
SZD35-201	2,87
SZD35-202	2,82
SZD27,5-200	2,88
SZD27,5-201	2,88
SZD27,5-202	2,80
SZD20-200	2,94
SZD20-201	2,90
SZD20-202	3,06
REF-200	2,83
REF-201	2,87
REF-202	2,80

3. táblázat: Szálerősített betonok hővezetési tényezője (Szagri, 2014)

Az említett szakirodalmi adatok alapján elmondható, hogy az építőanyagok hőtechnikai tulajdonságai nagymértékben függenek a nedvességtartalomtól, ez az a kulcsfontosságú tényező, melyet nem szabad figyelmen kívül hagyni a hőtechnikai szimulációk készítése során sem.

4. Laboratóriumi vizsgálatok

4.1 Felhasznált beton próbatestek jellemzői

A receptúrák készítésénél fontos szempont volt, hogy az ipari padlók készítése során alkalmazott szálmennyiségekkel dolgozzunk, illetve teljesítsük azok nyomószilárdsági követelményeit: minimálisan C25/30 nyomószilárdsági osztályú, pumpálható betont készítsünk. A betonozás során minden típusú mintából 6 db 15x15x15 cm próbakocka készült, ezek közül 3 a nyomószilárdság meghatározásához volt szükséges, illetve készült 3 db 20x20x10 cm méretű próbatest is.

4.1.1 Betonreceptúrák

A próbatestek elkészítése az alábbi betonreceptúrák alapján történt. Részletes receptúra az 1. számú mellékletben található. A betonozás alkalmával mérésre került a készített beton konzisztencia osztálya (MSZ EN 12350-5:2009) illetve a friss beton testsűrűsége (MSZ EN 12350-6:2009).

Minta jele	Alkalmazott száltípus	Adalékanyag (kg/m ³)	Acélszál mennyisége (kg/m ³)	Tervezett testsűrűség (kg/m ³)	Friss beton testsűrűség (kg/m ³)
SZD35	Humix 50	1913	35	2424	2433
SZD27,5	Humix 50	1916	27.5	2419	2427
SZD20	Humix 50	1920	20	2414	2447
REF	-	1925	-	2401	2403

4. táblázat: egyszerűsített betonreceptúrák

4.1.2 Próbatestek tulajdonságai

Az mérésekhez használt próbatestek 1 éve készültek, ez idő alatt laborkörülmények között, 23 ± 2 °C illetve 45 – 55% relatív páratartalom mellett tároltuk. Az alábbi táblázatban olvasható a próbatestek nyomószilárdsági illetve konzisztencia osztálya.

	SZD35	SZD27,5	SZD20	REF
f_{ck} (N/mm ²)	56,651	64,495	61,950	56,648
Nyomószilárdsági osztály	C45/55	C50/60	C50/60	C45/55
Konzisztencia osztály	F3	F3	F3	F3

5. táblázat: próbatestek szilárdsági jellemzője, konzisztencia osztálya

4.2 Hővezetési tényező mérése

A hővezetési tényezők mérése a Tanszék laboratóriumában történt Taurus TLP 300 DT(X) segédfűtőlapos peremvédett hővezetési tényező mérő műszerrel. Ez az eljárás a próbatest két felületén kialakított hőmérsékletkülönbség hatására kialakult hőáram mérésén alapul.

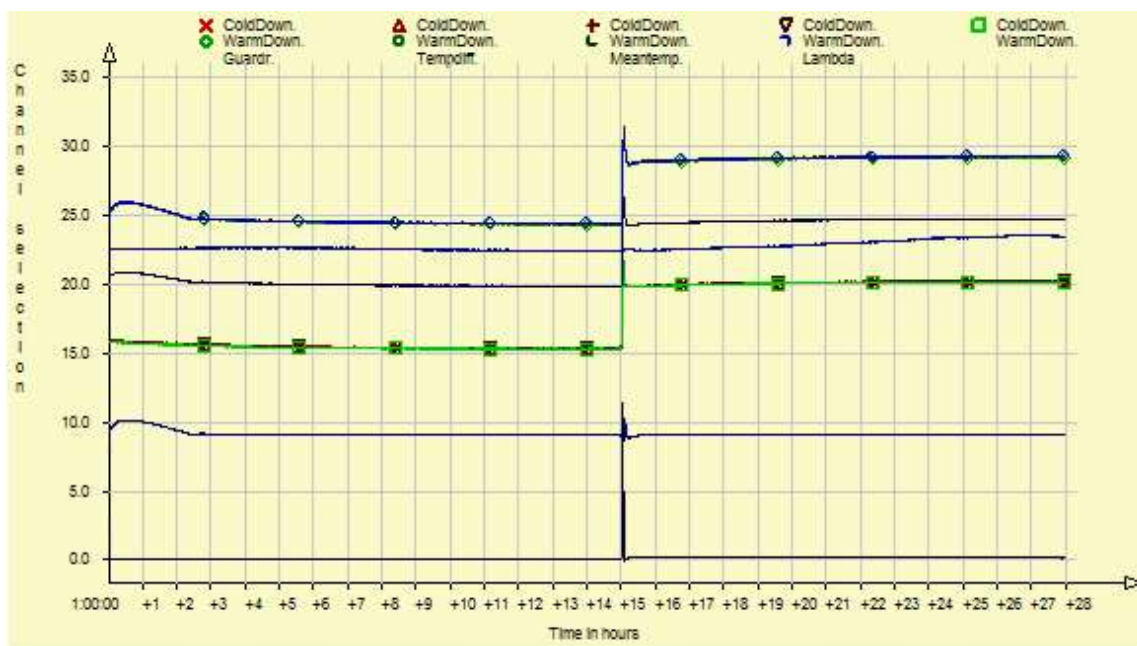
A pontos eredmények érdekében, a laborban végig egyenletes 23 ± 2 °C-os levegőt illetve $50 \pm 5\%$ közötti relatív páratartalmat tartottunk. A próbatesteket 10 cm vastagságú EPS polisztirol lemezből készített, a próbatestek magasságával megegyező méretű kalodában helyeztük a műszerbe, így biztosítani tudtuk, hogy a laborhőmérséklet ne befolyásolja a mérés eredményét és a közbenső 10x10 cm-es mért részen állandósult, egydimenziós hőáramlás alakuljon ki a próbatest belsejében. Az EPS kaloda illetve a próbatest köré alumínium fóliát tekertünk, mely nedvesség és párazáró réteggé funkcionált. A próbatest felső és alsó felületére 1-1 cm EPS réteget illesztettünk, ezzel a mérési hibák csökkentése volt a célunk, később a hővezetési tényező számításánál, ennek figyelembevételével lettek az értékek korrigálva.



5. ábra: hővezetési tényező mérése, Taurus TLP 300 DT(X)



6. ábra: próbatest kiszaluzása (2014), alkalmazott HUMIX 50 acélszál



7. ábra: hővezetési tényező mérésének folyamata

A fenti ábrán megfigyelhető, hogy a hővezetési tényezőt két tartományban mértük: 20 °C illetve 25 °C-on, mely hőmérsékletektől kismértékben minden mérés esetén a minta átlaghőmérséklete eltérő lehetett. Az eltérés oka a próbatest hőkapacitása illetve a mérés időtartama. Amennyiben a mérést több napon át folytatjuk, a kívánt hőmérséklet kialakult volna, azonban az állandósult hőáramlás szempontjából erre nem volt szükség, a vizsgálat pontos eredményeket szolgáltatott.

A mérést akkor tekintettem sikeresnek, amikor legalább 1,5 órán keresztül a mért hővezetési tényező 0,2%-nál nagyobb mértékben nem változott.

A kiszáritott és laborkörülmények között tárolt próbatestek mérésének eredményeként egy 23°C-os középértéket kaptunk. A 10456:2007 szabványnak megfelelően a 10 °C-on érvényes hővezetési tényezők az alábbi egyenlet segítségével számíthatóak:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \cdot e^{f_T \cdot (T_2 - T_1)} \quad (1)$$

ahol

- f_T – hőmérséklet konverziós együttható (0,001);
- T_1 – deklarált hőmérséklet (23°C);
- T_2 – tényleges hőmérséklet (10 °C).

Az eredmények az alábbi táblázatban olvashatóak:

Minta jele	Minta mért hővezetési tényezője 23°C 0%RH $\lambda_{2,d}$ [W/mK]	Minta mért hővezetési tényezője 23°C 50% RH $\lambda_{2,m}$ [W/mK]	Minta számított hővezetési tényezője 10°C, 0% RH $\lambda_{1,d}$ [W/mK]	Minta számított hővezetési tényezője 10°C, 50% RH $\lambda_{1,m}$ [W/mK]
SZD35	1,75	1,87	1,73	1,85
SZD27,5	1,99	2,11	1,96	2,09
SZD20	2,03	2,16	2,00	2,13
REF	1,68	1,79	1,66	1,77

6. táblázat: mért és számított hővezetési tényezők értékei

4.3 Fajlagos hőkapacitás vizsgálata

Egy rendszer fajlagos hőkapacitása megadja, hogy mennyi hőt kell közölni a rendszerrel, hogy annak hőmérséklete egy kelvinnel emelkedjék.

A fajlagos hőkapacitás gyakorlatilag a rendszert alkotó anyagok fajlagos hőkapacitásától függ, esetemben a referencia keverék illetve az alkalmazott szálak fajlagos hőkapacitásából (463.4 J/kgK) került meghatározásra.

A fajhő mérését keveréssel határoztam meg, melyhez egy PT1000 ellenálláshőmérőt használtam. A módszer alapja, hogy a kívánt ismert tömegű és hőmérsékletű anyag fajhőjét egy ismert paraméterekkel (c_v , m_v , T_i) rendelkező folyadékkal keverjük össze, majd megmérjük a beálló közös hőmérsékletet (T_k). Feltételezve, hogy a keverés során a két anyag között kizárólag hőátadás történik, úgy a vizsgálandó anyag által felvett hő egyenlő az ismert anyag által leadott hővel, azaz:

$$c_p = \frac{c_v \cdot m_v \cdot (T_k - T_i)}{m \cdot (T - T_k)} \quad (2)$$

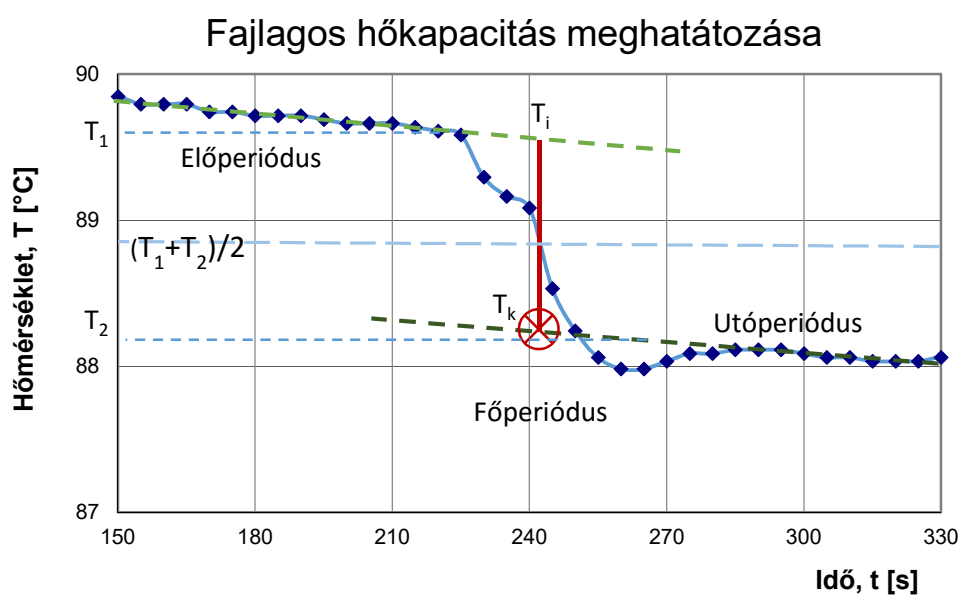
ahol:

- c_p – a próbatest fajlagos hőkapacitása [J/kgK];
- c_v – a termosz fajlagos hőkapacitása [J/kgK];
- m_v – termosz tömege [kg];
- m – próbatest tömege [kg];
- T – a próbatest keverés előtti hőmérséklete [K];
- T_k – a keverés után beállt közöt hőmérséklet [K];
- T_i – a víz és termosz keverés előtti hőmérséklete [K].



8. ábra: fajlagos hőkapacitás meghatározása

A számításnál azzal a feltétellel élünk, hogy a folyamat elszigetelten, hővesztés nélkül játszódik le, ám ez nem igaz, hiszen a mérőedény hőmérséklete is változik a mérés során, mely energiát igényel, továbbá a környezet felé is történik energiaátadás, akármilyen jól szigetelt eszközt is alkalmazunk. Ezért fontos lépés a kaloriméter hőkapacitásának meghatározása, mely esetben 120,33 J/K volt. Szükséges továbbá a hővesztések becslését is elvégezni.



9. ábra: fajlagos hőkapacitás meghatározásának lépései

A 9-es ábra a mérés során a kaloriméter hőmérsékletének változását mutatja be az idő függvényében, a görbe 3 szakaszra bontható:

- Előperiódus: a kaloriméterbe helyezett folyadék és a kaloriméter, illetve a folyadék és a környezet közötti hőmérsékleti egyensúly kialakulásának folyamata, itt a kis hőmérsékletkülönbségek miatt a folyamat lineárisnak tekinthető
- Főperiódus: fő energiaátadási folyamat, az anyagok összekeverésének folyamata
- Utóperiódus: Ebben a szakaszban lassan csökken a kaloriméter hőmérséklete, mely szintén lineárisnak tekinthető

A hőmérsékletkorrekció elvégzéséhez, első lépésben az elő- és utóperiódusra lineáris egyenest illesztünk, majd megrajzoljuk a $(T_1+T_2)/2$ egyenest az időtengellyel párhuzamosan. Ezen egyenes és a főperiódus metszéspontjából függőleges egyenest húzunk a hőmérséklettengellyel párhuzamosan. Ennek a függőleges egyenesnek és az előperiódusnak a metszéspontját tekintjük a rendszer kezdeti hőmérsékletének, az utóperiódussal lévő metszéspontját pedig a közös hőmérsékletnek.

A mérések és számított értékek alapján az eredmények azt mutatják, hogy nincs szignifikáns különbség a szálerősített és a referencia keverék között, minden minta fajlagos hőkapacitása 830.7-832.4 J/kgK között van.

4.4 Páradiffúziós képesség vizsgálata

A beton próbatestek páradiffúziós tényezőjét és ellenállását egy egyedileg készített hőmérséklet- és páraszabályozott kamrában mértem meg. Ehhez egy speciális alumínium mérőedényt használtam, amelynek az alsó felében a relatív páratartalmat Mg (NO₃)₂ – 6H₂O sóval állítottam be 53%-ra 23°C hőmérséklet mellett. A kamrában lévő levegő relatív páratartalmát különböző sókkal állítottam be, mellyel létrejött a nyomáskülönbség a próbatest két oldala között és megindult a pára áramlása. Így lehetséges volt a vízpára diffúzió mérése a betonban, a tömegváltozások mérése alapján.

Az acélszálerősítésű betonminták méréséhez az EN ISO 12572:2001 szabványt követtem, a méréseket 'dry cup' és 'wet cup' kondíciók mellett mértem. Előbbi feltétele, hogy az átlagos relatív páratartalom a próbatestben 70% alatt legyen, míg utóbbié, hogy a relatív páratartalom 70% felett legyen. A tömegváltozásokat egy nagy pontosságú mérőműszerrel minden másodpercben rögzítettük. A minták mérése általában egy hetet vett igénybe, míg a páraáramlás nem állandósult, ezután 3 napnyi adatból került kiszámításra a páradiffúziós képesség.

Mérettel kapcsolatos kikötések: a minta átmérőjének legalább kétszer akkora kell lennie, mint a próbatest vastagsága, továbbá amennyiben lehetséges olyan vastagnak kell lennie, mint amilyen vastagságban használják illetve az inhomogén anyagoknak, mint a beton, a vastagságnak legalább háromszor akkora kell lennie, mint a legnagyobb szemcse mérete.

A vizsgálat előtt a próbatesteket $23 \pm 5 \text{ °C}$ illetve $50\% \pm 5\%$ relatív páratartalom mellett kell tárolni, amíg nem állandósul a tömege.

A 'dry cup' mérésből kapjuk meg, hogy az adott anyag hogyan viselkedik alacsony páratartalom mellett, amikor a nedvességtranszport főként páradiffúzió útján zajlik. A 'wet cup' mérések pedig az anyag teljesítményét mutatják magas páratartalom mellett. Ebben az állapotban az anyag pórusai kezdenek vízzel telítődni, így emelkedik a folyadéktranszport és a csökken a páratranszport.



10. ábra: páradiffúziós képesség vizsgálata

A mért értékek alapján a páradiffúziós tényező a következő formula használatával számítható:

$$\delta = \frac{d \cdot \left| \frac{m_2 - m_1}{t_2 - t_1} \right|}{A \cdot |p_{kamra} - p_{edény}|} \quad (3)$$

ahol:

d – vastagság [m];

$m_2 - m_1$ – tömegváltozás állandósult állapotban [kg];

$t_2 - t_1$ – időkülönbség [s];

A – a minta szabad felülete [m²];

p_{kamra} – kamrában lévő gőznyomás [Pa];

$p_{edény}$ – mérőedényben lévő gőznyomás [Pa]

A páradiffúziós egyenértékű szám a levegőhöz képest adja meg az anyag páravezetéssel szembeni ellenállásának mértékét, ez a következő képlet alapján számítható:

$$\mu = \frac{0,083 \cdot p_0}{R_v \cdot T \cdot p_{kamra}} \left(\frac{T}{273} \right)^{1,81} \delta \quad (4)$$

ahol:

R_v – vízpára gázállandója, 462 Nm/kgK

p_0 – standard barometrikus nyomás, 1013,25 hPa

T – termodinamika hőmérséklet [K]

p_{kamra} – páranomás [Pa]

Az alábbi táblázatban olvashatóak a mérések eredményei:

Minta jele	Páradiffúziós tényező, dry-cup, δ_{dry} [10 ⁻¹² kg/msPa]	Páradiffúziós tényező, wet-cup, δ_{wet} [10 ⁻¹² kg/msPa]	Páradiffúziós ellenállási szám, dry-cup, μ_{dry} [-]	Páradiffúziós ellenállási szám, wet-cup, μ_{wet} [-]
SZD35	1,2569	2,0504	156,7	96,1
SZD27,5	1,5328	2,3950	128,5	82,2
SZD20	1,4127	2,3944	140,8	83,1
REF	1,2884	2,1121	153,2	93,6

7. táblázat: páradiffúziós képesség vizsgálatának eredményei

4.5 Szorpció és deszorpció képesség meghatározása

A betonminták szorpció izoterma görbéi állandó hőmérsékleten értelmezendők, és az adott hőmérsékletű és relatív nedvességtartalmú levegőbe helyezett próbatestek egyensúlyi nedvességtartalmát mutatják. A szorpció képesség 97% relatív páratartalomig az EN ISO 12571 szabvány szerint mérhető, a szabadvíz tartalmat (100%rH) pedig 28 napos vízbemerítéssel lehet számolni. Ezzel a méréssel a próbatest látszólagos porozitása is kiszámítható.

Szorpció görbe meghatározása:

A mintákat tömegállandóságig szárítjuk, majd a pontokat a relatív páratartalom állításával határozzuk meg. A nedvességtartalom megállapításához minden fázisban – minimálisan 4 ponton – szükséges az egyensúlyi állapot kivárása.

Deszorpció görbe meghatározása:

A deszorpció görbe kezdőpontja legalább 95% páratartalom kell, hogy induljon, ez a pont lehet a szorpció görbe végpontja. Itt a relatív páratartalom értékét folyamatosan csökkentjük, minimálisan 4 ponton mérjük a próbatestek tömegét az egyensúlyi állapot beállta után. Végül a próbatestet tömegállandóságig szárítjuk.

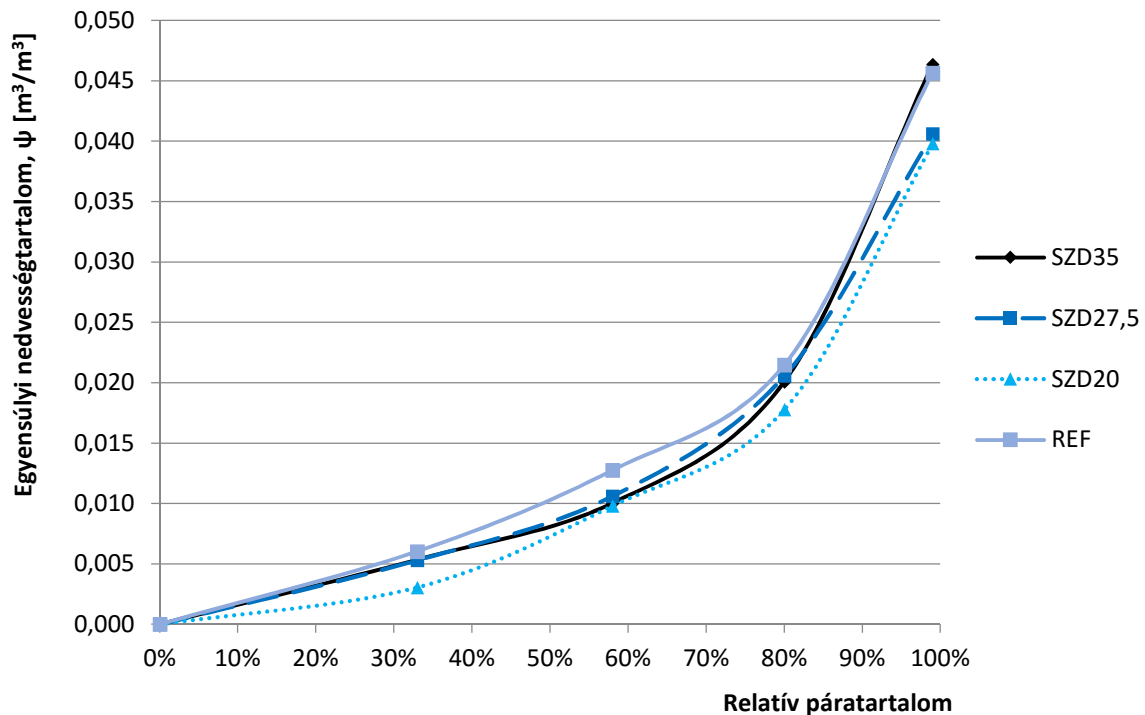
Minta jele	0%rH	33%rH	58%rH	80%rH	99%rH	28 napig vízben
SZD35	0	0.00535	0.01004	0.02008	0.04636	0.11317
SZD27,5	0	0.00531	0.01062	0.02059	0.04061	0.10149
SZD20	0	0.00307	0.00982	0.01780	0.03981	0.10730
REF	0	0.00604	0.01275	0.02147	0.04565	0.11076

8. táblázat: próbatestek víztartalma a relatív nedvességtartalom függvényében [m^3/m^3]

Minta neve	Látszólagos porozitás [%]
SZD35	4,84
SZD27,5	4,32
SZD20	4,54
REF	4,78

9. táblázat: látszólagos porozitás értékei

Szálerezősített beton nedvességtartalom függvénye



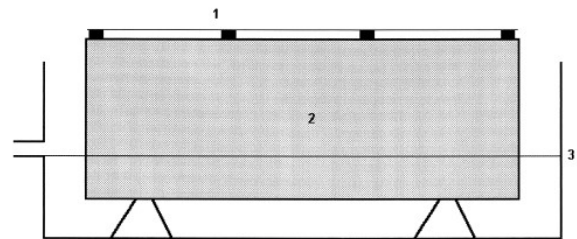
11. ábra: vizsgált betonminták nedvességtartalom függvényei

4.6 Vízfelvétel részleges bemejtéssel

A nedvességtranszport tényező számításához szükséges az anyag vízfelszívásának ismerete. Ennek mérését az EN ISO 15148:2002 szabvány alapján, részleges vízbemejtéssel mértem meg.

A vízfelszívás a próbatest tömegváltozásának mérésével határozható meg, ahol a vízbemejtés során a próbatest alsó felülete érintkezik a vízzel.

Fontos, hogy a vízzel érintkező felületnek legalább 50 cm²-nek kell lennie, továbbá célszerű a felhasználási móddal egyező vastagságú mintákat használni. A méréshez minimum 3 próbatestet tesztelni kell. Továbbá fontos, hogy 18-28 ± 2°C és 40-60 ± 0.05% relatív páratartalom mellett történjenek a mérések.



1. leterhelés, amennyiben felúszó mintákról van szó
2. próbatest
3. vízszint

12. ábra: vízfelszívás mérése és elve

A fenti ábrákon látható a mérés folyamata, a vízzel megtöltött tálcákba helyeztük a próbatesteket, figyelve arra, hogy annak alsó felülete ne érintkezzen a tálcával, ehhez kis távtartók alkalmazása volt szükséges. A vízszintet a mérés során 5 ± 2 mm szinten kellett tartani. A vízbemerítés után 5 perccel ki kell venni a próbatestet a vízből, szivaccsal felitatni a felületét, megmérni a tömegét, majd ismételtén vízbe helyezni. A méréseket a szabvány alapján 20 perc, 1 óra, 2 óra, 4 óra, 8 óra, majd még minimum 2 időpontban szükséges elvégezni, úgy hogy a 24 óra is benne legyen a mérési sorozatban.

A mért értékek felhasználásával a vízfelszívás együttható a következő formula alapján számítható:

$$A_w = \frac{\Delta m'_{t_f} - \Delta m'_0}{\sqrt{t_f}} \quad (5)$$

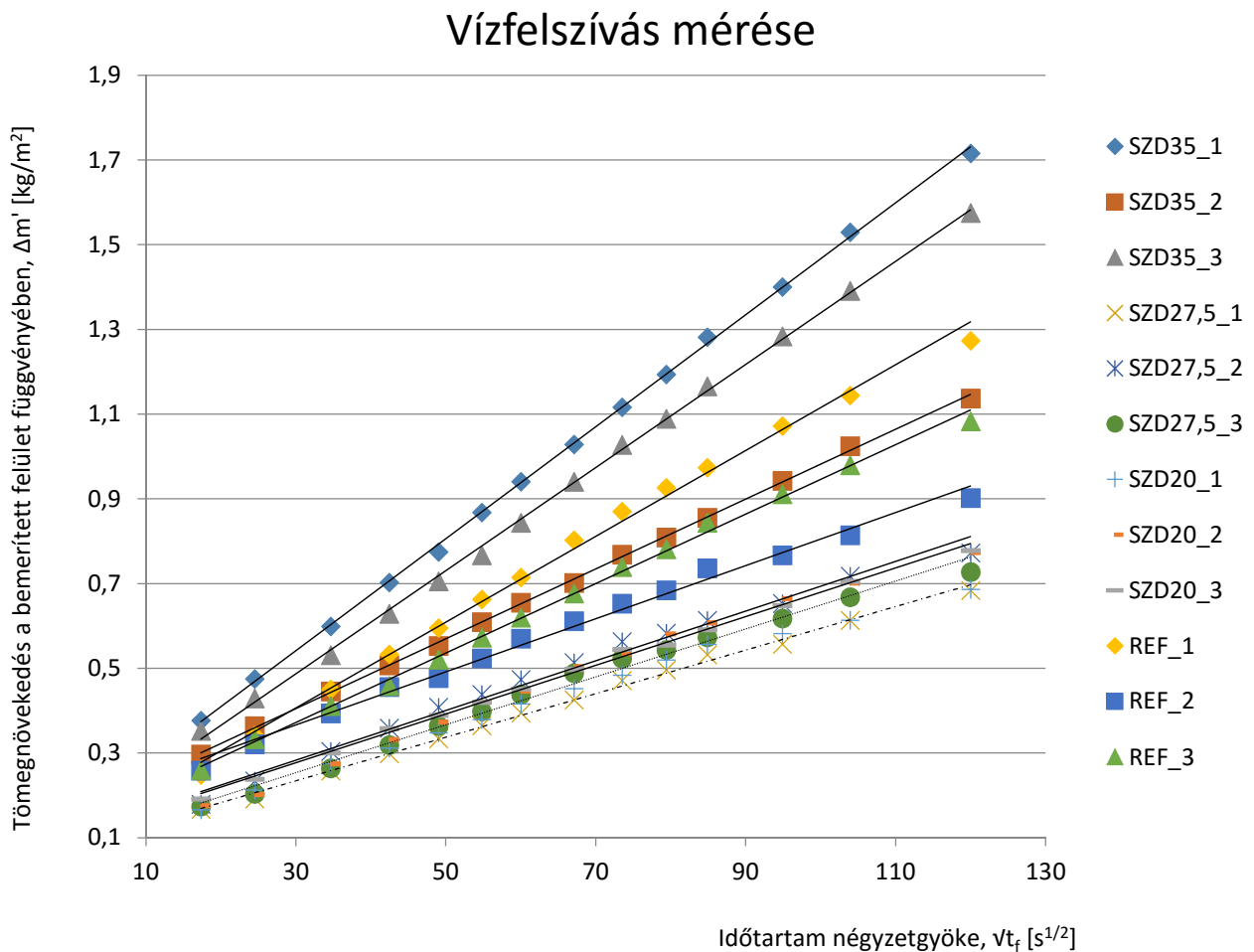
ahol:

A_w – vízfelszívás együttható [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$];

$\Delta m'_{t_f}$ – „ t_f ” időpontban a bemerített felületen felszívott vízmennyiség [kg/m^2]

$\Delta m'_0$ – a kiindulási pontban bemerített felületen felszívott vízmennyiség [kg/m^2];

$\sqrt{t_f}$ – bemerítés utáni időtartam négyzetgyöke „ f ” időpontban [$\text{s}^{1/2}$];



13. ábra: vízfelszívás mérésének eredményei

4.7 Nedvességtranszport tényező számítása

A nedvességtranszport tényező számításához szükséges a szorpciós izotermák, a vízfelszívás együttható ismerete, melyek előzőleg kerültek bemutatásra. Ezen tulajdonságok ismeretében egy közelítő egyenlet felhasználásával az alábbi módon számítható ki a nedvességtranszport tényező (Krus 1996):

$$D_{ws}(w) = 3,8 \cdot \left(\frac{A_w}{w_f} \right)^2 \cdot 1000 \left(\frac{w}{w_f} - 1 \right) \quad (6)$$

ahol:

w_f – szabadvíz tartalom, azaz 100% rH melletti nedvességtartalom [kg/m³];

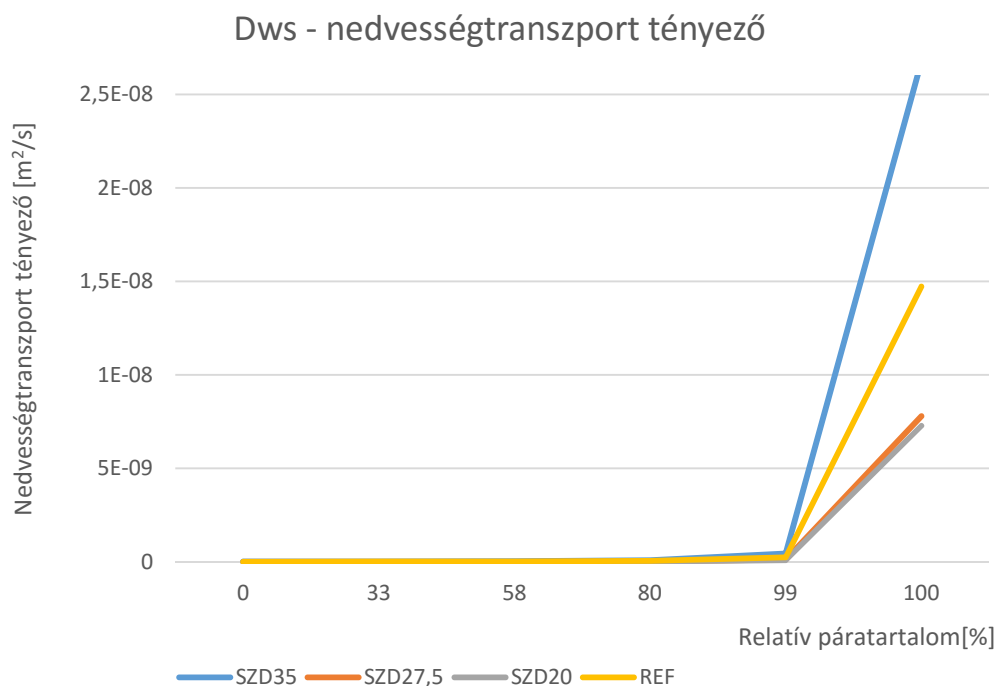
w – beton nedvességtartalma [kg/m³];

A_w – vízfelszívás együttható [kg/m²s^{1/2}];

Ezek alapján, az alábbi táblázatban találhatóak a számított szabadvíztartalom illetve vízfelszívás együtthatók értékei. Ezen tulajdonságok elengedhetetlenek a hő- és nedvességtranszport modellezéséhez.

Minta jele	Vízfelszívás együttható, A_w [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}^{1/2}$];	Szabadvíz tartalom, w_f [kg/m^3]
SZD35	0.0095	113,2
SZD27,5	0.0046	101,5
SZD20	0.0047	107,3
REF	0.0069	110,8

10. táblázat: vízfelszívás együttható, szabadvíz tartalom eredmények

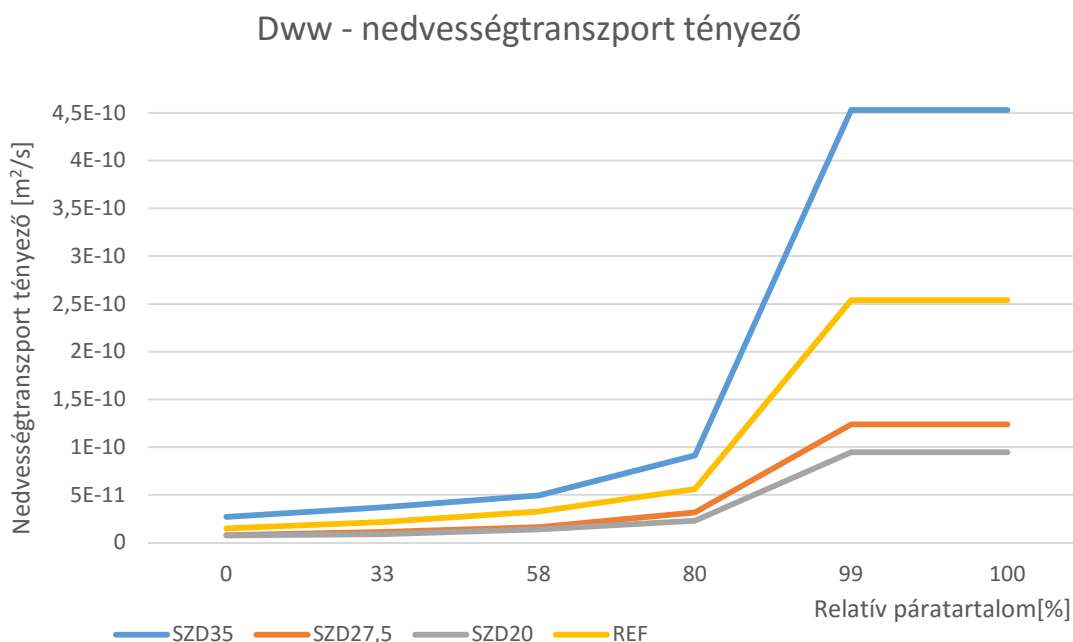


14. ábra: D_{ws} nedvességtranszport tényező

Felszívási nedvességtranszport tényező (D_{ws}) leírja a kapillaris vízfelvételt, amikor a felszívó felület teljesen nedvesített. Épületfizikai példával szemléltetve ez hasonló például a homlokzatot érő esőhöz. Ebben a felszívási mechanizmusban főként a nagyobb kapillárisok vesznek részt, mivel az alacsonyabb kapilláris feszültségüket ellensúlyozza a lényegesen kisebb áramlási ellenállásuk.

A szétterjedési nedvességtranszport tényező (D_{ww}) leírja a nedvesség szétterjedését, amikor a nedvesítő hatás befejeződött, nincs több „új” vízfelvétel és az anyagban lévő nedvesség elkezd szétterjedni, ilyen például eső hiányában az anyagban lévő nedvességvándorlás. Itt már a kisebb kapillárisok dominánsak a folyamatban, mivel a nagyobb szívóerejük elszívja a vizet a nagyobb kapillárisokból az oldalirányú összeköttetéseken keresztül. Mivel ez egy lassúbb folyamat, így a nedvességtranszport tényező általában lényegesen kisebb, mint a felszívási tényező.

Durva közelítéssel élve a nedvességtranszport tényező többé-kevésbé exponenciális összefüggést mutat a nedvességtartalommal. Ezért használ a dolgozatomban használt szoftver logaritmikus interpolációt a táblázat adatai között.



15. ábra: D_{ww} diagram, a nedvességtranszport tényező erősen függ a nedvességtartalomtól

w [kg/m ³]	D _{ws} [m ² /s]	w [kg/m ³]	D _{ww} [m ² /s]
0	0	0	0
w ₈₀	D _{ws} (w ₈₀)	w ₈₀	D _{ws} (w ₈₀)
w _f	D _{ws} (w _f)	w _f	D _{ws} (w _f)/10

11. táblázat: D_{ws} és D_{ww} nedvességtranszport tényező közötti összefüggés

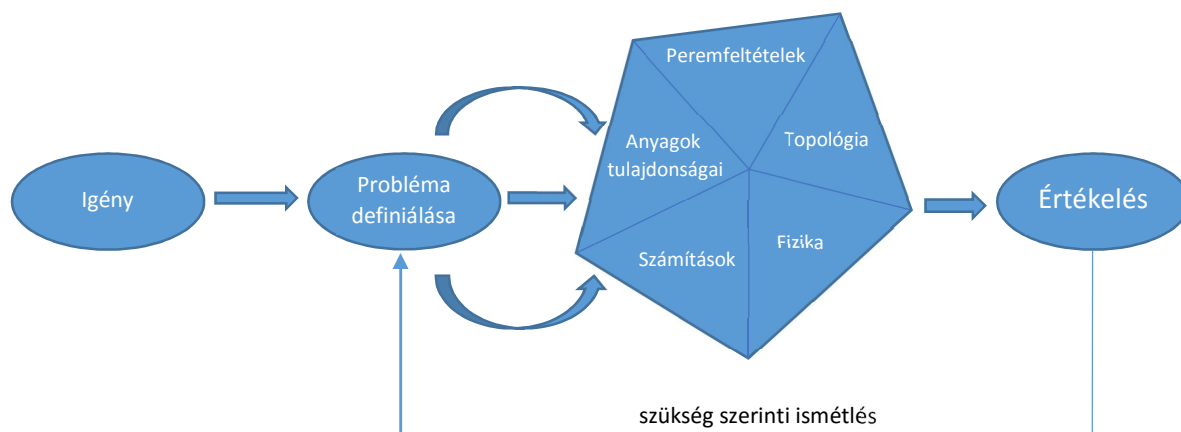
A 11-es táblázatban látható a WUFI szoftver által alkalmazott konverzió, mely alapján a két nedvességtranszport tényező kiszámítható a 6-os közelítő képlet segítségével.

5. Szimuláció

5.1 Számítógépes modellezés folyamata

A kapcsolt hő és nedvességtechnikai modellezés már órai lebontásban, éves futtatási idővel végezhető, a jelenleg használt 1, 2 vagy akár 3 dimenziós számítógépes modellekkel. Ez csupán kis része az energetikai tervezésnek, ugyanakkor fontos terület, amivel mindenképpen érdemes foglalkozni.

Az alábbi folyamatábra mutatja a modellezés lépéseit, folyamatát.



16. ábra: modellezés folyamatábrája

Az 1. lépés az igény, azaz valaki definiálja a problémát, felveti a modellezés szükségességét, illetve, hogy az miként segíti a döntések meghozatalát.

2. lépésként a modellezés nagyobb részletességgel kerül megvitatásra, többek között mit kell modellezni, milyen kialakítás, belső feltételek fontosak.

A modell a 3. lépésben kerül elkészítésre. Itt egyrészt a legfontosabb kérdés, hogy milyen modellt használjunk. A fő bemeneti paraméter, amit a tervezőnek meg kell adnia többek között a szerkezet topológiája, a használt anyagok tulajdonságai illetve a peremfeltételek. Az anyagtulajdonságok szempontjából nagyon sok építőanyaghoz nincsenek elérhető részletes anyagtulajdonságok, így sokszor célszerű könnyen hozzáférhető, egyszerű adatokkal számolni, majd a szimuláció futtatásával a bemeneti paraméterek adatait módosítva, könnyen kiderül, hogy az adott szimuláció szempontjából, mik azok a kritikus paraméterek, amiket esetleg részletesebben vizsgálni kell.

Az anyagok nedvességtartalma a szimuláció indításakor fontos lehet, általában ekkor az anyagokat szobahőmérsékleten és 50 - 80% páratartalom mellett kezdjük vizsgálni.

Amennyiben 1 év szimulációs időtartamra vagyunk kíváncsiak, úgy érdemes legalább 2 év futás idővel kalkulálni, és figyelmen kívül hagyni az első év adatait, ezzel kiküszöbölve a kezdeti feltételek befolyásoló hatását.

A modell futtatása után az eredmények lekérhetőek, gyakran a programok kirajzolják a kért adatokat (hőmérséklet, nedvességtartalom) a dátum függvényében.

A szimuláció eredményeinek kiértékelése alkalmas lehet például egy szerkezet ideális rétegrendjének kialakításában (pl. vasbeton vázas épület megfelelő falszerkezetének tervezéséhez, pincealjzat rétegrendjének felépítésében, azaz szükséges-e hőszigetelés, többféle talajtípussal modellezve).

A módszer nehézsége elsősorban abban rejlik, hogy fontos az anyagtulajdonságok, peremfeltételek megfelelő és pontos meghatározása, ehhez jelenleg sokszor kevés adat áll rendelkezésre, így szükség van például kiegészítő laboratóriumi vizsgálatokra is.

5.2 Hő- és páratechnikai szimuláció elméleti háttere

A véges térfogat módszerek, melyek a megmaradási törvények diszkretizációját célozzák, fontosak az áramlástan problémák megoldásában. A megbízható eredményt szolgáltató higrotermikus szimulációs modelleket számos országban kifejlesztették, az alábbi parciális differenciálegyenletek azt a modellt mutatják be, melyet a WUFI szoftver is alkalmaz. Az első egyenlet a hőtranszport, míg a második egyenlet a nedvességtranszport folyamatokat írja le.

$$\frac{\partial H}{\partial \vartheta} \frac{\partial \vartheta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \vartheta}{\partial x} \right) + h_v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (7)$$

$$\rho_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_w D_w \frac{\partial u}{\partial \varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\delta}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (8)$$

ahol:

H	– nedves építőanyag entalpiája [J/m^3];
ϑ	– hőmérséklet [K];
t	– idő [s];
x	– tartomány 1D [m];
λ	– hővezetési tényező [W/mK];
h_v	– víz párolgáshője [J/kg];
δ	– páradiffúziós tényező [kg/msPa];
μ	– páradiffúziós ellenállási szám [-];
p	– parciális páryanomás [Pa];
ρ_w	– víz sűrűsége [kg/m^3];
u	– víztartalom [m^3/m^3];
φ	– relatív páratartalom [-];
D_w	– nedvességtranszport tényező [m^2/s].

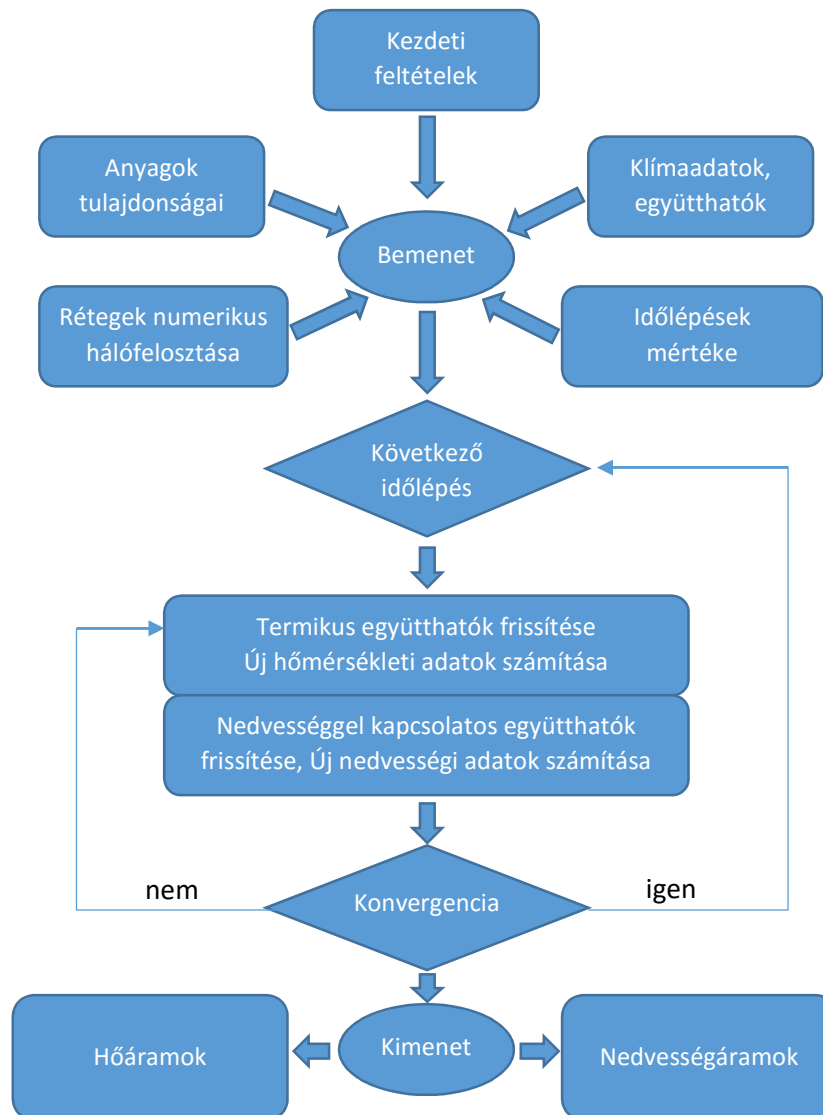
Az egyenletek bal oldala tartalmazza a „tárolási feltételeket”. A hőtároló képesség magában foglalja az anyag hőkapacitását, adott pillanatban a hőmérséklettől függő paraméterként van leírva. A nedvességtároló képesség pedig a szorpciós képességek deriváltjaként van leírva, a relatív páratartalomtól függő paraméterként. Az egyenlet jobb oldalán vannak a transzportfolyamatok. A hőtranszport a nedvesség- és hőmérsékletfüggő hővezetési tényező illetve a vízpára entalpiájának összege.

Ez a vízpára áramlás általi hőtranszport annak következtében játszódik le, hogy a víz adott helyen elpárolog és ezáltal látens hőt nyel el erről a helyről, majd egy másik helyen lecsapódik és felszabadítja ezt a hőt. Ez a fajta hőtranszport a látens hőeffektus.

A folyadéktranszport viszonylag csekély hőmérsékletfüggést mutat. A páradiffúziót viszont erősen befolyásolja a hőmérséklet, a telítési gőznyomás ugyanis a hőmérséklettel exponenciális arányban növekszik.

Ezek a differenciálegyenletek a véges térfogati módszer által vannak diszkretizálva és iteratívan megoldva az alább látható folyamatárba elve alapján.

Számítási modell

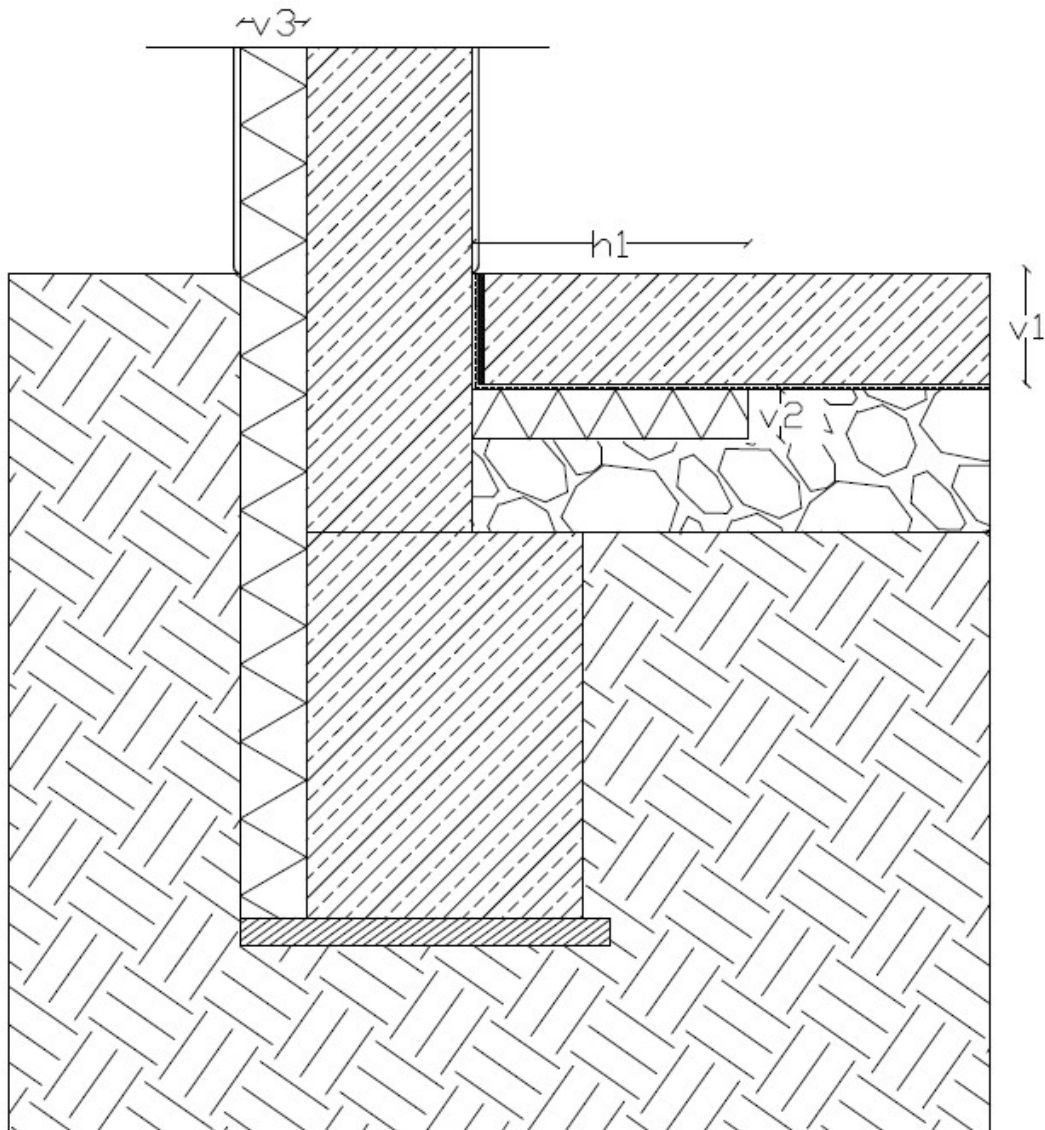


17. ábra: számítási modell folyamatábrája

A numerikus megoldás pontossága függ a háló felosztásától, sűrűségétől, az időlépések méretétől illetve a konvergenciakritérium megválasztásától. Általánosságban a numerikus megoldás kellően pontos, így a numerikus paraméterek hatása elhanyagolható a fizikai paraméterek hatásához képest, úgy mint anyagtulajdonság vagy klímaadatok. A számítás után az eredményeket szigorúan értékelni kell, hogy kizárjuk a felhasználói illetve súlyos konvergencia hibákat. Utóbbiakat a WUFI szoftver jelzi és a hatásukat értékelni lehet az összes nedvességáram illetve a komponensben felgyülemlt víz összegzésével.

5.3 Vizsgált csomópont bemutatása

Dolgozatomban egy ipari csarnok lábazat- és padlócsatlakozási csomópontját vizsgáltam, melyben 4 paraméter került módosításra. A lábazati fal rétegrendje alapján 2-2 cm külső és belső vakolat, 'v3' vastagságú XPS hőszigetelés, illetve vasbeton falszerkezettel számoltam. A padló esetében 'v1' paraméterű ipari padló, 1 réteg PE- fólia, 'v2' vastagságú és 'h1' szélességű XPS hőszigetelés illetve 25 cm kavicsfelöltés rétegrendet alkalmaztam.

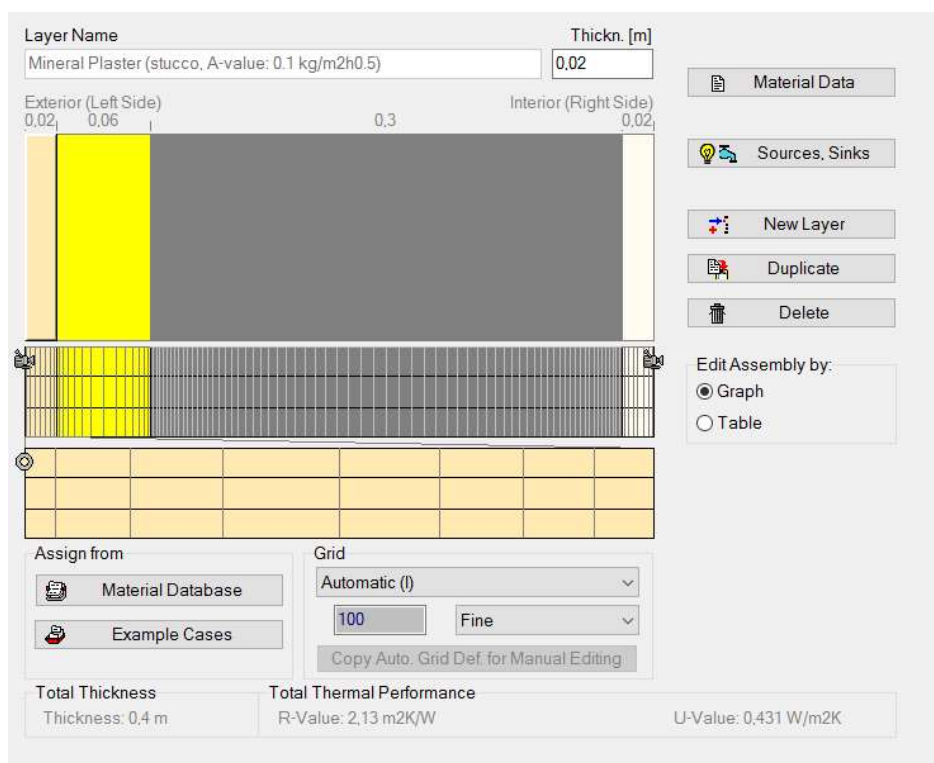


18. ábra: vizsgált lábazati és padlócsomópont

Ez alapján készítettem el a lehetséges kombinációkat, melyet az 5.5.2 bekezdésben ismertetek részletesen.

5.4 1D szimuláció

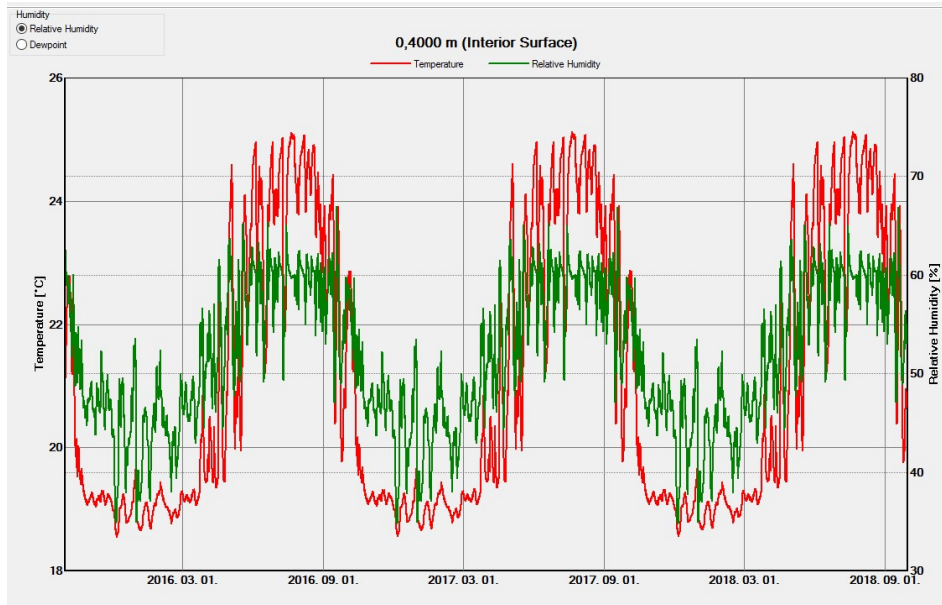
A készített csomópontok egydimenziós szimulációját végeztem el elsőként WUFI Pro 5.3 alkalmazásával, ez alapján határoztam meg elsősorban az alkalmazott hőszigetelések vastagságát is, az eredmények a 12. táblázat: szimulációs modellek hőátbocsátási tényezői láthatóak.



19. ábra: lábazati fal 1D szimulációja – rétegrend

A minimálisan alkalmazandó hőszigetelések méretének meghatározásánál célom volt, hogy a 7/2006-os TNM rendeletben foglalt hőátbocsátási tényező értéke alatt maradjak, illetve vizsgáltam a rendelet költségoptimalizált változatát is, ezeknek minden esetben sikerült eleget tennem. A rétegtervi hőátbocsátási tényezőket célszerű volt a WUFI Pro programmal számítani, hiszen így figyelembe tudtam venni a hőmérsékleti és nedvességátásokat, melyek a szerkezetet érik, így nem fordulhatott elő a kétdimenziós szimuláció során, hogy adott pillanatban, adott hőmérsékleti feltételek mellett a szerkezetem ne felelt volna meg a rendeletben foglalt értékeknek.

Az 20-as ábrán látható a WUFI Pro programban használt belső klíma, az értékek változásával párhuzamosan a padló hővezetési tényezője is változik, hiszen az függ a hőmérséklettől és a relatív páratartalom értékétől is. Ezek, illetve a pontos anyagtulajdonságok megadása révén van lehetőség a hőátbocsátási tényező pontos értékének figyelembevételére.



20. ábra: Lábatart 1D szimulációja – belső hőmérséklet és relatív páratartalom

A 21-es ábrán a padló rétegendje látható, a kép alsó sorában jelzi a program a szerkezet hőátbocsátási tényezőjének értékét illetve a rétegend teljes vastagságát.

Project/Case: Padló/#1

Assembly/Monitor Positions | Orientation/Inclination/Height | Surface Transfer Coeff. | Initial Conditions

Layer Name: Concrete, C35/45 Acélszál erősítésű beton | Thickn. [m]: 0,1

Exterior (Left Side): 0,25 | Interior (Right Side): 0,09 | 0,005 | 0,1

Material Data

Sources, Sinks

New Layer

Duplicate

Delete

Edit Assembly by:

Graph

Table

Assign from: Material Database | Example Cases

Grid: Automatic (I) | 70 | Medium

Copy Auto. Grid Def. for Manual Editing

Total Thickness: Thickness: 0,44 m

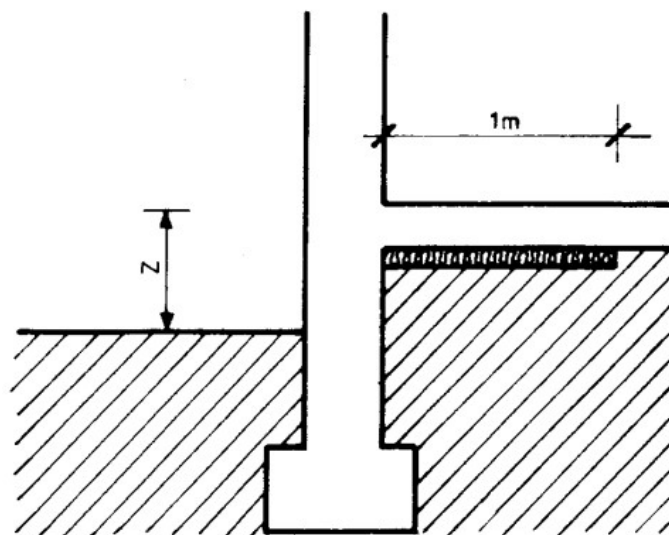
Total Thermal Performance: R-Value: 3,39 m²K/W | U-Value: 0,285 W/m²K

21. ábra: padló 1D szimulációja - padló rétegend

Rendelet típusa	Szerkezet típusa	Hőszigetelés mérete	Teljesített U érték [W/m ² K]	Rendelet által előírt U érték [W/m ² K]
7/2006 TNM	Külső fal	6 cm	0,431	0,45
	Talajon fekvő padló	5 cm	0,458	0,5
7/2006 TNM költségoptimalizált	Külső fal	12 cm	0,232	0,24
	Talajon fekvő padló	9 cm	0,285	0,3

12. táblázat: szimulációs modellek hőátbocsátási tényezői

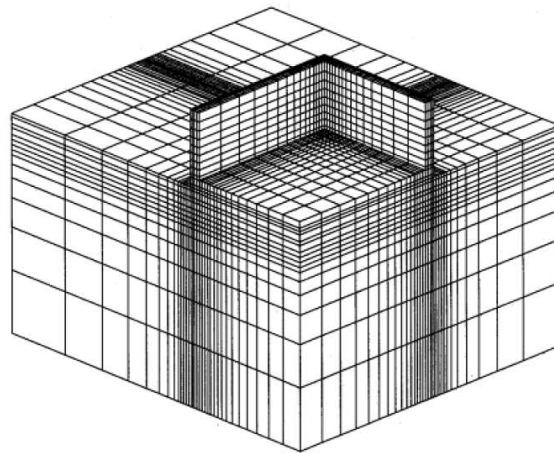
A 12-es táblázatban olvashatók az alkalmazandó minimális hőszigetelések értékei, melyekkel még megfelel a szerkezetem a rendeletnek. Dolgozatomban nem csak új építésű szerkezetekkel foglalkozom, így a padló hőszigetelésének szélességét 50 cm illetve 100 cm-ben határoztam meg. Az MSZ-04-140-2:1991 szabvány alapján ugyanis a talajjal érintkező padló szerkezetek esetén az épület külső kerülete mentén húzódó 1 m széles sávban szükséges hőszigetelést alkalmazni (lásd: 22. ábra). Ugyan ezt a szabványt 2012-ben visszavonták, ám sajnos sok helyen még a mai napig ezt használják, illetve ez alapján méreteztek. Az újabb rendelet alapján jelenleg 1,5 m szélességben kellene a hőszigetelést fektetni, ám a szimulációm során alkalmazott két variáció már alkalmas arra, hogy látszódjanak a tendenciák és le tudjuk vonni a megfelelő következtetéseket (lásd: eredmények)



22. ábra: MSZ-04-140-2:1991 - hőszigetelés alkalmazása padló szerkezetek esetén

5.5 2D szimuláció

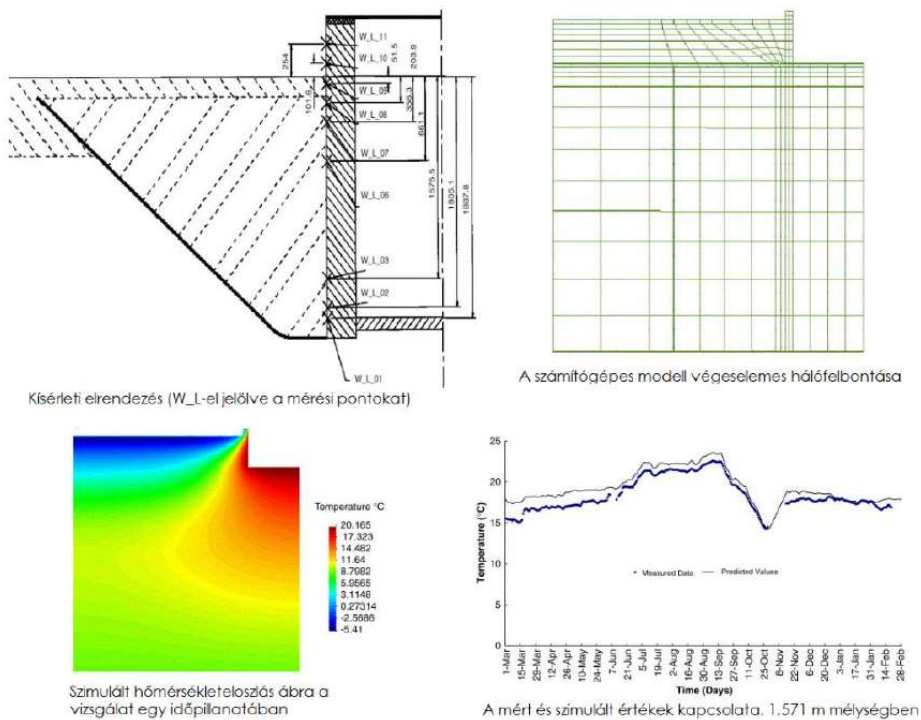
A szimulációs módszerek esetében a két leggyakrabban alkalmazott módszer a véges differenciámódszer (VDM) illetve a végelem módszer (VEM). Előbbi az időben és térben folytonos függvényeket diszkrétizálja, és differenciahányadosokkal közelíti a differenciálegyenletekben szereplő deriváltakat. Ilyen modell alapján készített szimulációt Blomberg 1996-ban, melyben a VDM módszer alapján modellezett egy padlót Heat 3 szoftver segítségével. Ám ebben a modellben még nem vette figyelembe a hővezetési tényezők hőmérséklet- illetve nedvességkorrekcióját.



23. ábra: Blomberg 1996, padló modellezése VDM

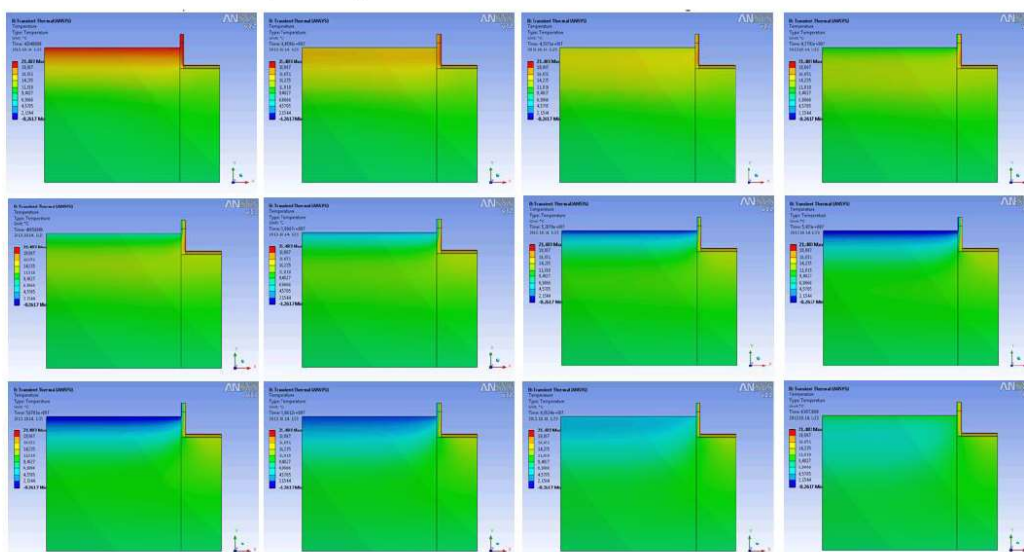
A végelem módszer alapján a teljes tartomány leíró parciális differenciálegyenletek megoldásait a részhalmazokra felírt egyszerűbb egyenletek megoldásával, majd a megoldások összeillesztésével közelítjük.

Rees 2007-ben egy kísérleti fűtött pincét vizsgált, mérve az épület hőmérsékleteit több ponton, majd az értékeket a szimulációs eredményekkel hasonlította össze. A szimulációhoz szükséges hőtechnikai tulajdonságokat mérésrel határozták meg, de a szimulációnál nem alkalmaztak például nedvességkorrekciót. Az alábbi ábrán látható, hogy a szimuláció eredménye jó korrelációt mutat a mérési eredményekkel, és sikerül a valóságnak megfelelő szimulációt készíteni. Természetesen ez csak akkor igaz, ha a geometriai kialakítás, peremfeltételek és anyagjellemzők pontosan kerülnek megadásra.

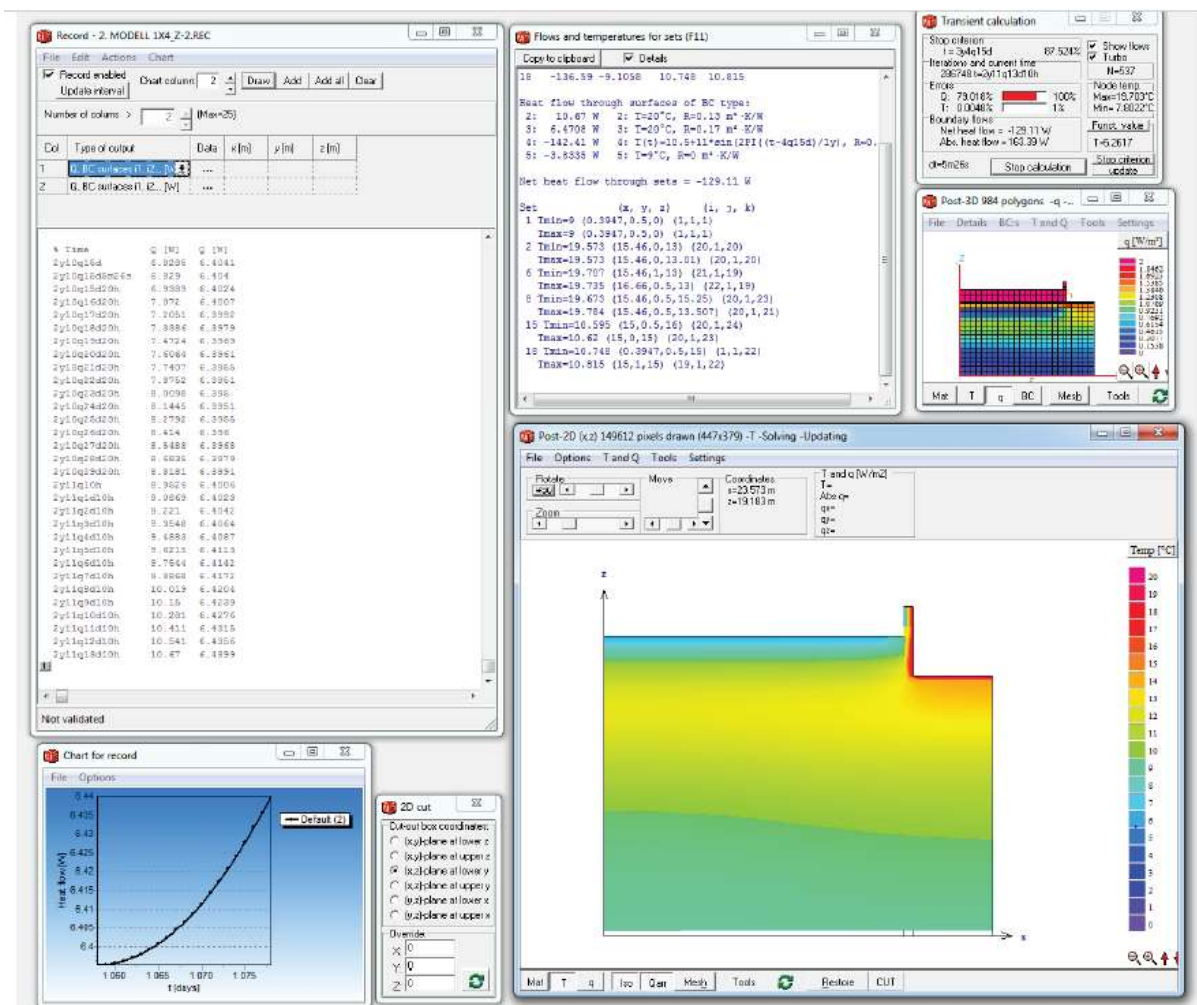


24. ábra: Rees kísérlete, talajjal érintkező padlószervezetek szimulációja és a mért eredmények összehasonlítása (Nagy Balázs 2014)

Nagy Balázs [24]-es TDK dolgozatában illetve diplomamunkájában [15] szintén készített szimulációkat talajjal érintkező szerkezetekre. Ezek általános vizsgálatok voltak konkrét értékek nélkül (konkrét időjárási fájl helyett időjárási modellel készültek a vizsgálatok), illetve az anyagtulajdonságoknál is csak hőmérsékleti korrekciót alkalmazott, az anyag megkötései miatt.



25. ábra: Talajban lévő hőmérsékletek fűtési idény alatt (Nagy Balázs 2013)



26. ábra: tranziens szimulációs futtatása Heat 3-ban (Nagy Balázs 2014)

A dolgozatban bemutatásra került, hogy a VDM és a VEM eljárás is közel azonos eredményt ad, azaz a szimulációk során több módszer alkalmazása is megfelelő lehet.

A fenti kutatások továbbfejlesztéseképp készült el a [23]-as cikk, mely talajjal érintkező szerkezetek hőtechnikai számításával foglalkozik, ebben 3 egymást követő év szimulációs eredményei alapján az utolsó év értékeiből készült egy táblázat, mely fél-analitikus számítási modellel megadja a padló szerkezetek vonalmenti hőátbocsátási tényezőjét magyarországi padló szerkezetek esetén.

U_{floor}	4	2	1	0.75	0.5	0.4	0.3	0.25	0.2	0.15	0.1
z [m]↓	[W/m ² K]										
-3	0.92	0.82	0.64	0.57	0.47	0.41	0.34	0.30	0.25	0.20	0.13
-2	1.03	0.91	0.70	0.63	0.52	0.46	0.38	0.34	0.29	0.23	0.16
-1.5	1.10	0.96	0.75	0.67	0.55	0.49	0.41	0.36	0.31	0.25	0.18
-1	1.20	1.06	0.80	0.72	0.59	0.52	0.44	0.39	0.33	0.27	0.20
-0.75	1.25	1.10	0.84	0.75	0.61	0.54	0.46	0.41	0.35	0.28	0.21
-0.5	1.32	1.16	0.88	0.78	0.64	0.57	0.48	0.43	0.37	0.30	0.22
-0.25	1.40	1.22	0.93	0.82	0.67	0.60	0.50	0.45	0.38	0.31	0.24
0	1.51	1.31	0.98	0.87	0.71	0.63	0.53	0.47	0.40	0.33	0.25
0.25	1.65	1.42	1.05	0.93	0.77	0.68	0.55	0.49	0.42	0.35	0.26
0.5	1.51	1.31	1.00	0.89	0.74	0.65	0.55	0.50	0.43	0.36	0.27
0.75	1.41	1.23	0.96	0.85	0.72	0.64	0.53	0.47	0.42	0.34	0.26
1	1.34	1.18	0.92	0.82	0.68	0.61	0.52	0.46	0.40	0.33	0.26
1.5	1.23	1.09	0.87	0.78	0.65	0.58	0.50	0.44	0.39	0.32	0.25
2	1.15	1.02	0.82	0.74	0.62	0.56	0.48	0.43	0.37	0.31	0.24
3	1.04	0.92	0.76	0.68	0.58	0.52	0.45	0.41	0.36	0.30	0.23

13. táblázat: vonalmenti hőátbocsátási tényezők (Nagy Balázs 2015)

Többféle szerkezet típusra is vannak validációs számítások, melyeket ismertetek. Bár a dolgozatomban padlócsomópontokkal foglalkozom, maga a szoftver által használt módszer és differenciálegyenletek megfelelő peremfeltételek és anyagtulajdonságok megadása mellett hasonlóan hiteles eredményt adnak.

5.5.1 Szimulációs eljárás validálása

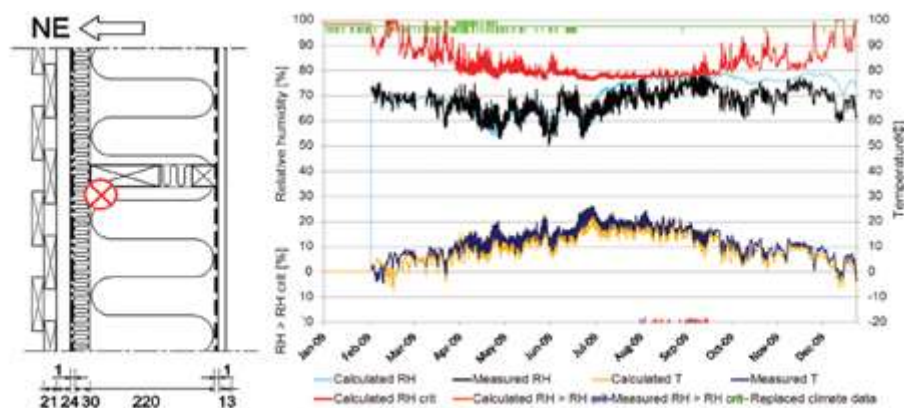
S. Olof Mundt-Petersen és Lars-Erik Harderup [12]-es kutatásában az egydimenziós tranziens hő- és nedvességszámítások validálását végezte. Cikkükben összehasonlították a mért és számított hőmérsékleteket illetve relatív páratartalmakat. A szimulációkat a mérési eredmények ismerete nélkül, vakon készítették. A hőmérséklet, relatív páratartalom méréséhez szükséges szenzorokat az épülő fal különböző helyein, különböző mélységben helyezték el. Ezeknek a pozícióját rajzokkal és fényképekkel dokumentálták. A mért adatokat óránként rögzítették, majd a 3 éves periódus végén, a mérések után, elkészítették a szimulációs modelleket, melyek a készült dokumentáció alapján kerültek kialakításra. Mivel a szimuláció 1 dimenziós, így például a gerendák, párkányok hatását nem vették bele a modellbe. 2012-ben a számítások elkészültek a 2008-2011-es időszakra a mérési eredmények tudta nélkül. Ezeknél a belső és külső időjárás, hőmérsékleti peremfeltételeket mérésekből illetve egy közeli éghajlati állomás adataiból nyerték.

Ez a „vak” validációs eljárás megbízható, hiszen a számított eredmények akaratlagos vagy véletlen igazítása – hogy a mért eredményekhez jobban illő összefüggést kapjunk – lehetetlen.

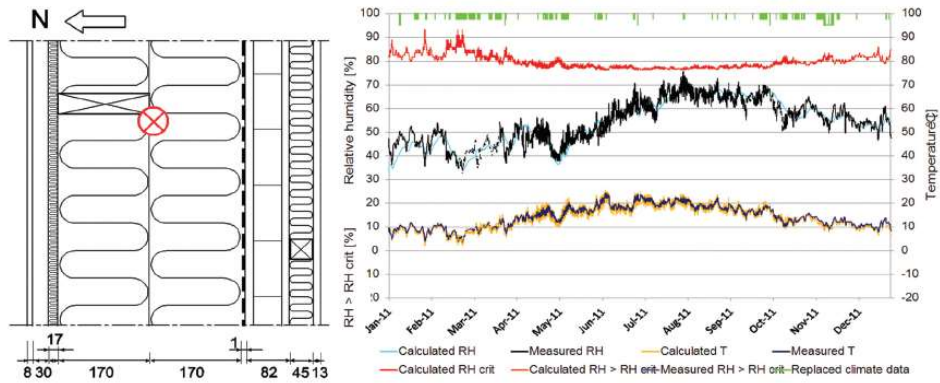
A méréseket 5 különböző faszerkezetű házban végezték, melyek 4 különböző városban találhatóak Svédországban. A szimuláció készítéséhez a WUFI Pro szoftvert használták, annak 5.0 anyagadatbázisával.

A hőmérséklet hatása a relatív páratartalomra:

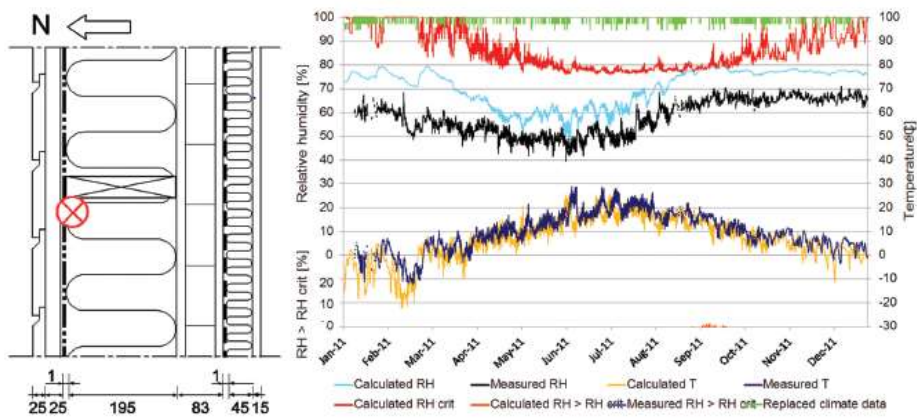
A mért és vakon-kalkulált relatív páratartalmak értékei sok esetben a mért és számított hőmérséklet közötti különbségből erednek pl. a pára tartalma azonos, ám a különböző hőmérsékleti értékek más telítettségi páratartalmat adnak. Ez okozza a mért és számított RH közötti különbségeket. Ez a hatás csaknem minden tanulmányozott szituációban jelen van. Mint a 29-es ábrán látható, a magasabb mért hőmérséklet alacsonyabb relatív páratartalmat eredményez. Ezen az ábrán megfigyelhető egy eltérés, mely főként hideg időszakban, a fal külső oldalán lévő ponton jelentkezik. Ennek egyik oka a gerendák, csavarok okozta hőhid lehet, melyet elhanyagoltak az egydimenziós vizsgálatban. Ez megmagyarázza, hogy a különbség miért a hideg időszakban jelentkezik, illetve a vizsgált pontokhoz is közel van. Hőhidak kétdimenziós vizsgálata azt mutatja, hogy Közép-svédországi klímaadatok mellett a hőmérséklet 0,5- 1°C-al emelkedik, mely a relatív páratartalmat 2,5-5%-al csökkenti a csavar külső oldalán. A szenzor vastagsága 50 mm, ez is befolyásolhatta a hőmérsékletet, itt ugyanis a környező hőszigetelés mérete csökkent, mely növelte a tanulmányozott pontban a hőmérsékletet, különösképp, ha a külső hőmérséklet alacsony.



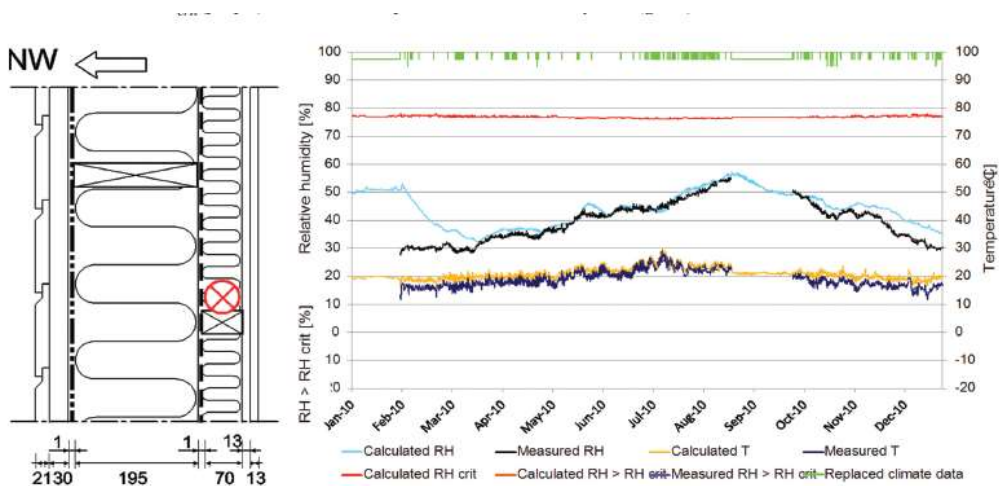
27. ábra: Mért (fekete) és számított (türkiz) relatív páratartalom illetve mért (sötétkék) és számított (sárga) hőmérsékleti adatok összehasonlítása a fal külső részében



28. ábra: Mért (fekete) és számított (türkiz) relatív páratartalom illetve mért (sötétkék) és számított (sárga) hőmérsékleti adatok összehasonlítása a fal közbelső részében



29. ábra: Mért (fekete) és számított (türkiz) relatív páratartalom illetve mért (sötétkék) és számított (sárga) hőmérsékleti adatok összehasonlítása a fal külső részében.



30. ábra: Mért (fekete) és számított (türkiz) relatív páratartalom illetve mért (sötétkék) és számított (sárga) hőmérsékleti adatok összehasonlítása a beépített rétegben, a párazáró fólia mögött

Habár az összes diagram nem elérhető, elmondható, hogy a 85 összehasonlítás közül a legtöbb olyan jó korrelációt mutat, mint a 27-28-es ábra, tehát megfelelően használhatóak az eredmények, esetükben a penészképződés előrejelzésére. Kijelenthető továbbá, hogy a WUFI Pro alkalmas eszköz lehet például faszerkezetű házak nedvesség okozta kockázatainak előrejelzésére, habár meg kell említeni, hogy:

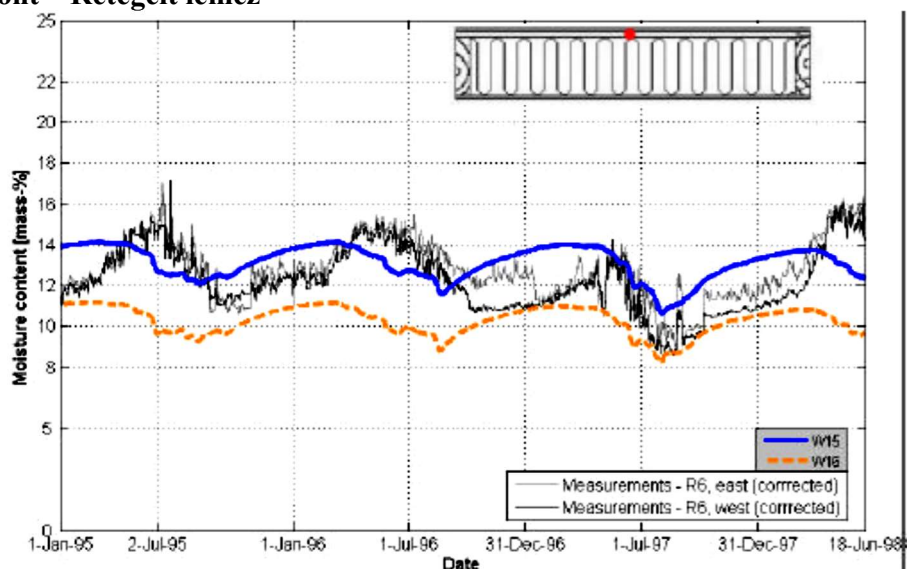
- a hőmérséklet okozta különbségeknek nagy hatása lehet a relatív páratartalomra
- elengedhetetlen, hogy megbízható időjárási adatokat használjunk
- az egydimenziós modell természetesen nem nyújt minden problémára megoldást

Mikkel Oustad, Arild Gustavsen és Sivert Uvsløkk [14]-es cikkében az 1994-1998 közötti időszak külső és belső klímaadatait rögzítették, a hőmérsékleti és nedvességtartalomra vonatkozó adatokat pedig a tető és falelemek különböző pontjaiban mérték ugyanabban a periódusban. A mérések eredményeit 1 és 2 dimenziós kapcsolt hő- és páratechnikai szimulációval (WUFI 1D és WUFI 2D) vetették össze.

A vizsgált ház Trondheimben, Norvégiában található, mely acélkeretre rögzített eltávolítható fal és tetőelemekből áll. A ház padlófűtéssel, szellőztetéssel, mesterséges párasítással felszerelt (belső feltételek biztosítása végett, 23 °C és 50 % RH).

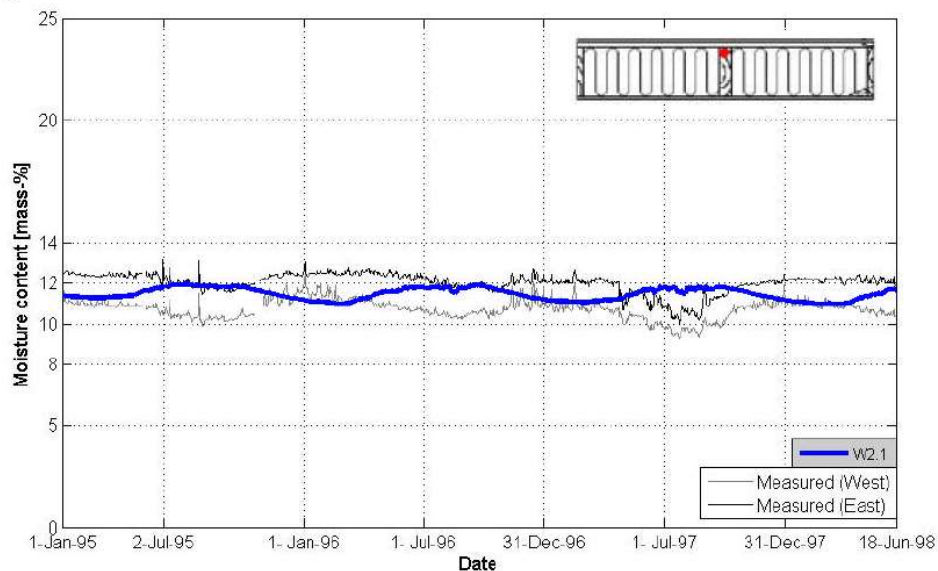
A ház tetőszerkezetének 8 részét vizsgálták, a faanyagok kezdeti neveltség-tartalma 60% RH volt, ezt használták a legtöbb szimulációban, ám 80% mellett is futtattak vizsgálatokat, hogy meghatározzák a kezdeti bemenő feltételek bizonytalanságából fakadó hatásokat.

R6 csomópont – Rétegelt lemez



31. ábra: Rétegelt lemez nedvességtartalma, WUFI 1D és mért adatok összehasonlítása

Némelyik modell esetén egészen nagy eltérés volt a mért rétegelt lemez nedvességtartalmának értékeiben, különösen az R6-os csomópontnál. Itt a nedvességtároló képesség adatai nagy hatással voltak az eredményekre, főként a teljes nedvességtartalomra vonatkozóan. Ez az a bemenő paraméter, ami a legnagyobb eltéréseket okozta és hangsúlyozza a pontos anyagtulajdonságok ismeretének fontosságát a hőtechnikai szimulációk során.



32. ábra: Szarufában lévő nedvességtartalom, a mért eredmények és a WUFI 2D szimuláció összehasonlítása

A szarufában mért nedvességtartalom inkább konstansnak tekinthető a teljes periódus során. Ez összhangban van a WUFI 2D-vel számított eredményekkel, habár kissé eltolódtak a fázisok. Az alsó mérési pontok és a számított értékek egészen jó egyezést mutatnak a csúcsonál, az eltérés főleg a téli időszakban látható, amikor a számított értékek körülbelül 7 m%-ra csökkentek, a mért értékek pedig 8-9 m%-nál stabilizálódtak. Kontroll méréseket végeztek utólag ugyanazzal a felszereléssel, amelynek az eredményei bizonyítják, hogy a 7-8 m%-os nedvességtartalom túl alacsony a készüléknek, ami azt jelenti, hogy a mért és számított értékek közötti különbség nem olyan nagymértékű, mint az az ábrán látható.

Eredmények összefoglalása

A mintaházat 1994. október 1-én szerelték össze, de a mérések, csak 1995. január 1-jétől indultak. Így az eredmények összehasonlítása is csak ebben az időben kezdődhetett.

Nehéz megfelelően értékelni egy olyan szerkezet modelljét, melynek bemeneti és tapasztalati értékeiben is van valamilyen mértékű bizonytalanság. Így nehéz megmagyarázni a mért és számított nedvességtartalom közötti különbségeket, valószínűleg az

anyagtulajdonságok okozhatták a legnagyobb mértékű hatást az eltérésekben, továbbá a kezdeti nedvességtartalom szintén hatással volt az anyag viselkedésére.

A WUFI 1D/2D hasznos eszköz a kapcsolt hő-és páratechnikai szimulációk készítéséhez, habár a kétdimenziós modell sokkal pontosabb eredményeket ad. Ha kezdeti adatok nagymértékű bizonytalansággal rendelkeznek, célravezetőbb lehet a tendenciák tanulmányozása, mintsem konkrét numerikus értékek figyelembe vétele az számítási eredményeknél. A kulcs mindenképpen az, hogy a higrotermikus tulajdonságok pontosságát biztosítsuk az adott szerkezeti elemre.

5.5.2 Vizsgált változatok

A szimuláció során összesen 30 féle változatot készítettem, az alábbi táblázatban látható a készített szimulációk konfigurációja.

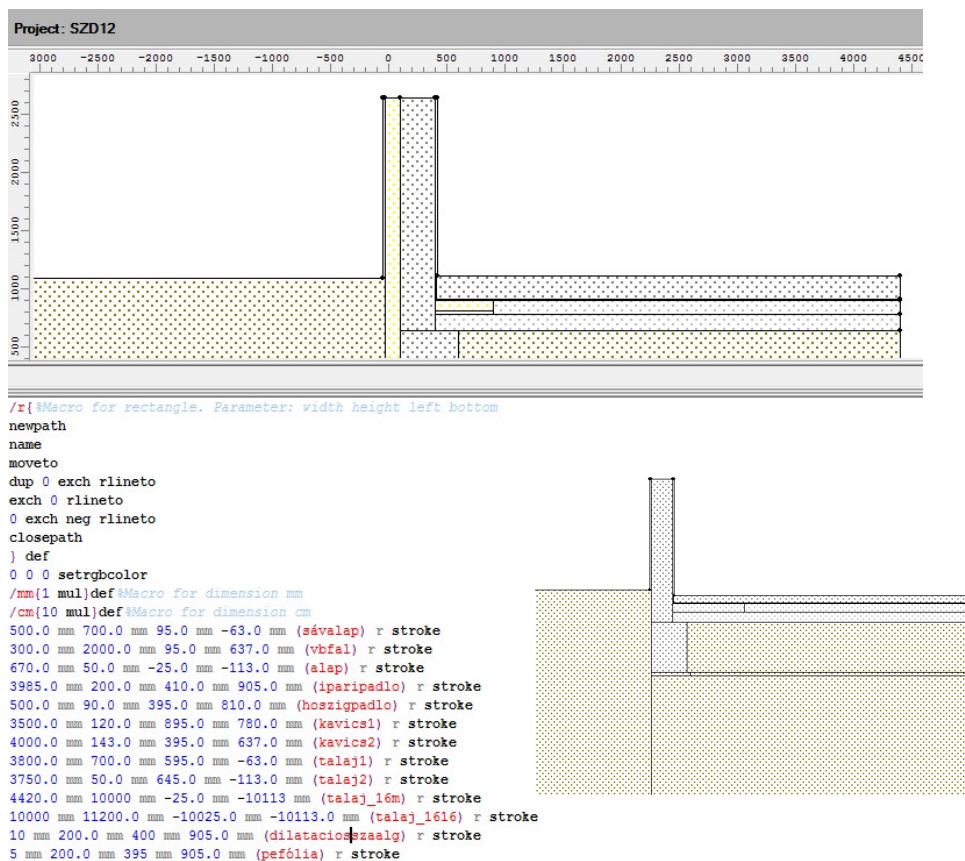
	Padló hőszig 0	Padló hőszig 9 cm	Padló hőszig 5 cm	Padló 50 cm	Padló 100 cm	Fal hőszig 0	Fal hőszig 6 cm	Fal hőszig 12 cm	Padló 10cm	Padló 20 cm
SZD1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SZD2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SZD3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SZD4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SZD5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SZD6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SZD7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SZD8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SZD9	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SZD10	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SZD11	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SZD12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SZD13	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SZD14	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SZD15	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SZD16	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SZD17	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SZD18	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SZD19	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SZD20	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SZD21	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SZD22	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SZD23	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SZD24	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SZD25	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SZD26	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SZD27	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SZD28	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
SZD29	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
SZD30	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

33. ábra: szimulációs modellek változatai

A változatok kialakítása során arra törekedtem, hogy a 4 féle változtatható paraméter összes kombinációját elkészítsem. Változtattam a falon lévő hőszigetelés vastagságát, a padló hőszigetelésének vastagságát és szélességét, illetve az ipari padló vastagságát. A táblázat segíti a variációk átláthatóságát, illetve az eredmények értékelésénél egyszerűen kiválasztható az adott konfiguráció.

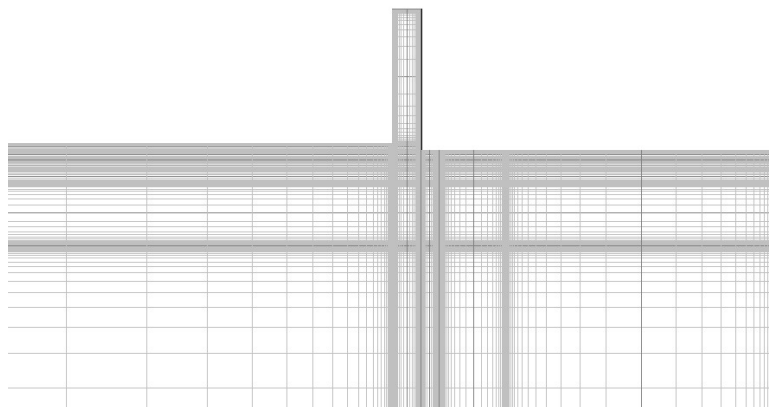
5.5.3 Bemeneti adatok

A szimuláció készítése során első lépésben meg kellett adnom a csomópont geometriai kialakítását, mely az alábbi ábrán látható, a 30 cm-es vasbeton fal elé hőszigetelés kerülhetett, továbbá külső és belső vakolat 2-2 cm vastagságban. A csomópontot alulról 10 m mély földréteg határolja, összesen pedig 14 m széles földdarabot vizsgáltam.



34. ábra: 2 dimenziós modell geometriai kialakítása

A WUFI 2D szoftverben a geometriát csak téglalapok segítségével, paraméteresen lehet definiálni. Tehát a csomópontok megtervezése után, minden elemet fel kellett bontani téglalapokra és koordinátáinként bevinni az adott elem méreteit, elhelyezkedését. A háló generálását a program automatikusan elvégezte, természetesen ezt lehet manuálisan is sűríteni, de a generált háló megfelelőnek bizonyult a szimuláció során.



35. ábra: modell hálógenerálása

Következő lépésként az anyagtulajdonságok beállítására volt szükség. Az ipari padló kivételével minden anyaghoz a beépített anyagok tulajdonságait használtam, mindkét oldalra cementes vakolatréteg, 0,03 W/mK hővezetési tényezőjű XPS hőszigetelés, valamint homokos agyag talajréteg került kiválasztásra

WUFI: Material Editor

Layer/Material Name *Iparipadló

Material Data | Info

Basic Values

Bulk density [kg/m ³]	2427
Porosity [m ³ /m ³]	0,0445
Specific Heat Capacity, Dry [J/kgK]	832,4
Thermal Conductivity, Dry .10°C [W/mK]	1,96
Water Vapour Diffusion Resistance Factor [-]	128,5

Approximation Parameters

Moisture-dep. Thermal Cond. Supplement [%/M.-%]	8,0
Temp-dep. Thermal Cond. Supplement [W/mK ²]	0,0002

Typical Built-In Moisture [kg/m³] 154

Color

Hygrothermal Functions

- Moisture Storage Function
- Liquid Transport Coefficient, Suction
- Liquid Transport Coefficient, Redistribution
- Water Vapour Diffusion Resistance Factor, moisture-depend
- Thermal Conductivity, moisture-dependent
- Thermal Conductivity, temperature-dependent
- Enthalpy, temperature-dependent

Graph | Edit Table | from File...

Relative Humidity [-]	Water Content [kg/m ³]
0.0	0
0.2	~5
0.4	~10
0.6	~15
0.8	~25
0.9	~40
1.0	~100

Paste into Material Database | Import... | Export... | OK | Abort | Help

36. ábra: ipari padló anyagtulajdonságainak megadása

Az ipari padló részletes anyagtulajdonságait az előzőleg ismertetett mérési eredmények alapján vittem be a rendszerbe. A lehetséges változatok közül a 27,5 kg/m³-es szálerezősítésű minták adatait választottam ki. A képen láthatóak a megadott higrotermikus paraméterek:

- testsűrűség
- porozitás
- fajlagos hőkapacitás
- nedvességtároló képesség
- nedvességtranszport tényezők
- páradiffúziós ellenállási szám
- nedvességtől és hőmérséklettől függő hővezetési tényező

WUFI: Material Editor

Layer/Material Name *paripadlo

Material Data | Info

Basic Values

Bulk density [kg/m3]	2427
Porosity [m3/m3]	0,445
Specific Heat Capacity, Dry [J/kgK]	832,4
Thermal Conductivity, Dry, 10°C [W/mK]	1,96
Water Vapour Diffusion Resistance Factor [-]	128,5

Approximation Parameters

Moisture-dep. Thermal Cond. Supplement [%/M.-%]	8,0
Temp-dep. Thermal Cond. Supplement [W/mK2]	0,0002

Typical Built-In Moisture [kg/m3] 154

Color

Hygrothermal Functions

- Moisture Storage Function
- Liquid Transport Coefficient, Suction**
- Liquid Transport Coefficient, Redistribution
- Water Vapour Diffusion Resistance Factor, moisture-depend
- Thermal Conductivity, moisture-dependent
- Thermal Conductivity, temperature-dependent
- Enthalpy, temperature-dependent

Graph | Edit Table | from File...

Generate

No.	Water Content [kg/m3]	DWS [m2/s]
1	0,0	7,80E-12
2	5,31	1,12E-11
3	10,62	1,61E-11
4	20,59	3,168E-11
5	40,61	1,238E-10
6	101,5	7,80E-9

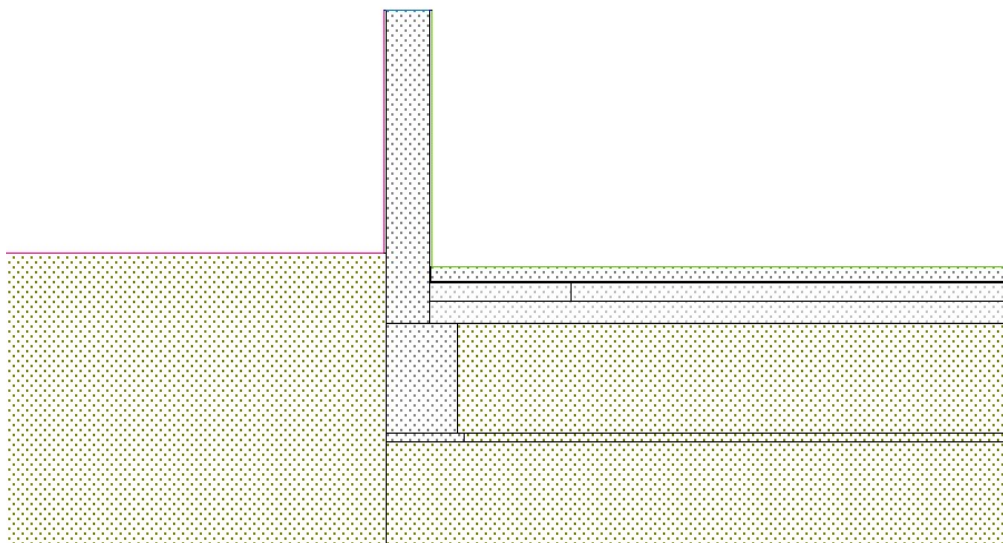
New | Delete | Copy | Insert

Paste into Material Database | Import... | Export... | OK | Abort | Help

37. ábra: ipari padló anyagtulajdonságainak megadása - nedvességtranszport tényező

Érdeemes megemlíteni a korábban említett kétféle nedvességtranszport tényezőt, ezt a WUFI külön kezeli a peremfeltételektől függően (van csapadék/nincs csapadék).

5.4.4 Peremfeltételek



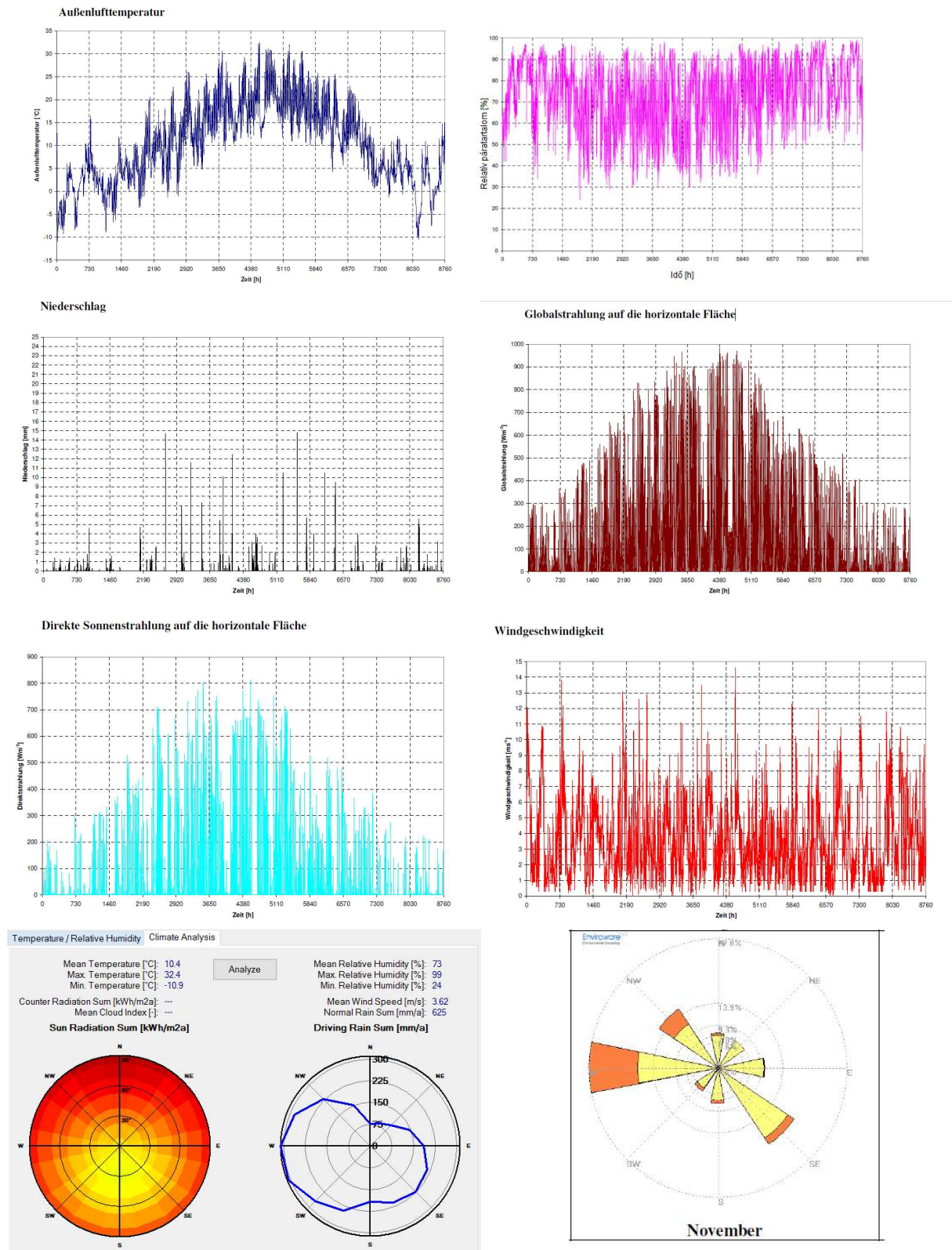
38. ábra: határoló részek peremfeltételeinek megadása

A peremfeltételeket minden határoló részre meg kellett adnom. Itt többek között a klímaadatok kiválasztása volt a legfontosabb feladat.

A szoftvernek részletes meteorológiai adatokra volt szüksége, óránkénti bontásban:

- csapadék
- napsugárzás
- hőmérséklet (külső és belső)
- relatív páratartalom (külső és belső)
- légköri nyomás [hPa], igaz ennek csupán kis hatása van a számításra, a szimulációs időtartamra elegendő megadni egy középértéket
- légköri sugárzás értéke

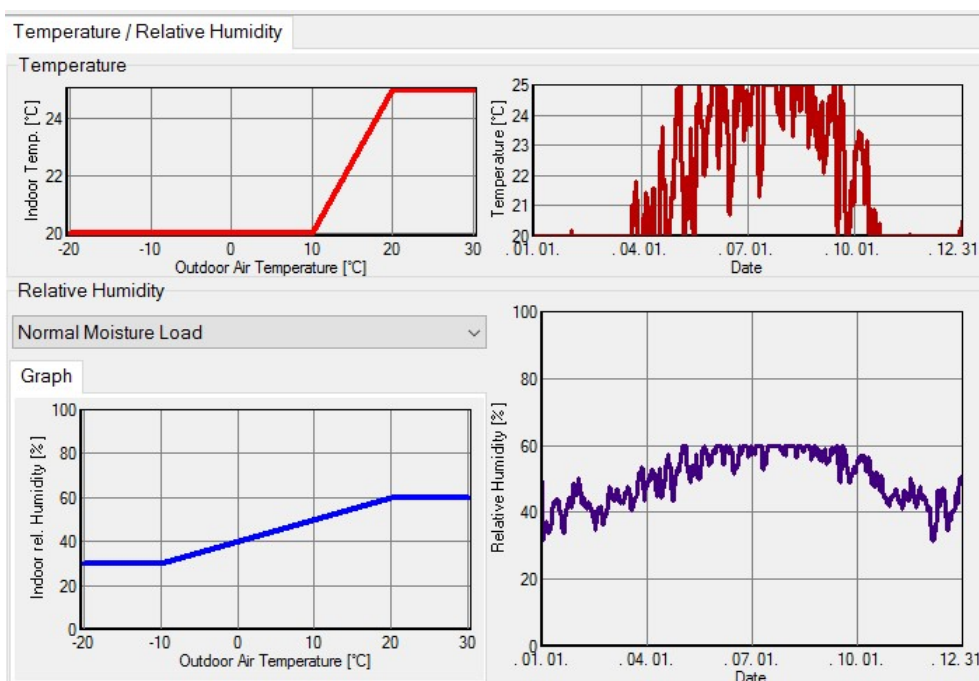
A WUFI számos ország, város klímaadatait tartalmazza, ám lehetőség van más forrásból szerzett vagy akár mért adatok átkonvertálására és megadására. Mivel nem voltak magyarországi adatok a programban, így Bécs klímaadatait választottam a szimuláció során.



39. ábra: Bécs klímaadatai

A fenti ábrákon látható a külső hőmérséklet, relatív nedvességtartalom, csapadék, globális sugárzás, közvetlen napsugárzás, szélesség, szélirányok időbeli alakulása, ezeket alkalmazta a program a szimuláció során.

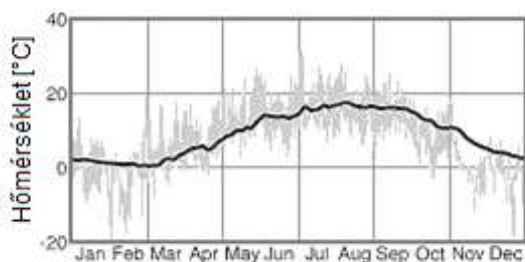
A belső hőmérsékleti adatok az MSZ EN 15026:2007 szabvány alapján kerültek felvételre.



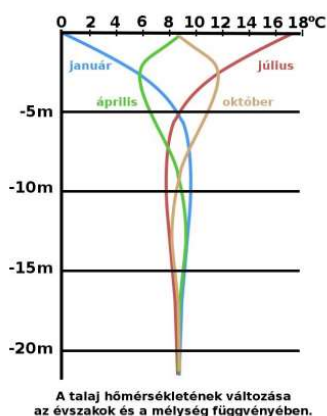
40. ábra: belső hőmérséklet és nedvességterhelés

A föld alatti termikus paraméterek

A talajban a külső levegő változása erősen csillapított. A 41-es ábra megmutatja, hogy a földben, 1m-es mélységben mért hőmérsékleti adatok hogyan viszonyulnak a külső levegő hőmérsékletéhez. Ebben a mélységben a napi ingadozások figyelmen kívül hagyhatóak, továbbá egy pár hetes fáziseltolódás figyelhető meg a külső levegő hőmérsékletével szemben, ez főként tavasszal és ősszel látható leginkább. A szimuláció során konstans 9 °C-nak feltételeztem a talaj hőmérsékletét a 42. ábra alapján. A talaj tulajdonságainál meg kell említeni, hogy a készített szimulációimban azért esett a választás a homokos agyagra, mivel más típusú talajok nedvességtartalom függvénye túl meredeken emelkedett, és a futtatás során konvergenciahibához vezetett.



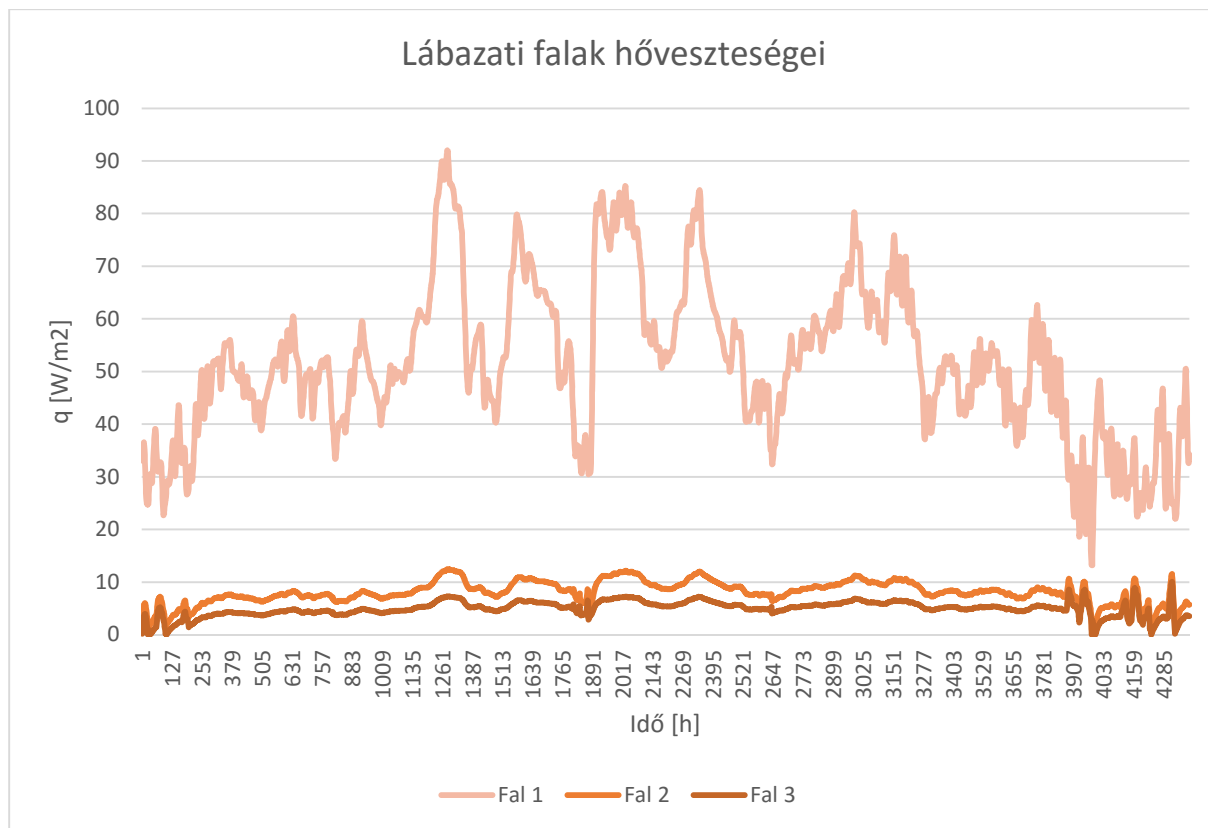
41. ábra: Talaj és külső hőmérséklet alakulása



A talaj hőmérsékletének változása az évszakok és a mélység függvényében.

42. ábra: talaj hőmérséklete különböző mélységben

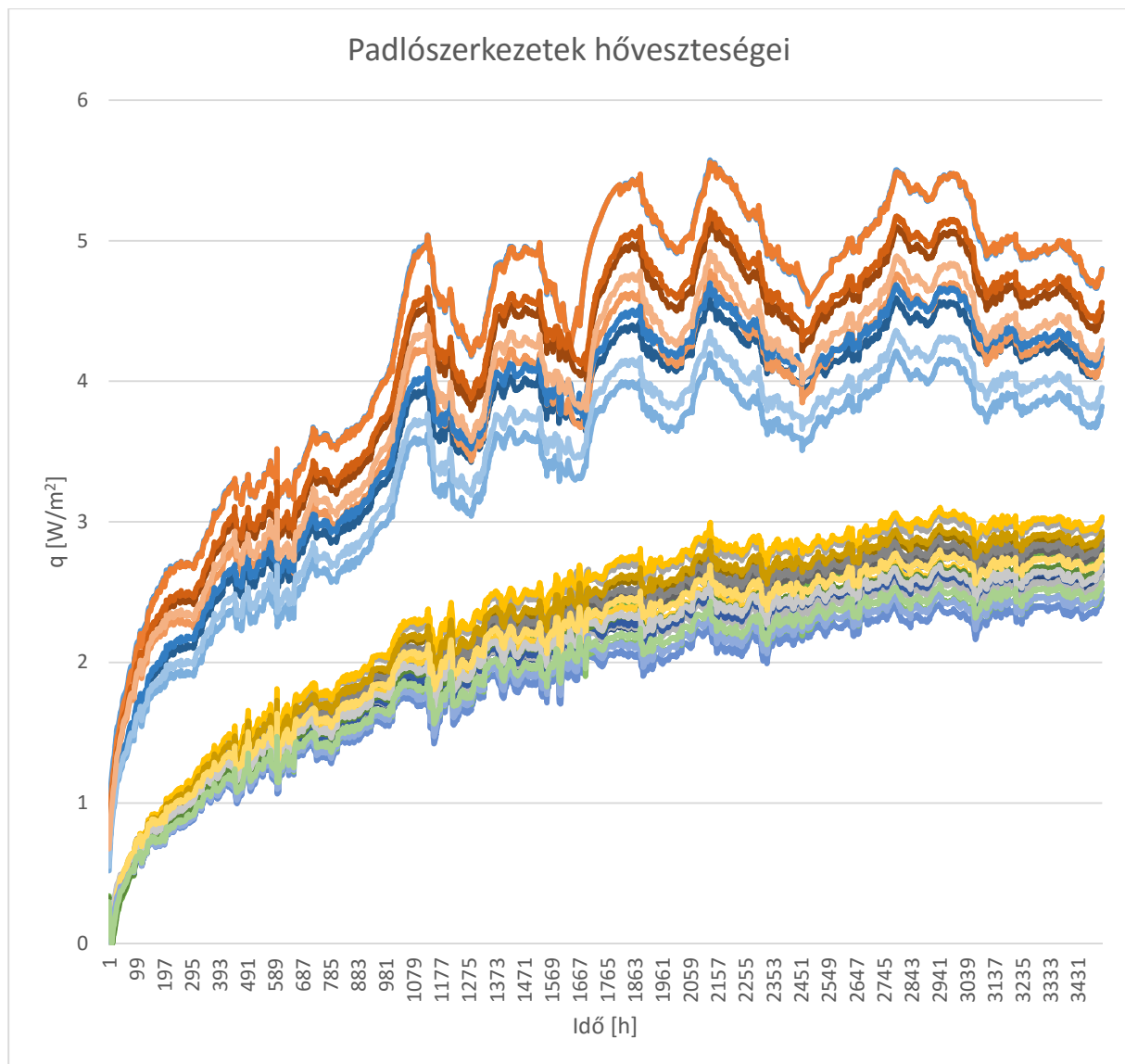
6. Kétdimenziós szimulációk eredményei



43. ábra: lábazati falak hőveszteségei

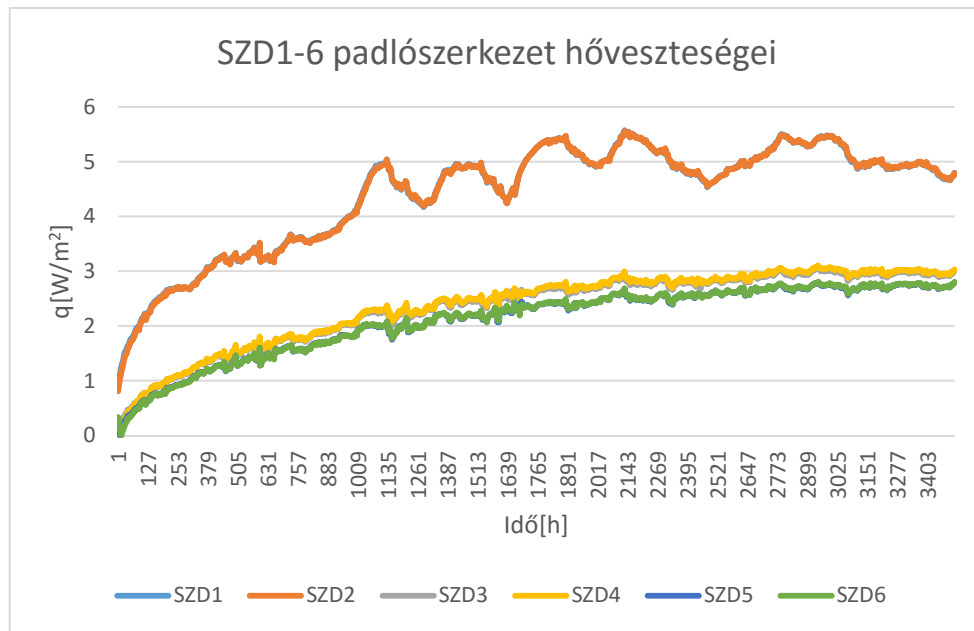
Ez az ábra mutatja meg a lábazati fal belső felületén mért hőveszteségeket, mivel 3-féle modellt alkalmaztam a lábazat esetén (0, 6 cm, 12 cm hőszigetelés) így minden lekért szimulációban ugyanazokat az eredményeket kaptam azonos lábazattípus esetében. Ezek alapján a hőszigetelés nélküli lábazat esetén jelentős hőveszteségeket kaptam, amennyiben a lábazati falat hőszigeteléssel láttuk el, úgy ez az érték nagymértékben csökkent, a szigetelés vastagsága miatt viszont már csak kisebb mértékű különbségek láthatóak.

A hőszigetelés nélküli változatnál a fal belső felületén mért legnagyobb negatív hőáramsűrűség elérheti akár a 92 W/m^2 -t, míg a hőszigeteléssel ellátott esetben ez csupán $10\text{--}13 \text{ W/m}^2$ a hőszigetelés vastagságától függően, illetve a szigetelés nélküli esetben a legkisebb hőveszteség is nagyobb értékű, mint a hőszigeteléssel ellátott esetek maximális hővesztesége. Ez azt jelenti, hogy egy jól megválasztott hőszigeteléssel csökkenthető majdnem 90%-al a lábazati falon keletkező hőveszteség.



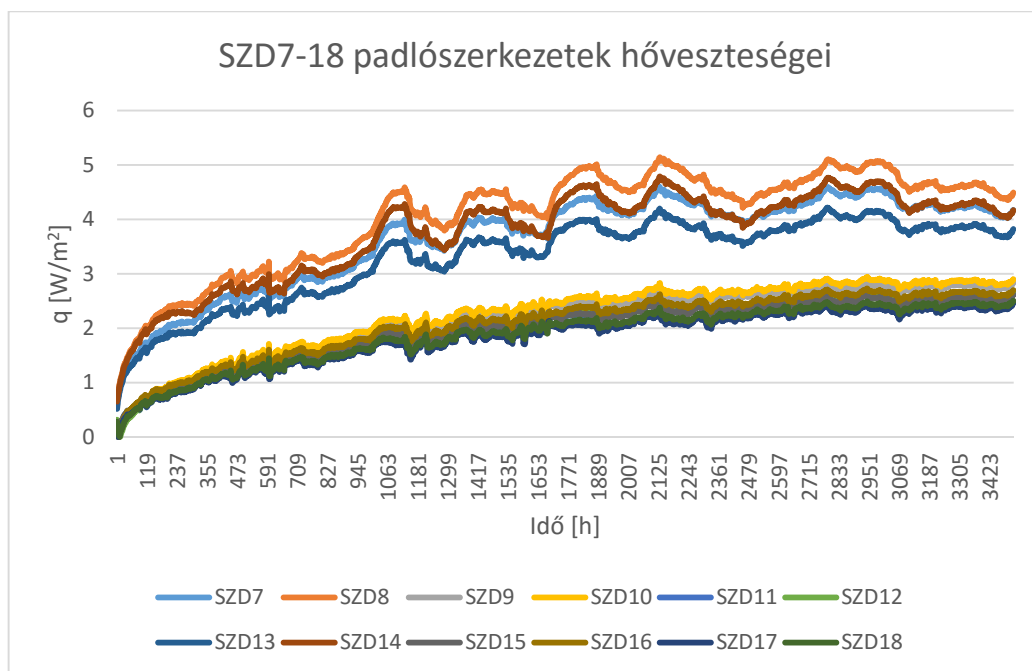
44. ábra: padló hőveszteségei

A fenti ábrán látható a szimuláció összesített eredménye. A képen látható görbék a padlószervezeten mért hőáramsűrűségek abszolút értékét mutatják. Az összesített diagram alapján megfigyelhető, hogy a hőveszteségek két nagyobb csoportba sorolhatóak, a további ábrákon ismertetem részletesen a szimulációk eredményeit.



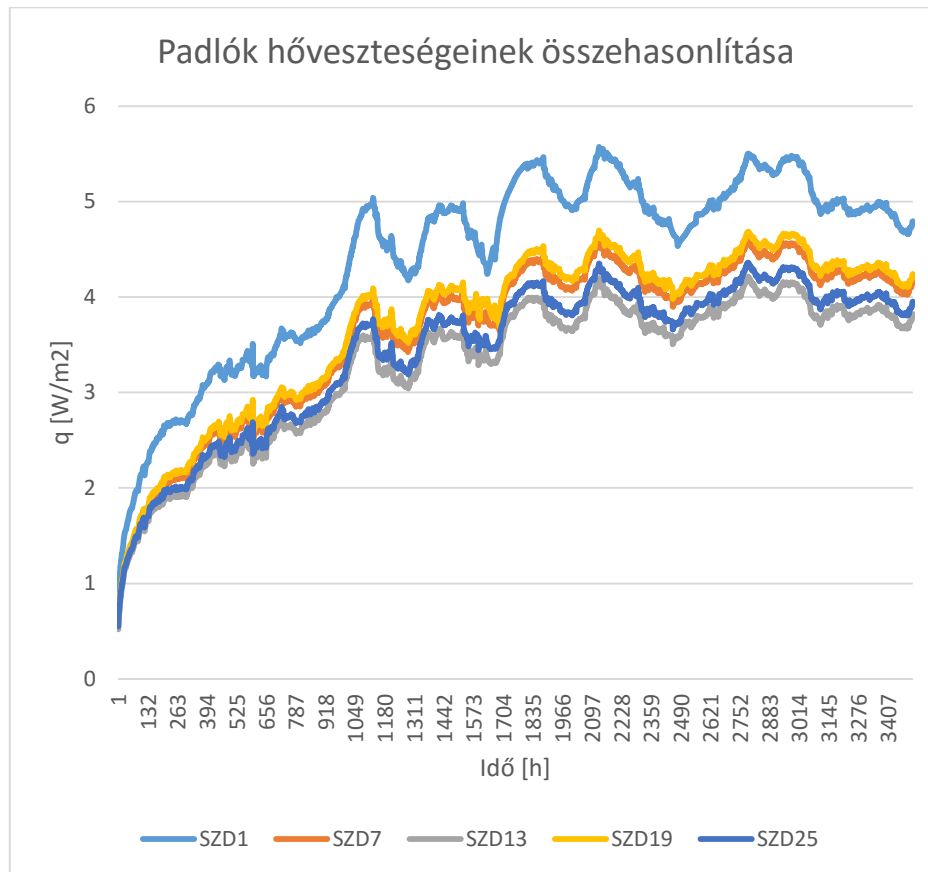
45. ábra: SZD1-SZD6 modellek eredményei

A 45-ös ábrán láthatóak az SZD1-SZD6 modellek eredményei. Bár 6 modell hővesztesége látható a padlón, mégis 3 csoportot látunk az ábrán. Ezek a lábazati falon lévő hőszigetelésnek megfelelően rendeződnek, az SZD1-SZD2 részén nincs hőszigetelés, az SZD3-SZD4 esetében 6 cm, míg az SZD5-SZD6-os modellnél 12 cm hőszigetelés található. Itt nincs hőszigetelve a padló, csupán a padló vastagsága változik az egyes modelleknél. Megfigyelhető, hogy a lábazati falon lévő hőszigetelés alkalmazása viszonylag nagymértékben befolyásolja a padló hőveszteségeit.



46. ábra: SZD7-SZD18 modellek eredményei

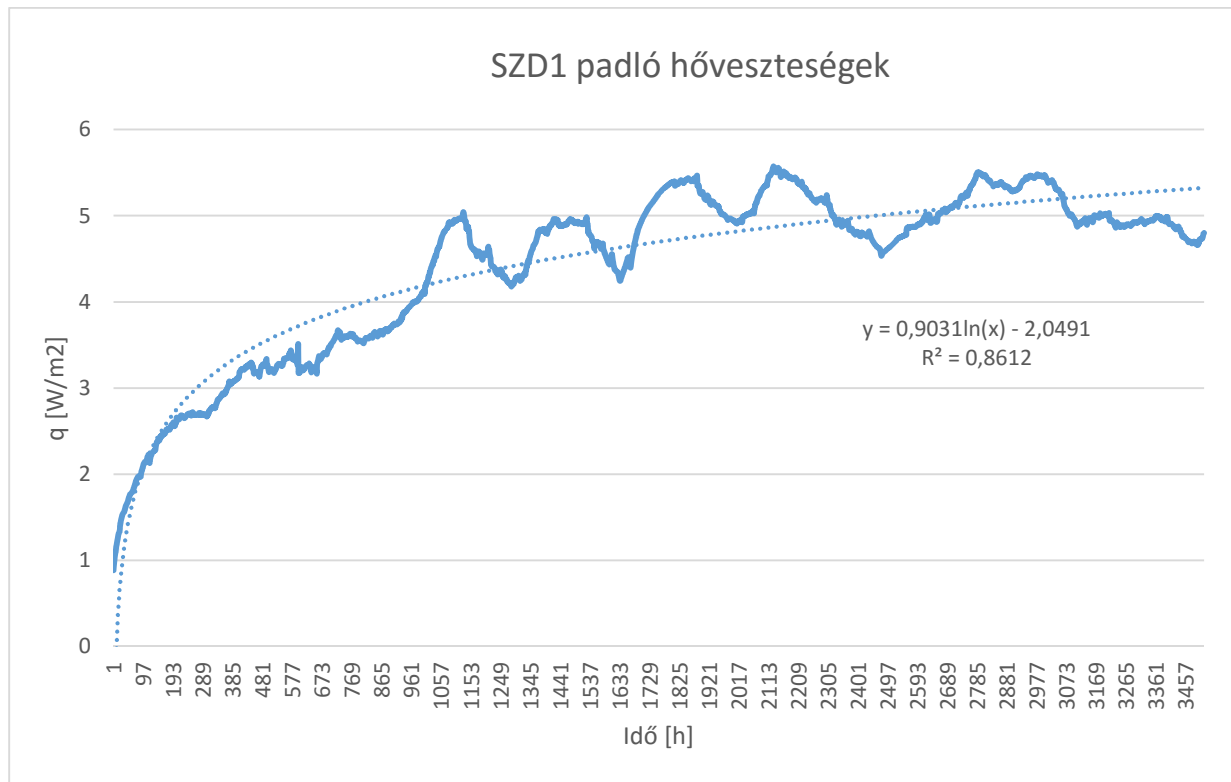
A 46-os diagram az SZ7-SZD18-as konfigurációkat mutatja be, itt már minden esetben kapott a padló is hőszigetelést. A felső csoportban azok az értékek láthatóak, ahol a lábazat nincs hőszigetelve (SZD7-8; SZD13-14). A 2-2 változat között csak a padló vastagsága az egyetlen különbség.



47. ábra: SZD1-7-13-19-25 modellek eredményei

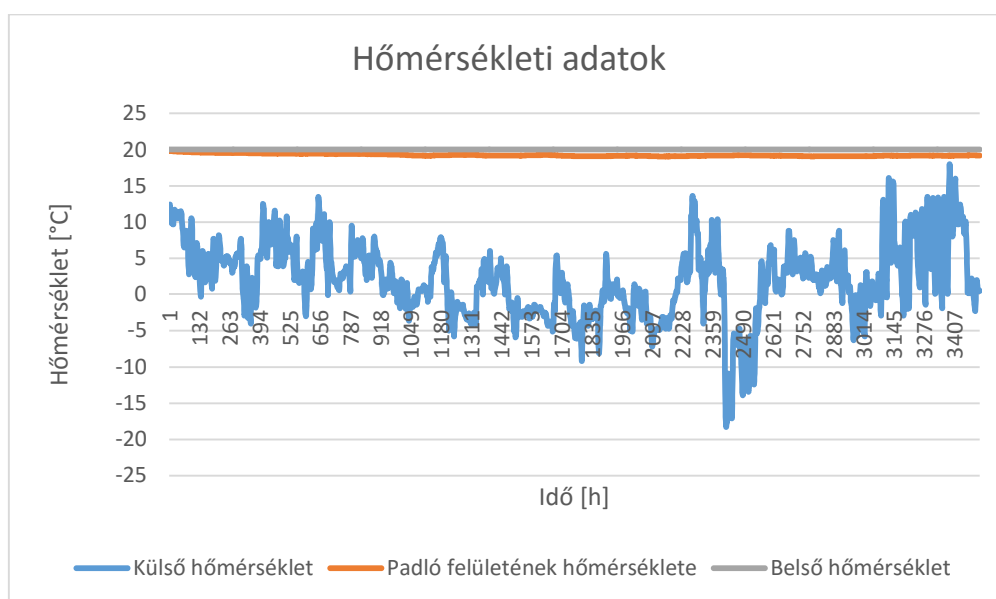
Ezen a diagramon az 1-7-13-19-25-ös modellvariációk eredménye látható. Ezek ugyanazt a konfigurációt mutatják be: a lábazati falon nincs hőszigetelés, a padló 20 cm vastagságú, a szimuláció változó paramétereit a padlón lévő hőszigetelés vastagsága és szélessége adja. Megfigyelhető, hogy a hőveszteségek látványosan kisebbek abban az esetben, ha 1 méter szélességben alkalmazunk hőszigetelést a lábazat mellett (SZD13 és SZD25), a hőszigetelés vastagsága (SZD7 és SZD19) azonban csak kisebb mértékben befolyásolja a hőveszteségek mértékét.

A részletes elemzéshez az SZD1 és SZD10 változatot választottam ki.

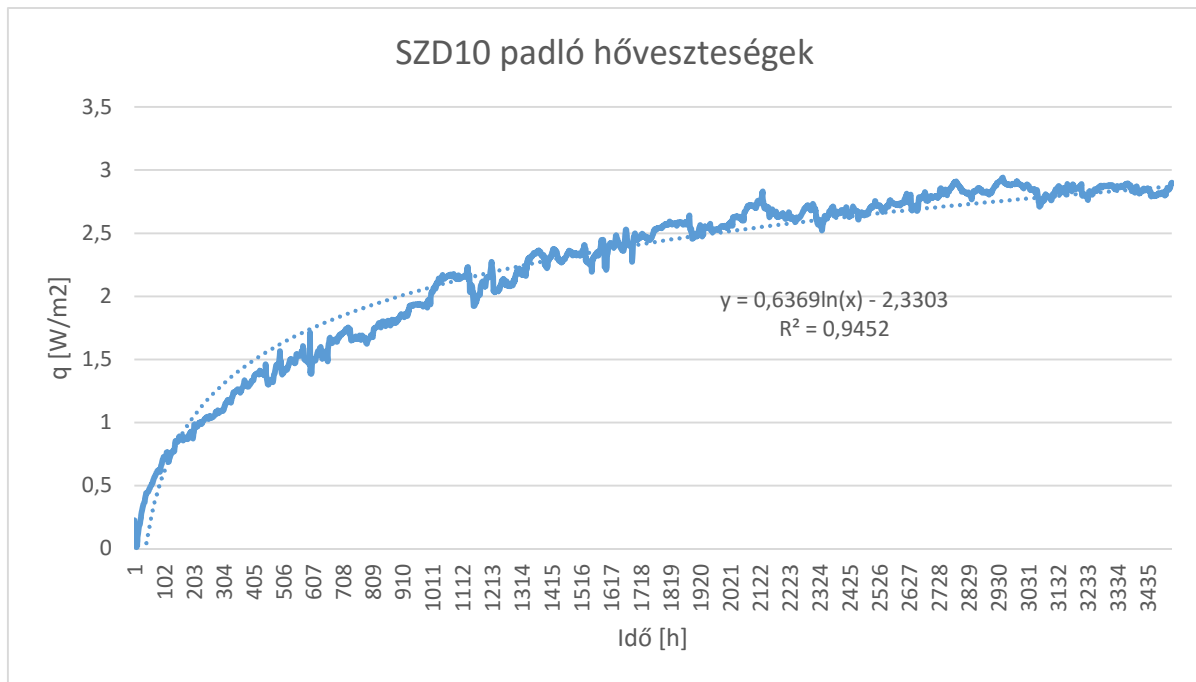


48. ábra: SZD1 modell hőveszteségei

Megfigyelhető, hogy a hőveszteségek értéke nagyban függ a külső hőmérséklettől, mivel a lábazati fal nincs hőszigetelve, illetve az értékek a természetes alapú logaritmus közelítőfüggvényét követik. A lenti ábrán a külső és belső hőmérséklet illetve a padló felületi hőmérséklete látható.

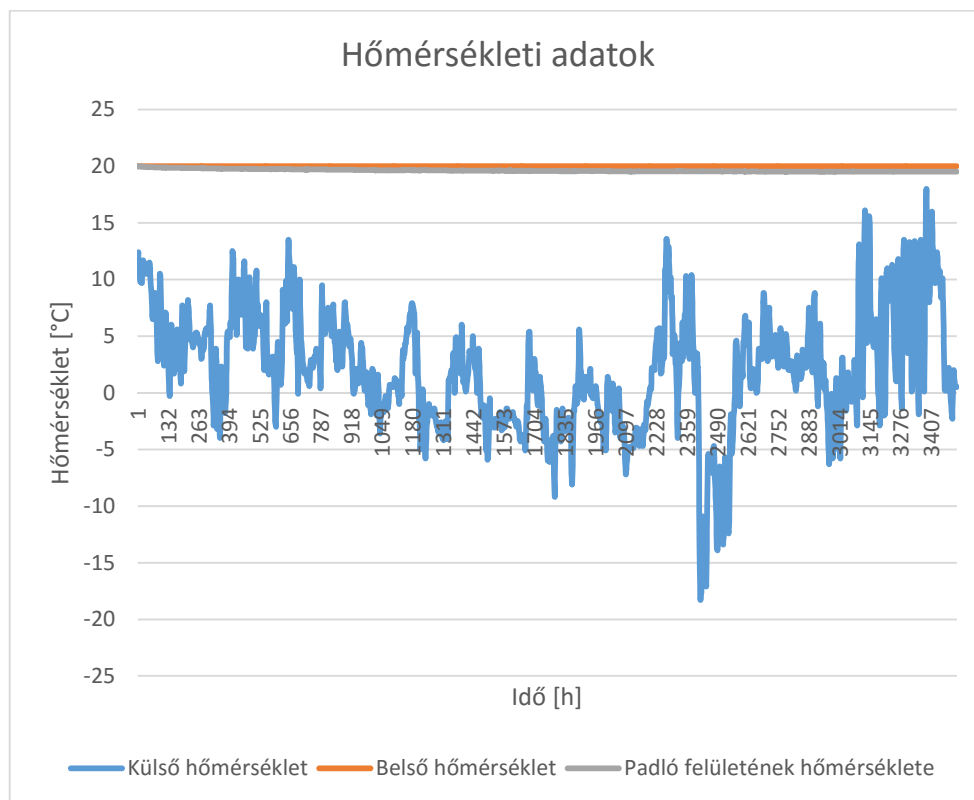


49. ábra: Hőmérsékleti eloszlás az SZD1 modell esetén

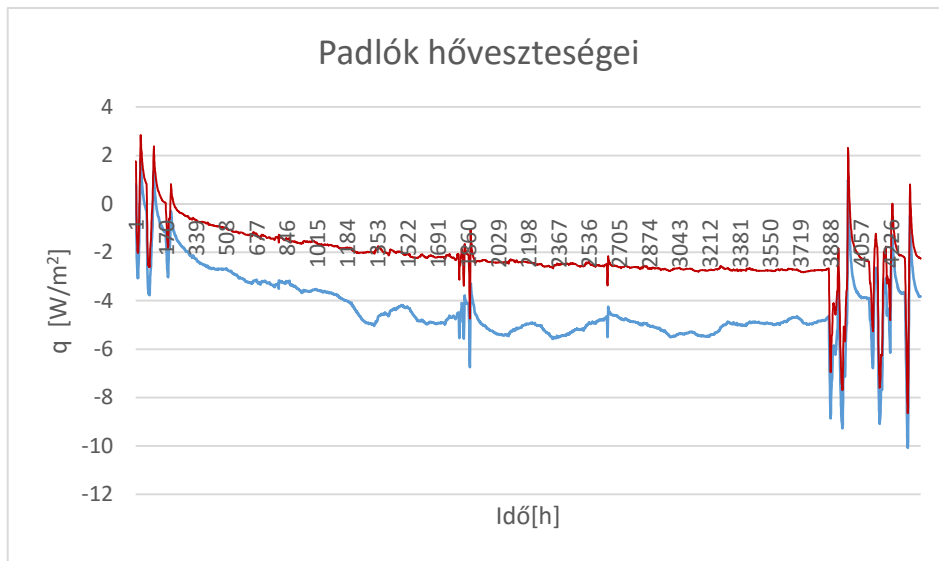


50. ábra: SZD10 modell hőveszteségei

Ebben az esetben a hőveszteség sokkal kevésbé függ a külső hőmérséklettől, mivel itt már 6 cm hőszigetelést alkalmazunk a lábazon, ennél a modellnél az értékek nagyon jól közelítik a természetes logaritmus közelítőfüggvényét.

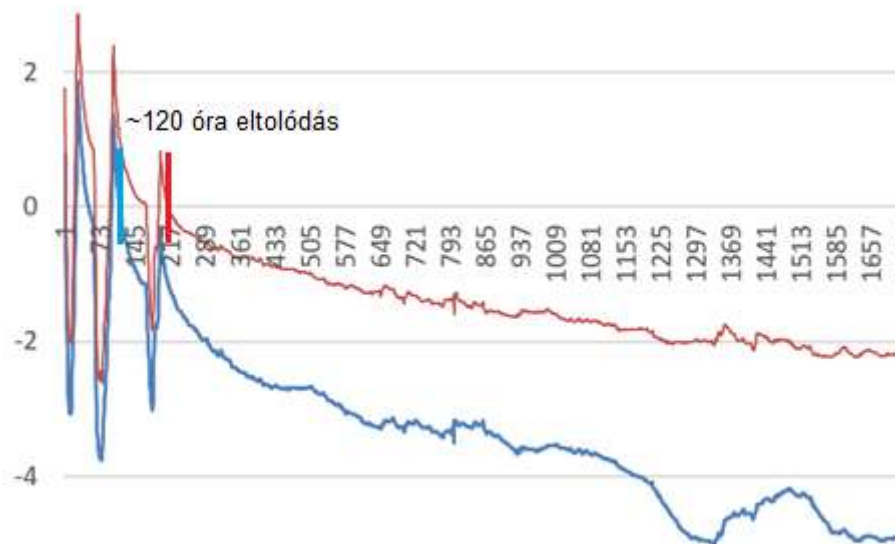


51. ábra: SZD10 hőmérsékleti adatok



52. ábra: Padlón mért hőáramok

Ezen az ábrán az október 15-től április 15-ig a padló belső felületén lekért hőáramok láthatóak, a szimuláció alkalmas arra, hogy meghatározzuk, az adott klímaadatok alapján mikor kezdődik a fűtési idény. Ez padlószerkezetek esetében akkor kezdődik, amikor már csak negatív hőáramsűrűségek jelennek meg a padlón. Érdeemes megfigyelni, hogy a fűtési idény kezdetét, nem csak a hőmérsékleti adatok befolyásolják, hanem a szerkezeti kialakítás is, a fűtési idény eltolódhat akár 120 órát is, az alkalmazott hőszigetelések függvényében.



53. ábra: Fűtési idény eltolódása

	SZD1	SZD2	SZD3	SZD4	SZD5	SZD6	SZD7	SZD8	SZD9	SZD10
Átlagos hővesztés [W/m ²]	4,423	4,421	2,339	2,368	2,113	2,116	3,649	4,064	2,161	2,234
Minimum [W/m ²]	0,885	0,813	0,000	0,012	0,001	0,001	0,610	0,693	0,003	0,012
Maximum [W/m ²]	5,574	5,557	3,061	3,102	2,805	2,811	4,602	5,142	2,848	2,940
Transzmissziós hővesztés [kWh/m ² , a]	15,556	15,547	8,226	8,328	7,432	7,442	12,834	14,292	7,601	7,858

14. táblázat: Hővesztések összegzése I.

	SZD11	SZD12	SZD13	SZD14	SZD15	SZD16	SZD17	SZD18	SZD19	SZD20
Átlagos hővesztés [W/m ²]	1,974	2,012	3,309	3,761	1,978	2,071	1,814	1,871	3,734	4,136
Minimum [W/m ²]	0,003	0,007	0,518	0,653	0,006	0,004	0,001	0,011	0,590	0,716
Maximum [W/m ²]	2,656	2,689	4,215	4,787	2,618	2,730	2,456	2,507	4,699	5,222
Transzmissziós hővesztés [kWh/m ² , a]	6,941	7,077	11,639	13,227	6,957	7,285	6,379	6,579	13,133	14,545

15. táblázat: Hővesztések összegzése II.

	SZD21	SZD22	SZD23	SZD24	SZD25	SZD26	SZD27	SZD28	SZD29	SZD30
Átlagos hővesztés [W/m ²]	2,193	2,261	1,999	2,033	3,442	3,876	2,039	2,124	1,865	1,915
Minimum [W/m ²]	0,001	0,012	0,005	0,005	0,549	0,675	0,001	0,012	0,009	0,002
Maximum [W/m ²]	2,887	2,973	2,685	2,714	4,361	4,921	2,693	2,799	2,521	2,565
Transzmissziós hővesztés [kWh/m ² , a]	7,713	7,952	7,030	7,152	12,104	13,632	7,171	7,472	6,558	6,735

16. táblázat: Hővesztések összegzése III.

A fenti összefoglaló táblázatokban ismertetem az egyes szimulációk során kapott hővesztések minimális, maximális, átlagos értékét, illetve a fűtési idényre vonatkozó transzmissziós hővesztéseket. Várhatóan az első, teljes szigetelés nélkülözésével készült modell adta a legnagyobb transzmissziós hővesztést, míg a mindenhol a lehető legnagyobb vastagságban hőszigetelt modell esetén lett a legkisebb ez az érték.

A maximális hővesztések jelentősen nagyobbak azokban az esetekben, melyeknél nem alkalmaztam hőszigetelést a lábazati falon, ez körülbelül 2x akkora hővesztést jelent, mint a lábazati hőszigeteléssel ellátott esetekben. A legnagyobb maximális hővesztés az SZD1-es modellnél jelentkezett, ennek értéke: 5,574 W/m².

Hőszigetelés alkalmazásával elérhető változások (az SZD1 – hőszigetelés nélküli modellel összehasonlítva):

- Ha a lábazati falat nem, de a padlót hőszigeteljük, úgy:
 - 50 cm széles 5 cm vastag hőszigeteléssel 15.58%-al
 - 100 cm széles 5 cm vastag hőszigeteléssel 22.19%-al
 - 50 cm széles 9 cm vastag hőszigeteléssel 17.5%-al
 - 100 cm széles 9 cm vastag hőszigeteléssel 25.18%-alcsökkenthető a transzmissziós hőveszteség a fűtési idényre.

- Ha csak a lábazati falon alkalmazunk hőszigetelést, úgy:
 - 6 cm vastag hőszigeteléssel 47.12%-al
 - 12 cm vastag hőszigeteléssel 52.22%-alcsökkenthető a transzmissziós hőveszteség a fűtési idényre.

- Mindkét részen alkalmazott hőszigetelés esetén:
 - a padlón alkalmazott 5cm vastag 50 cm szélességgel és a lábazati falon 6 cm vastag hőszigeteléssel 50.41%-al
 - a padlón alkalmazott 9 cm vastag 100 cm szélességgel és a lábazati falon 12 cm vastag hőszigeteléssel 59 %-alcsökkenthető a transzmissziós hőveszteség a fűtési idényre.

Ezen adatok alapján, kijelenthető, hogy a lábazati falon alkalmazott hőszigeteléssel jobban csökkenthető a padló fűtési idényre vonatkozó transzmissziós hővesztesége, mintha csak a padlót hőszigetelnénk. Ezzel a módszerrel típustól függően akár kétszer olyan hatékonyak lehetünk a hőveszteségek csökkentését illetően. Az adatokból látszik, hogy a padlón alkalmazott hőszigetelés szélességének nagy jelentősége van, ugyanis körülbelül 7% különbség van a hatékonyságukat illetően, míg a vastagság növelése csupán 2-3% eltérést jelent.

Amennyiben mindenhol alkalmazzuk a lehető legnagyobb szélességű és vastagságú hőszigetelést, úgy közel 60%-al csökkenthető a transzmissziós hőveszteség értéke. Ám a rendelkezésre álló eredmények alapján, lehetséges, hogy költséghatékonyabb az a megoldás, ha csak a lábazaton alkalmazunk 12 cm vastagságú hőszigetelést, hiszen már azzal 52.22%-al csökkentjük a hőveszteségeket.

6.1 Eredmények összefoglalása

Az ideai kutatásom alapján a következőket mértem, illetve állapítottam meg:

- a tavaly készített acélszálerezősítésű és referencia betonminták hővezetési tényezőinek értéke megváltozott az elmúlt 1 év során, a próbatestek kiszáradtak, így alacsonyabb értékeket mértünk
- meghatároztam a minták fajlagos hőkapacitását, mely alapján elmondható, hogy az acélszálerezősítés nem befolyásolja különösképp a beton fajlagos hőkapacitását
- meghatároztam a betonminták páradiffúziós tényezőit illetve páradiffúziós ellenállási számainak értékét
- mérésre került a minták nedvességtároló képessége
- kiszámításra került a felszívási és szétterjedési nedvességtranszport tényező, melyhez megmértem a vízfelszívási együttható értékét
- elkészítettem egy ipari csarnok padló- és lábazatsomópontját, mely alapján 30 féle geometriai változatot készítettem a szimulációhoz
- a szimuláció eredményei alapján megállapítottam:
 - hogy a padlón mért negatív hőáramsűrűség jelentősen csökkenthető már 6 cm vastag lábazati hőszigetelés alkalmazásával
 - a lábazati falon alkalmazott hőszigetelés nagy hatással van a padló hőveszteségeire
 - a hőveszteségek csökkentésére vonatkozóan nagyobb szerepe van annak, hogy milyen szélességben alkalmazzuk a hőszigetelést lábazati fal mellett, mint annak, hogy milyen vastagságban
 - a szimulációs modell alkalmas arra, hogy meghatározzuk adott éghajlaton, adott szerkezet esetében a fűtési idény kezdetét, időtartamát
 - a padlón mért hőveszteségek nagyon jól közelítik a természetes alapú logaritmus közelítőfüggvényét
 - optimálisan megválasztott hőszigeteléssel, közel 60%-al csökkenthetjük a padló fűtési idényre vonatkozó transzmissziós hőveszteségét

Gyakorlati konklúzió

A dinamikus hő- és páratechnikai szimulációk nem csak elméleti síkon érdekesek, számos gyakorlati hasznuk is lehet. Pár lehetséges alkalmazás:

- tapasztalati eredmények extrapolációja
- új épületek tervezése
- új építőanyagok fejlesztése, optimalizálása
- a megengedhető maximális belső nedvességterhelés meghatározása
- építőanyagok megfelelő alkalmazásához szükséges higrotermikus tulajdonságok meghatározása, határai

6.2 További vizsgálati lehetőségek

- többféle klímafajl alkalmazása
- további szigetelési megoldások alkalmazása
- szimuláció többféle talaj alkalmazásával
- 3 dimenziós modell készítése, vizsgálata
- az eredmények költségekre gyakorolt hatása
- költségszámítás alapján a legoptimálisabb megoldás kiválasztása

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni konzulensemnek Nagy Balázs doktorandusznak, hogy időt és energiát nem kímélve segítette a munkámat, köszönöm a szakmai segítséget. Szeretném továbbá megköszönni az Építőanyagok és Magasépítés Tanszék Anyagvizsgáló Laboratóriumának valamint az Épületfizika Laboratóriumnak, hogy eszközeiket használhattam a kutatásom során, illetve Takács Krisztiánnak, Rónaky Viktóriának, Dr. Nehme Salem Georges-nak, Orosz Máténak, amiért segítették munkám a vizsgálatok során, hasznos tanácsokkal láttak el.

7. Irodalomjegyzék

1. Künzel, H. M. , Holm, A. H., Krus, M. (2008). Hygrothermal Properties and Behaviour of concrete. WTA-Almanach, 161-181.
2. Cziesielski, E. & Fechner (2002), O.: Wassertransport durch WU-Betonbauteile, Bauphysik Kalender 2, S. 865-886
3. Friedrich, M. (2007), Feuchttransport bei WU-Beton - Stand des Wissens. Bauphysikalische Aspekte von Baukonstruktionen im Grundwasser. Tagungsbd. 18. Hanseatische Sanierungstage, S. 111-128.
4. A.M. Neville; J.J. Brooks (2010): Concrete technology
5. Esmail Ganjian (1990): The relationship between porosity and thermal conductivity of concrete. doktori disszertáció
6. Seppo Louhenkilpi, Felde Imre (2011): Anyagtudományi folyamatszimuláció - Hőátadás modellezése
7. Nagy Balázs (2014): Talajjal érintkező szerkezetek tranziens numerikus hőtechnikai modellezése, MSc diploma
8. Dr. Kausay Tibor (2010): Betonok főbb tulajdonságai az MSZ 4798-1 szabvány szerint: <http://www.betonopus.hu/notesz/eloadas-vetitessel/2010-wienerberger-koszeg.pdf>, letöltés ideje: 2015. október 19.
9. Dr. Kausay Tibor (1999): Szálerősítésű betonok szabványosított vizsgálatai és néhány tulajdonsága: <http://www.betonopus.hu/notesz/szalerositesu/szalerositesu.pdf>, letöltés ideje: 2015. október 17.
10. Dr. Tóth Elek DLA (2009): A passzívházaktól az energiatakarékos csarnoképületekig, <http://www.fejermek.hu/anyagok/passzivhaztol>, letöltés ideje: 2015. 10.19.
11. <http://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php5/Details:Physics> letöltés ideje: 2015. 10.20.
12. S. Olof Mundt-Petersen Lars-Erik Harderup (2013), Validation of a One-Dimensional Transient Heat and Moisture Calculation Tool under Real Conditions
13. Nico A. Hendriks, BDA Test Institute The effect of moisture on roofing insulation in properties, Specification Magazine Sept. 2010
14. Mikkel Oustad, M. Sc., Arild Gustavsen, Sivert Uvsløkk (2005), Calculation of Moisture and Heat Transfer in Compact Roofs and Comparison with Experimental Data

15. ACI Committee 544 (2010), Report on the Physical Properties and Durability of Fiber-Reinforced Concrete
16. Milena. Jiříčková, Zbyšek Pavlík, Lukáš Fiala, Robert Černý (2006), Thermal conductivity of mineral wool materials partially saturated by water
17. Krus M. (1996) Moisture Transport and Storage Coefficients of Porous Mineral Building Materials. PhD thesis; Fraunhofer-Institut für Bauphysik
18. Bozsaky D. (2011), Természetes és mesterséges hőszigetelő anyagok összehasonlító vizsgálata és elemzése. PhD thesis; Széchenyi István Egyetem MTK ÉÉT;
19. Kim KH, Jeon SE, KIM, JK, Yang S. (2003) An experimental study on thermal conductivity of concrete. Cement and Concrete Research 33; 363–371.
20. F. Ochs, H. Müller-Steinhagen (2007), Temperature and Moisture Dependence of the Thermal Conductivity of Insulation Materials
21. Kocsisné dr. Baán Mária, Dr. Rowshan Reza (2011) Lézeres felületechnológiák modellezése
22. http://www2.epito.bme.hu/eat/oktatas/feltoltesek/BMEEOEMMST3/epfiz_6..pdf
23. Nagy Balázs (2015), Thermal Calculation of Ground Contact Structures: New Methods Based on Parametrized Transient Finite Element Thermal Modeling, ACTA PHYSICA POLONICA A, vol. 128. pp. 164-166.
24. Nagy Balázs (2013): Talajjal érintkező szerkezetek hőtechnikai modellezésének lehetőségei, TDK dolgozat
25. Szagri Dóra (2014): Szálerősített betonok hővezetési tényezőinek vizsgálata, TDK dolgozat
26. http://fizipedia.bme.hu/images/a/ad/H%C5%91tan_2013.pdf letöltés ideje: 2015.11.01.

8. Mellékletek

- 1. melléklet: Betonreceptúrák
- 2. melléklet: Padlók hőveszteségei

1. melléklet

Betonreceptúrák

SZD1 keverés

Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg kg/m ³	Térfogat l/m ³	35 liter (kg)
Adalékanyag	0/4 mm frakció	40%	765	289	26,79
	4/8 mm frakció	25%	478	181	16,74
	8/16 mm frakció	35%	670	253	23,44
	Összesen	100%	1913	723	
Cement	Lafarge CEM II/B-S 42,5N		320	103	11,20
Víz	$m_w/m_c=$	48%	154	154	5,38
Humix 50 acélszál			35	4,5	1,23
Adalékszer	SIKA VISCOCRETE 5NEU 0,50%		1,6	1,6	0,056
Levegő				15	
Összesen			2424	1000	

SZD2 keverés

Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg kg/m ³	Térfogat l/m ³	35 liter (kg)
Adalékanyag	0/4 mm frakció	40%	766	289	26,83
	4/8 mm frakció	25%	479	181	16,77
	8/16 mm frakció	35%	671	253	23,47
	Összesen	100%	1916	723	
Cement	Lafarge CEM II/B-S 42,5N		320	103	11,20
Víz	$m_w/m_c=$	48%	154	154	5,38
Humix 50 acélszál			27,5	3,5	0,96
Adalékszer	SIKA VISCOCRETE 5NEU 0,50%		1,6	1,6	0,056
Levegő				15	
Összesen			2419	1000	

+40g adalékszer

SZD3 keverés

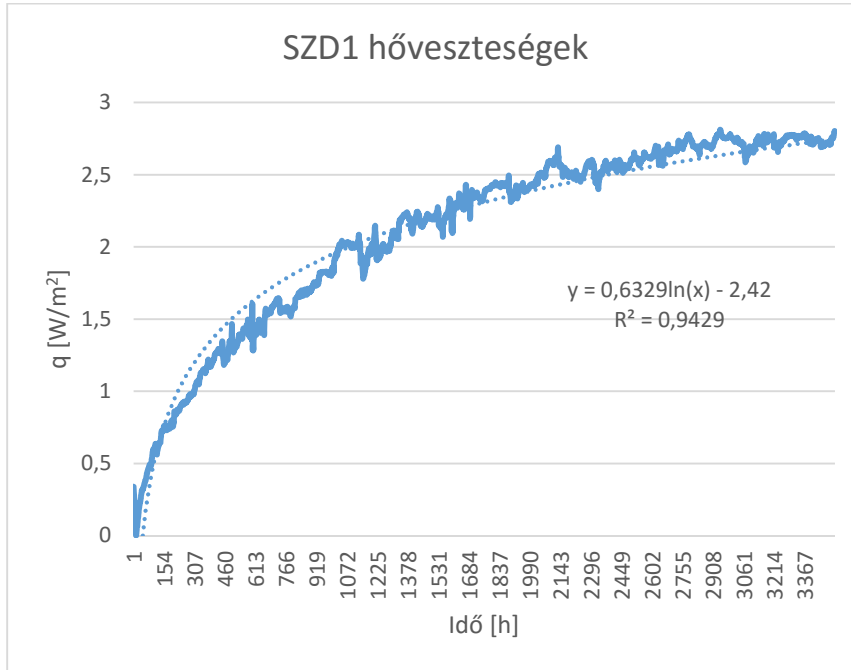
Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg kg/m ³	Térfogat l/m ³	35 liter (kg)
Adalékanyag	0/4 mm frakció	40%	768	290	26,87
	4/8 mm frakció	25%	480	181	16,79
	8/16 mm frakció	35%	672	253	23,51
	Összesen	100%	1920	724	
Cement	Lafarge CEM II/B-S 42,5N		320	103	11,20
Víz	$m_w/m_c=$	48%	154	154	5,380
Humix 50 acélszál			20	2,5	0,700
Adalékszer	SIKA VISCOCRETE 5NEU 0,45%		1,4	1,44	0,050
Levegő				15	
Összesen			2414	1000	

SZD4 keverés

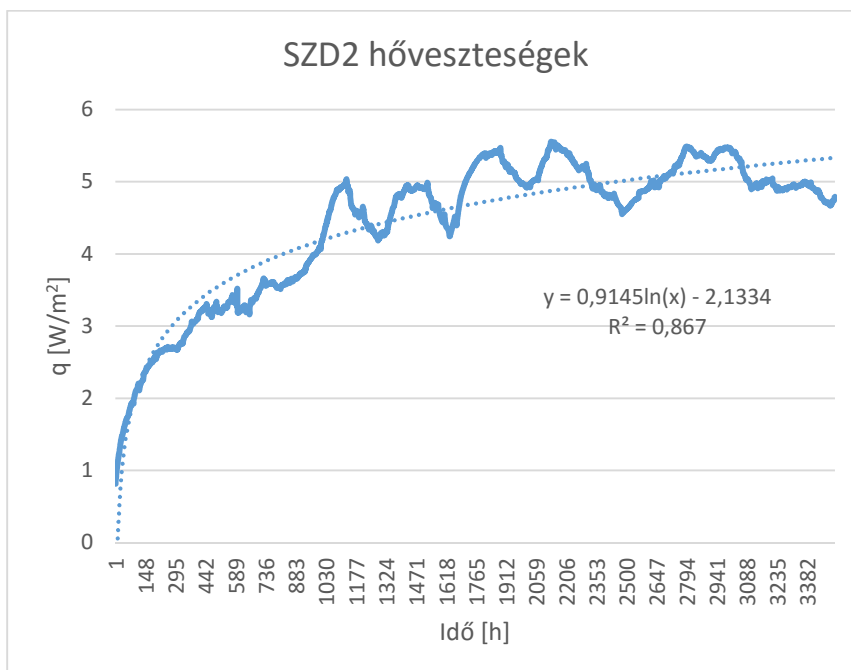
Anyag	Fajta vagy frakció		Tömeg kg/m ³	Térfogat l/m ³	35 liter (kg)
Adalékanyag	0/4 mm frakció	40%	770	291	26,96
	4/8 mm frakció	25%	481	182	16,85
	8/16 mm frakció	35%	674	254	23,59
	Összesen	100%	1925	727	
Cement	Lafarge CEM II/B-S 42,5N		320	103	11,20
Víz	$m_w/m_c=$	48%	154	154	5,376
Adalékszer	SIKA VISCOCRETE 5NEU 0,45%		1,4	1,44	0,050
Levegő				15	
Összesen			2401	1000	

2. melléklet

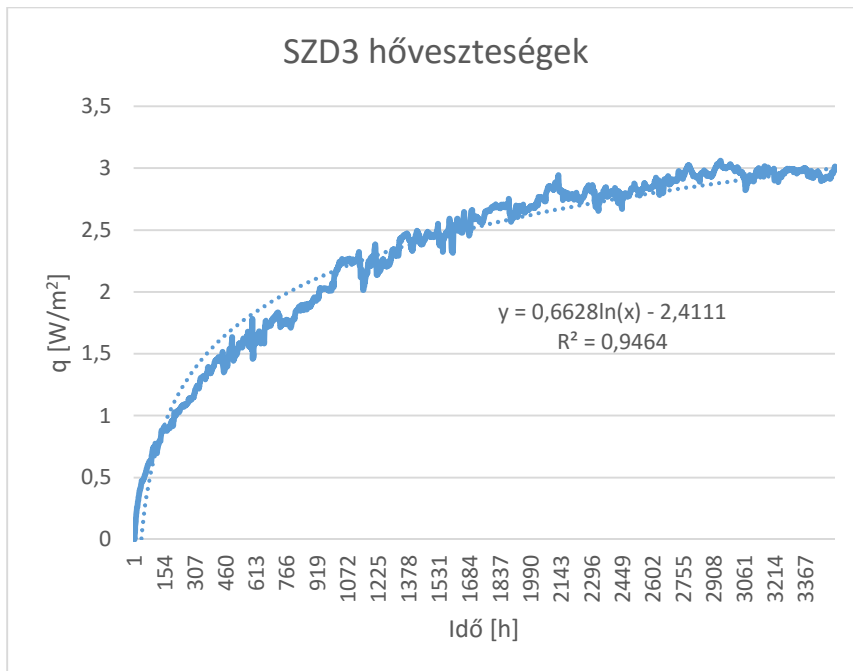
Padlók hőveszteségei



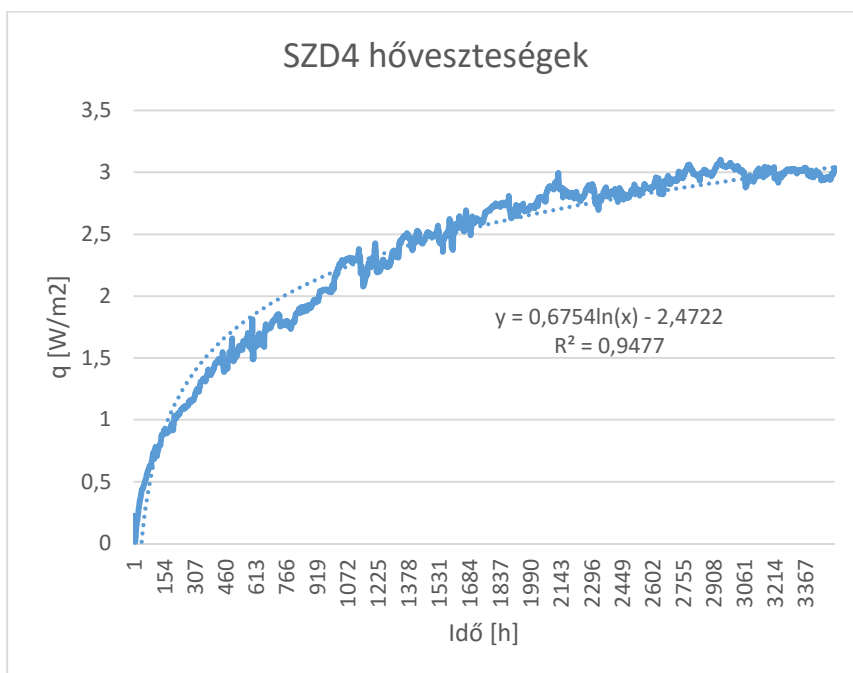
SZD1	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	4,423
Minimum [W/m ²]	0,885
Maximum [W/m ²]	5,574
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	15,556



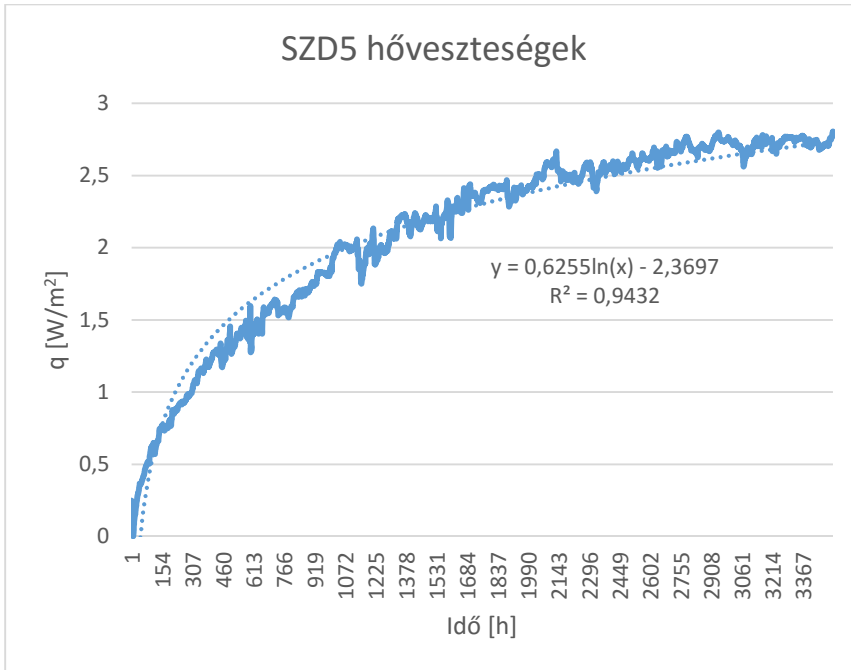
SZD2	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	4,421
Minimum [W/m ²]	0,813
Maximum [W/m ²]	5,557
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	15,547



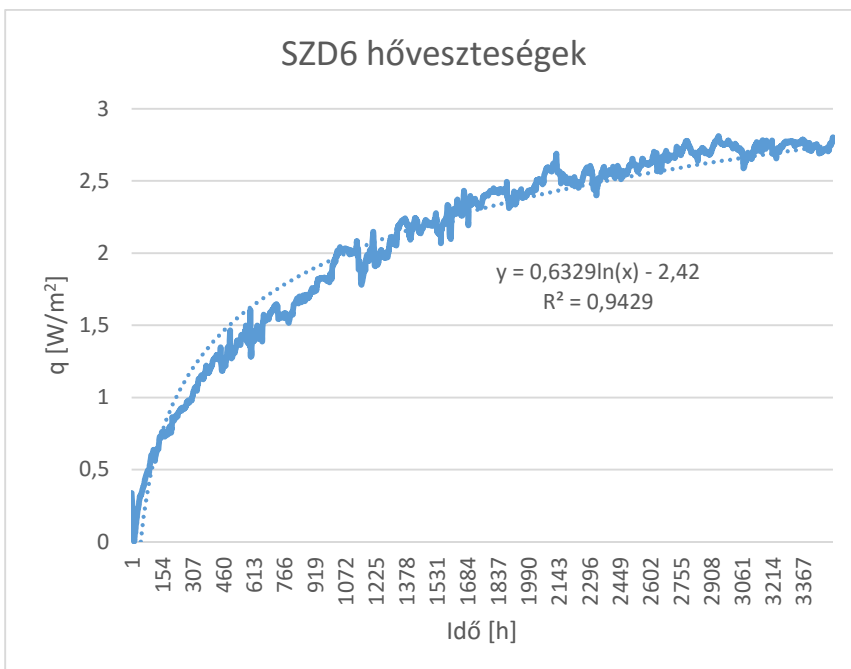
SZD3	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	2,339
Minimum [W/m ²]	0,000
Maximum [W/m ²]	3,061
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	8,226



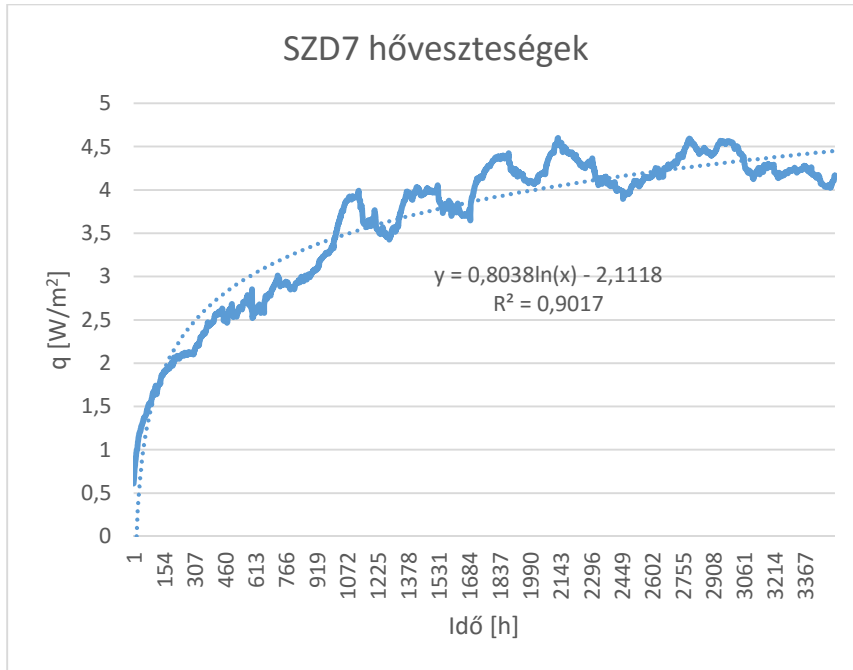
SZD4	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	2,368
Minimum [W/m ²]	0,012
Maximum [W/m ²]	3,102
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	8,328



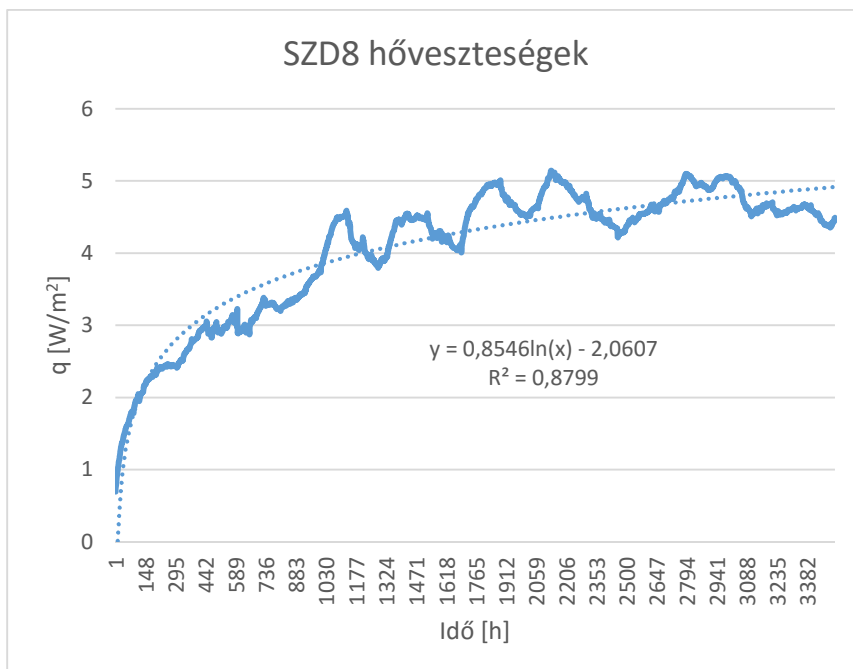
SZD5	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	2,113
Minimum [W/m ²]	0,001
Maximum [W/m ²]	2,805
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	7,432



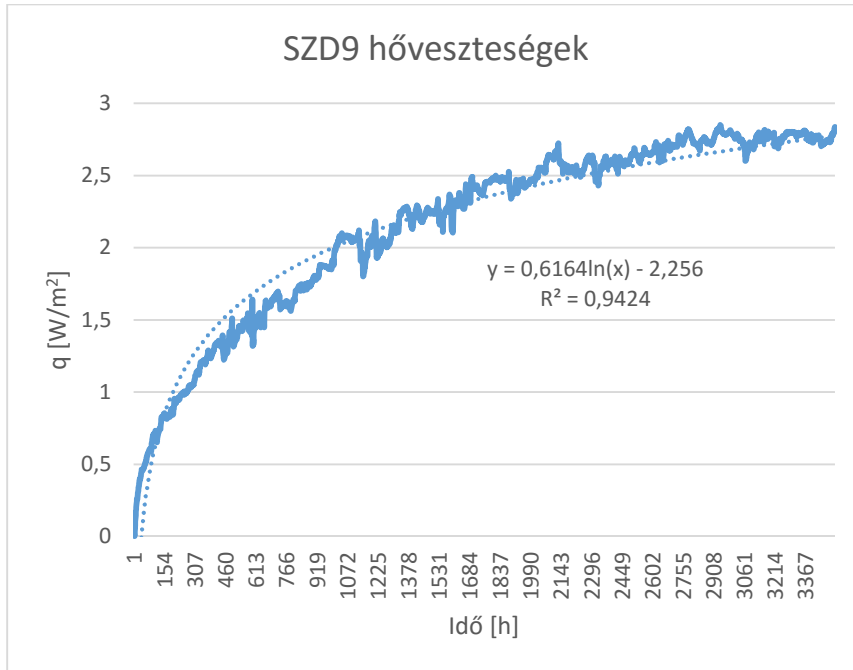
SZD6	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	2,116
Minimum [W/m ²]	0,001
Maximum [W/m ²]	2,811
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	7,442



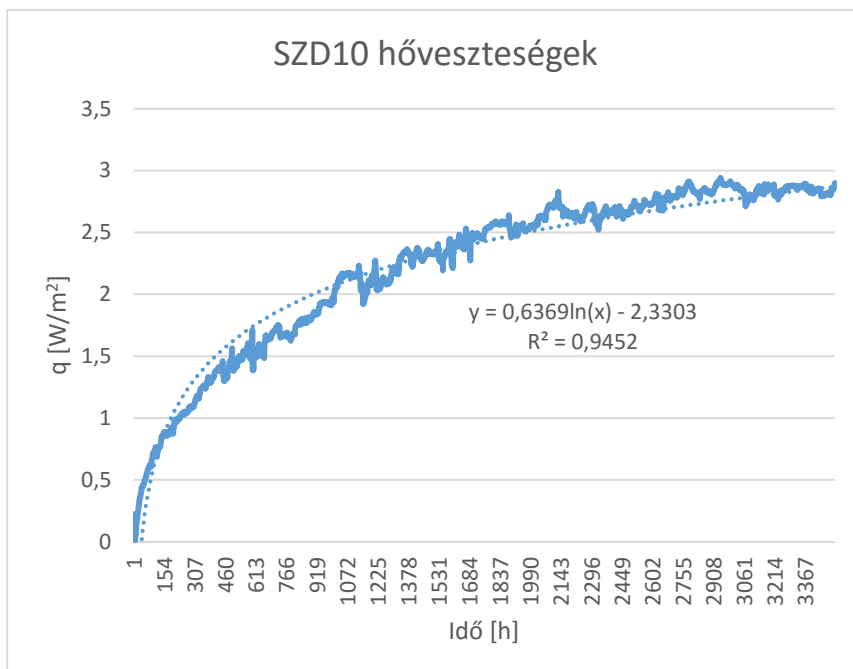
SZD7	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	3,649
Minimum [W/m ²]	0,610
Maximum [W/m ²]	4,602
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	12,834



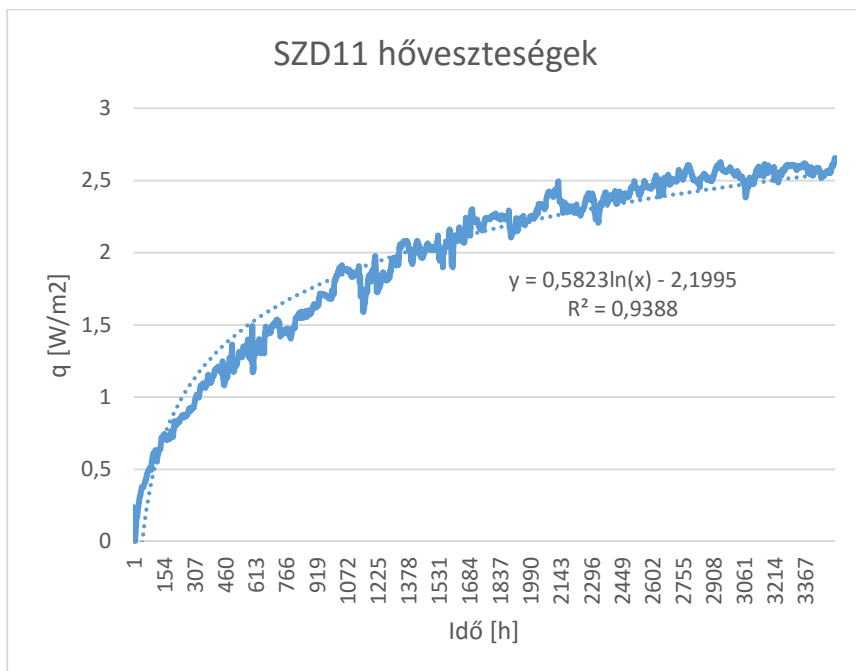
SZD8	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	4,064
Minimum [W/m ²]	0,693
Maximum [W/m ²]	5,142
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	14,292



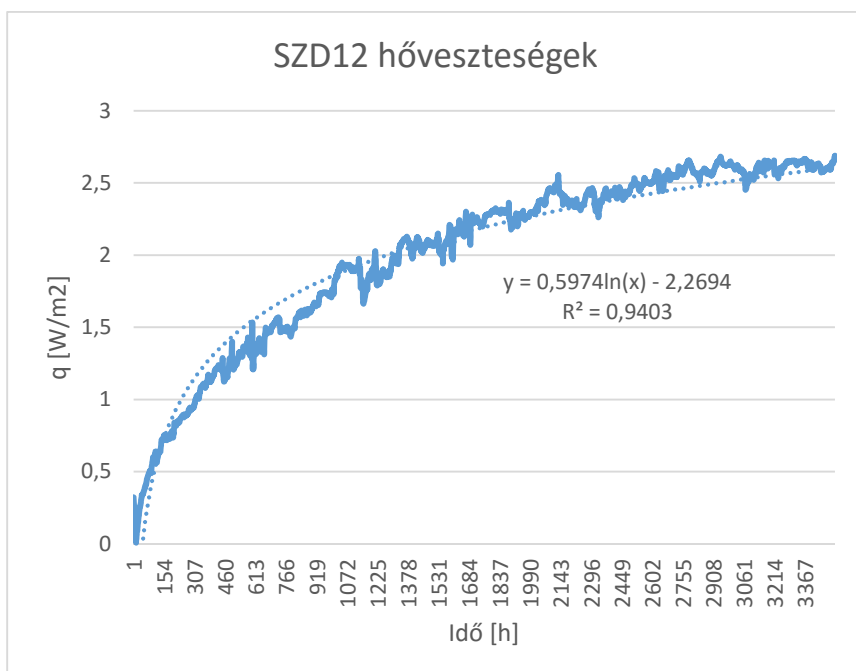
SZD9	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	2,161
Minimum [W/m ²]	0,003
Maximum [W/m ²]	2,848
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	7,601



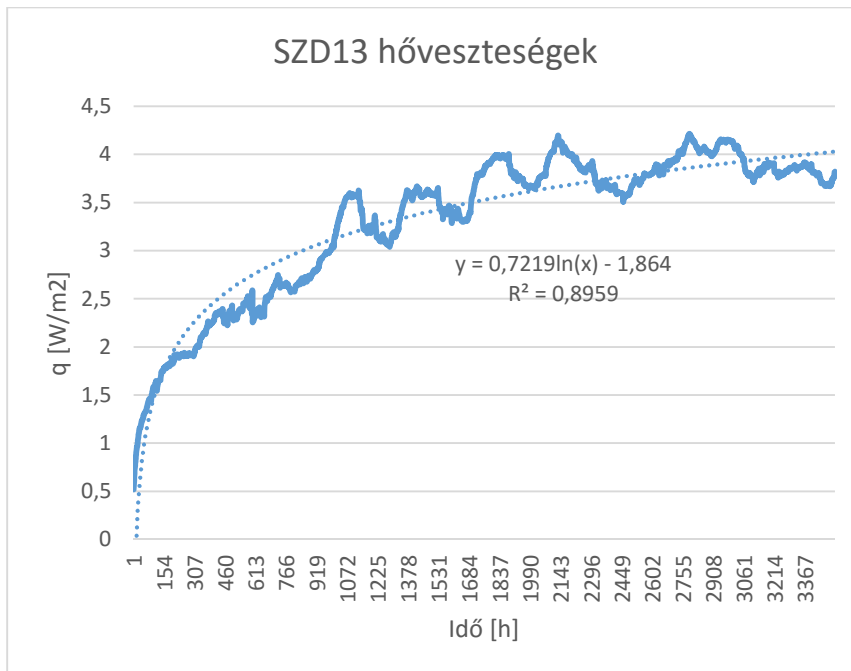
SZD10	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	2,234
Minimum [W/m ²]	0,012
Maximum [W/m ²]	2,940
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	7,858



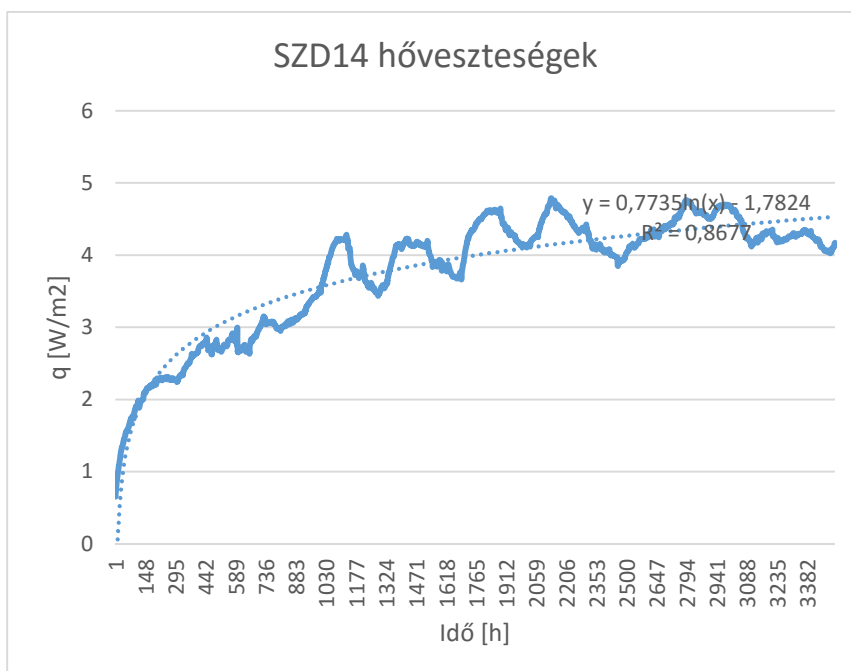
SZD11	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	1,974
Minimum [W/m ²]	0,003
Maximum [W/m ²]	2,656
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	6,941



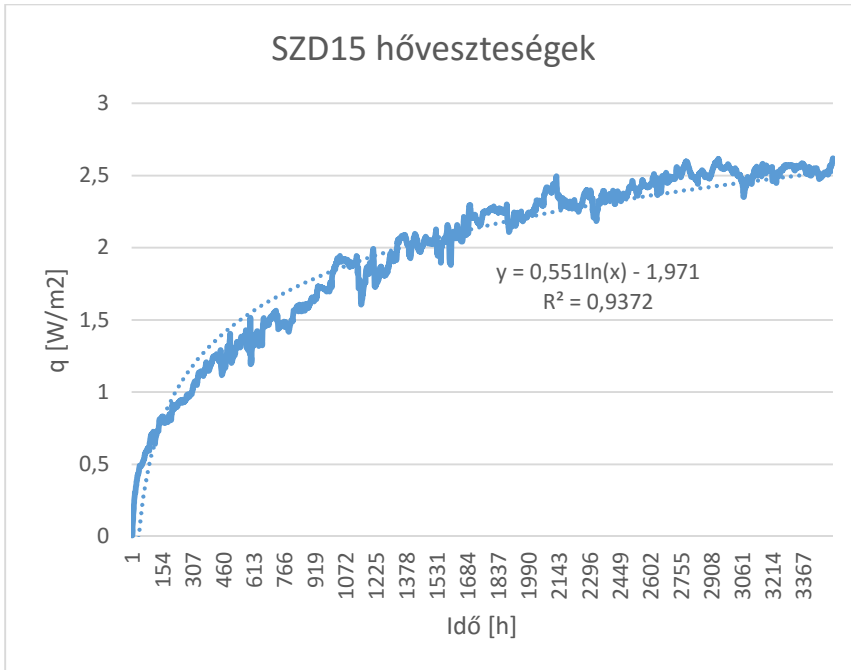
SZD12	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	2,012
Minimum [W/m ²]	0,007
Maximum [W/m ²]	2,689
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	7,077



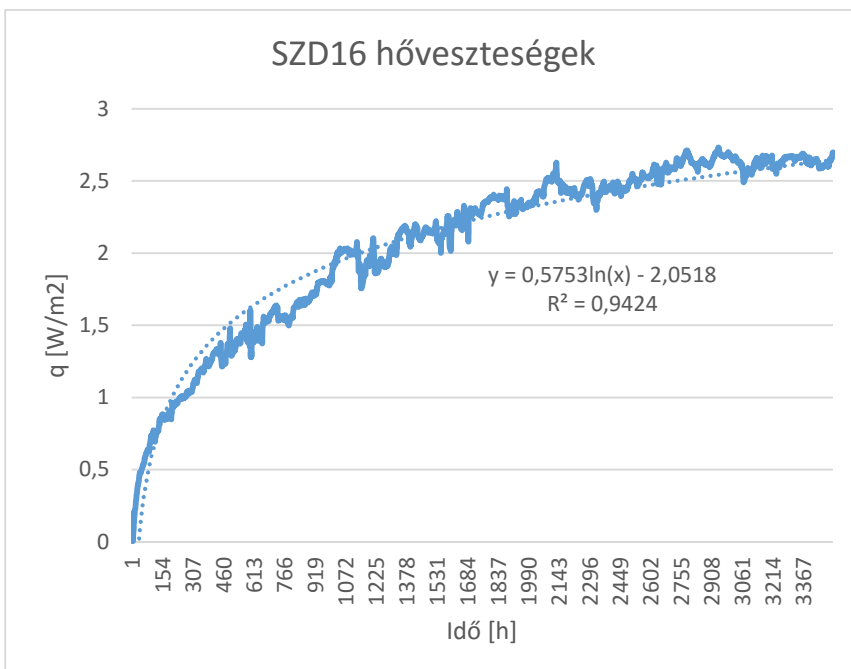
SZD13	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	3,309
Minimum [W/m ²]	0,518
Maximum [W/m ²]	4,215
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	11,639



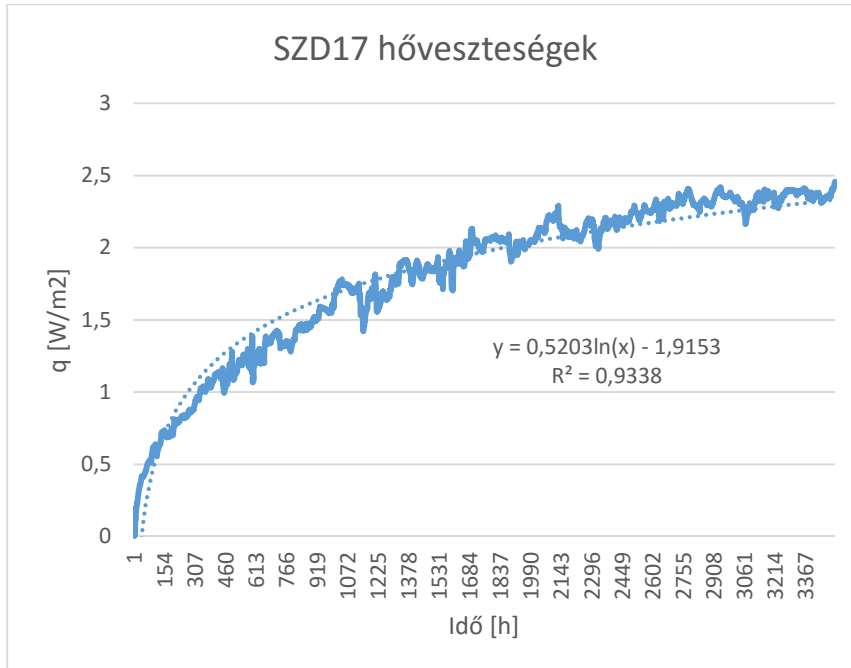
SZD14	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	3,761
Minimum [W/m ²]	0,653
Maximum [W/m ²]	4,787
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	13,227



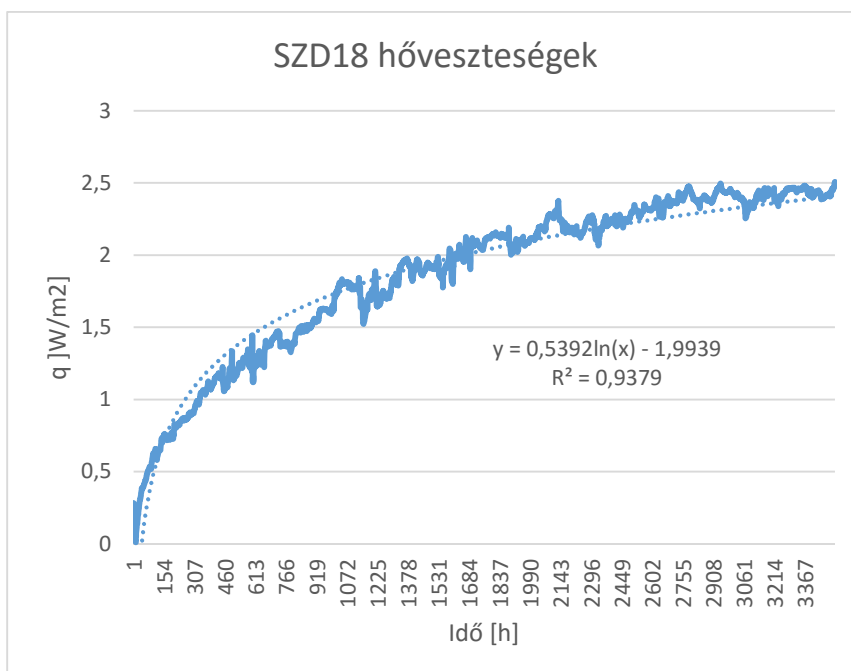
SZD15	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	1,978
Minimum [W/m ²]	0,006
Maximum [W/m ²]	2,618
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	6,957



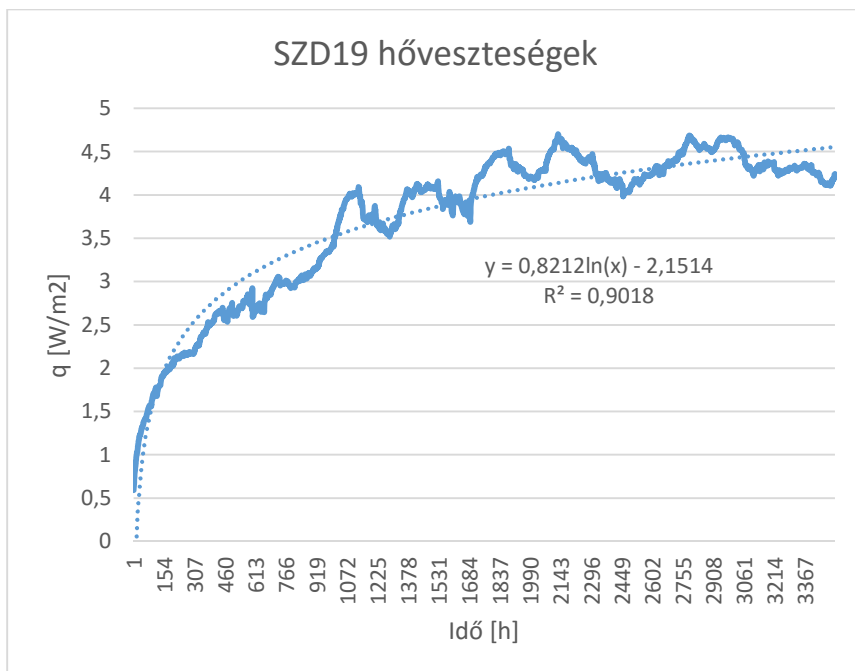
SZD16	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	2,071
Minimum [W/m ²]	0,004
Maximum [W/m ²]	2,730
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	7,285



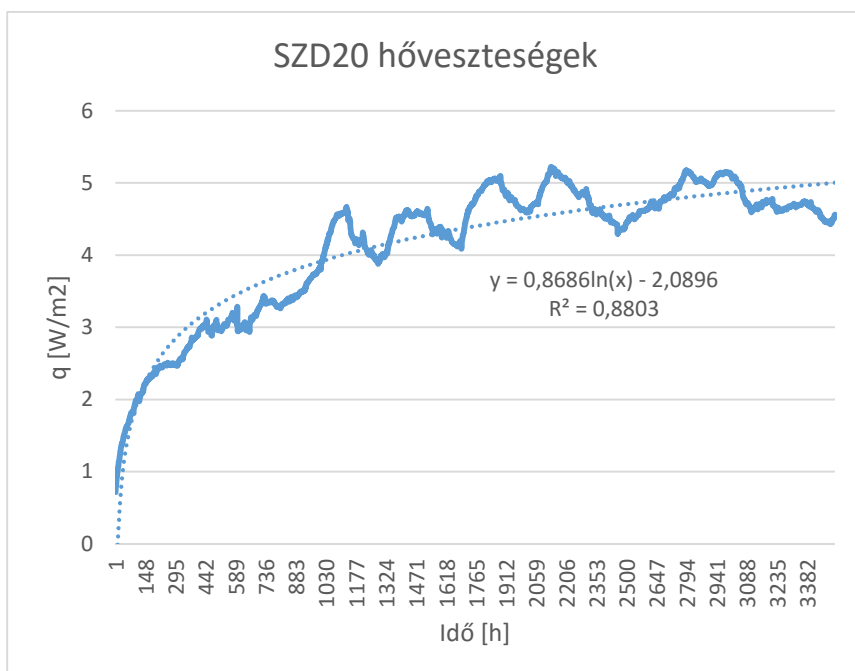
SZD17	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	1,814
Minimum [W/m ²]	0,001
Maximum [W/m ²]	2,456
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	6,379



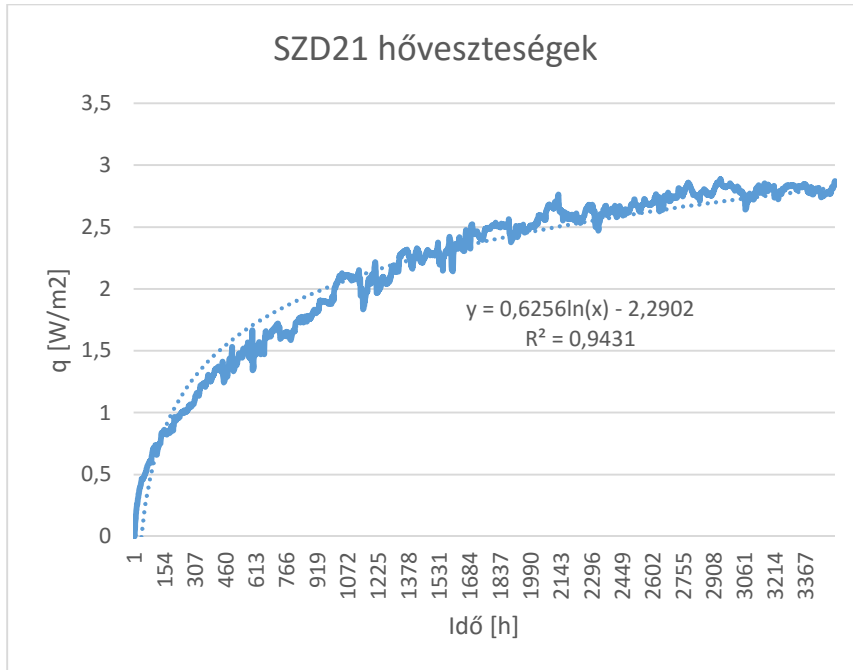
SZD18	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	1,871
Minimum [W/m ²]	0,011
Maximum [W/m ²]	2,507
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	6,579



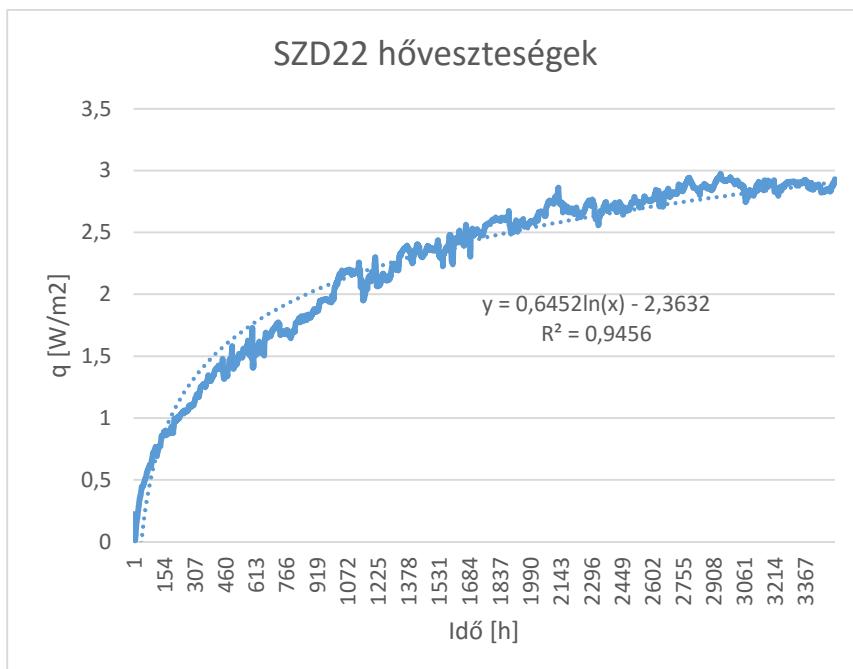
SZD19	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	3,734
Minimum [W/m ²]	0,590
Maximum [W/m ²]	4,699
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	13,133



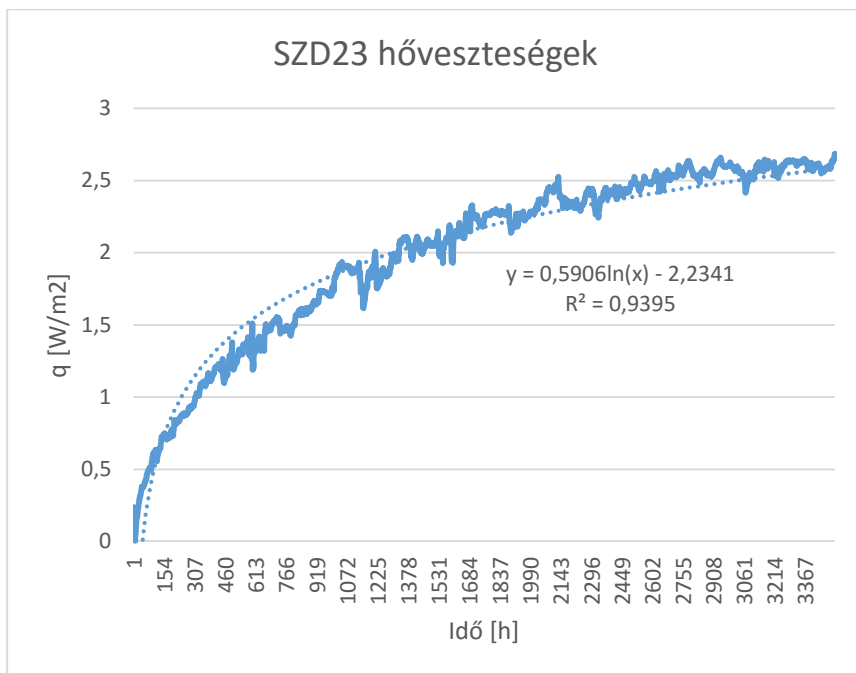
SZD20	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	4,136
Minimum [W/m ²]	0,716
Maximum [W/m ²]	5,222
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	14,545



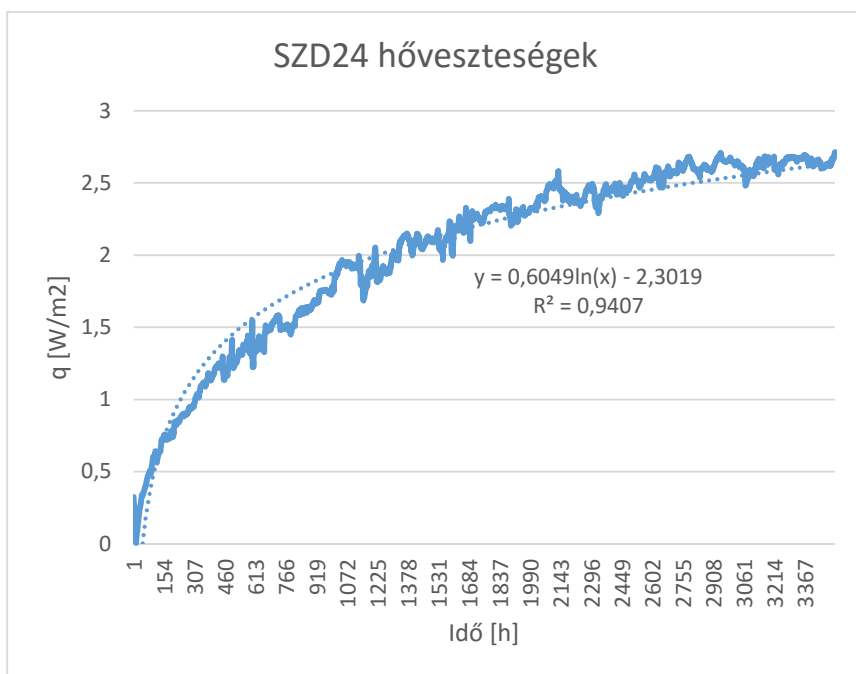
SZD21	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	2,193
Minimum [W/m ²]	0,001
Maximum [W/m ²]	2,887
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	7,713



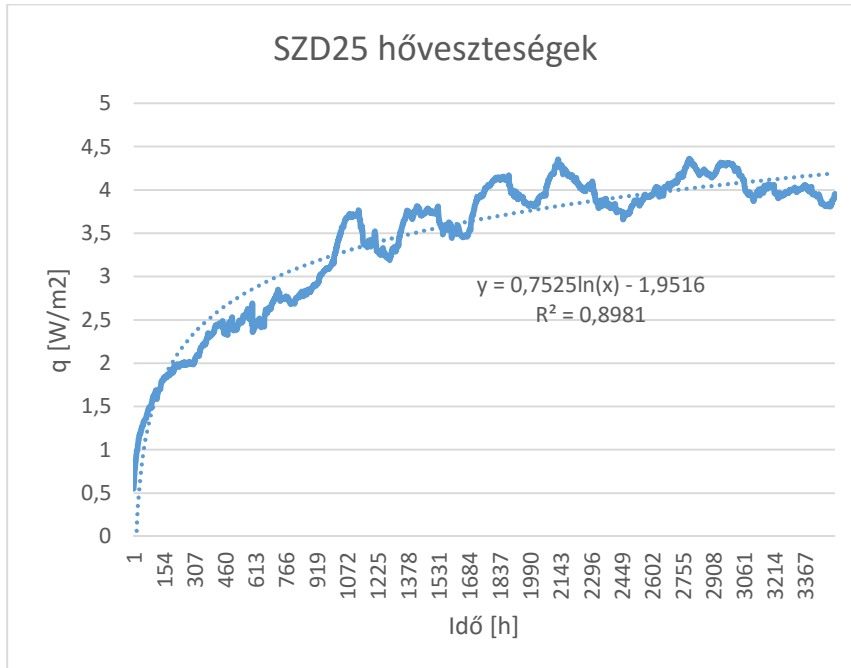
SZD22	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	2,261
Minimum [W/m ²]	0,012
Maximum [W/m ²]	2,973
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	7,952



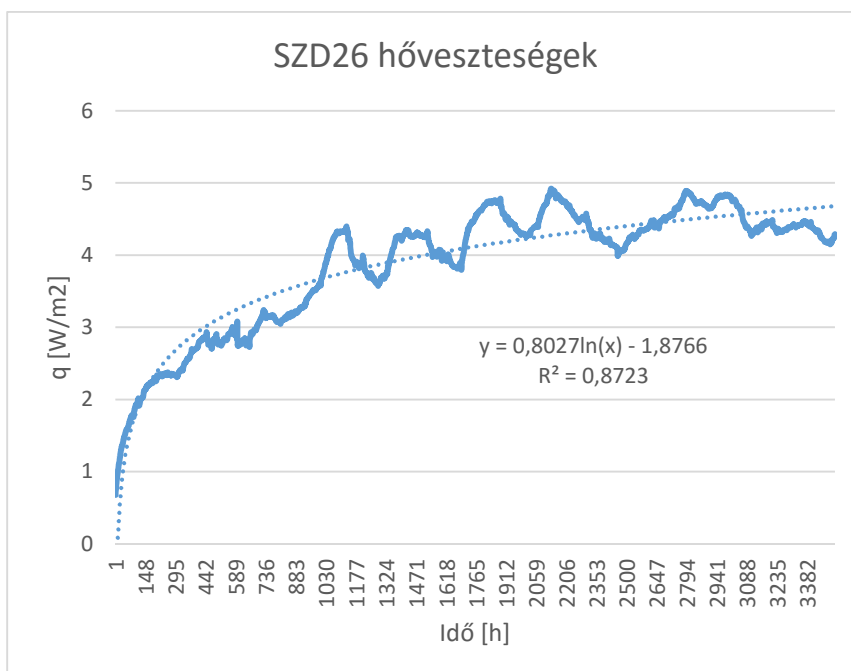
SZD23	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	1,999
Minimum [W/m ²]	0,005
Maximum [W/m ²]	2,685
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	7,030



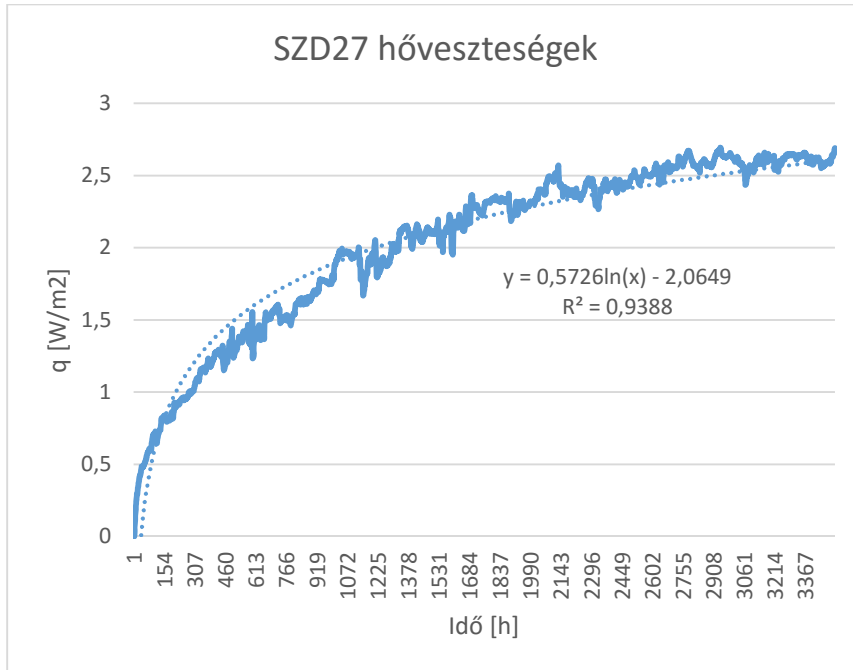
SZD24	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	2,033
Minimum [W/m ²]	0,005
Maximum [W/m ²]	2,714
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	7,152



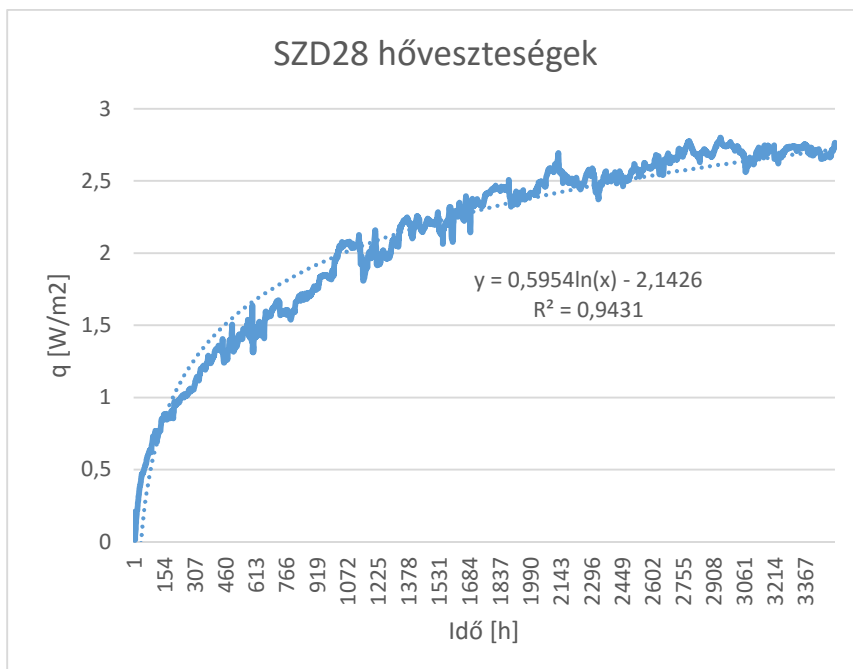
SZD25	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	3,442
Minimum [W/m ²]	0,549
Maximum [W/m ²]	4,361
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	12,104



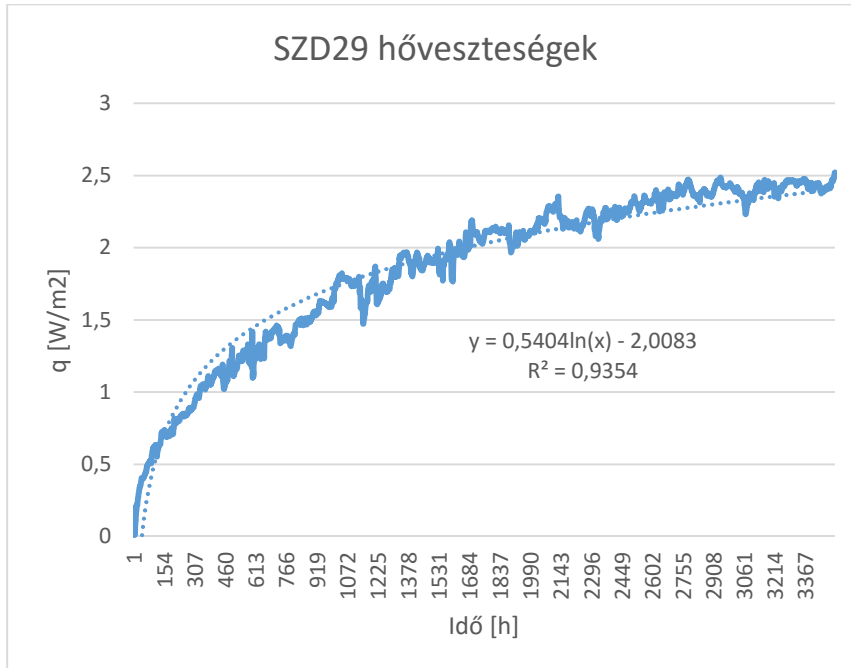
SZD26	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	3,876
Minimum [W/m ²]	0,675
Maximum [W/m ²]	4,921
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	13,632



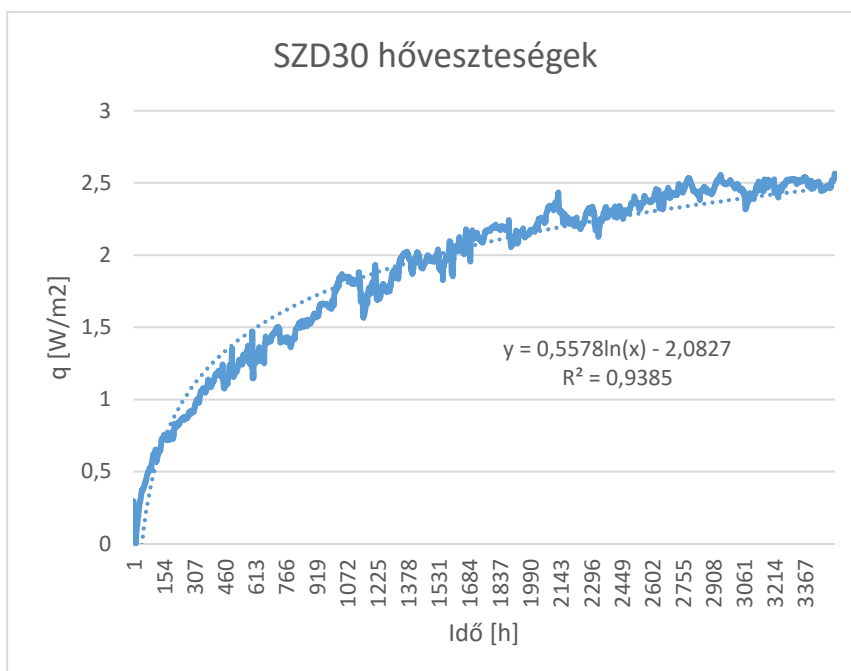
SZD27	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	2,039
Minimum [W/m ²]	0,001
Maximum [W/m ²]	2,693
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	7,171



SZD28	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	2,124
Minimum [W/m ²]	0,012
Maximum [W/m ²]	2,799
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	7,472



SZD29	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	1,865
Minimum [W/m ²]	0,009
Maximum [W/m ²]	2,521
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	6,558



SZD30	
Átlagos hőveszteség [W/m ²]	1,915
Minimum [W/m ²]	0,002
Maximum [W/m ²]	2,565
Transzmissziós hőveszteség [kWh/m ² ,a]	6,735