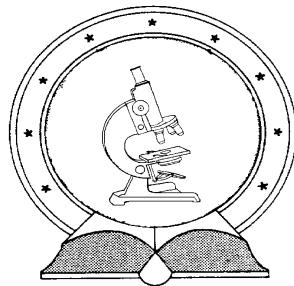


DE TTK



1949

ÉPÜLETENERGETIKAI ELEMZÉSEK AZ ÉPÜLETHATÁROLÓ SZERKEZET KÖRNYEZET OKOZTA VÁLTOZÁSAI ALAPJÁN

Egyetemi doktori (PhD) értekezés

a szerző neve: Szodrai Ferenc

témavezető neve: Dr. Lakatos Ákos

DEBRECENI EGYETEM

Természettudományi Doktori Tanács

Földtudományi Doktori Iskola

Debrecen, 2017

*Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi Doktori Tanács
Földtudományok Doktori Iskola Tájvédelem és éghajlat programja
keretében készítettem a Debreceni Egyetem természettudományi doktori
(PhD) fokozatának elnyerése céljából.*

Debrecen, 2017.....

Szodrai Ferenc

a jelölt aláírása

*Tanúsítom, hogy Szodrai Ferenc doktorjelölt 2013 - 2017 között a fent
megnevezett Doktori Iskola Tájvédelem és éghajlat programjának keretében
irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a
jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Az
értekezés elfogadását javaslom.*

Debrecen, 2017.....

Dr. Lakatos Ákos

a témavezető aláírása

ÉPÜLETENERGETIKAI ELEMZÉSEK AZ ÉPÜLETHATÁROLÓ SZERKEZET KÖRNYEZET OKOZTA VÁLTOZÁSAI ALAPJÁN

Értekezés a doktori (PhD) fokozat megszerzése érdekében
a Földtudományok tudományágban

Írta: Szodrai Ferenc okleveles létesítménymérnök
Készült a Debreceni Egyetem Földtudományi Doktori Iskolája
(Tájvédelem és éghajlat programja) keretében
Témavezető: Dr. Lakatos Ákos

A doktori szigorlati bizottság:

elnök:	Dr. Csorba Péter	.....
tagok:	Dr. Puhl Antal	.....
	Dr. Szabó Márta	.....

A doktori szigorlat időpontja: 2017.6.19.

Az értekezés bírálói:

Dr.	.....
Dr.	.....

A bírálóbizottság:

elnök:	Dr.	.....
tagok:	Dr.	.....
	Dr.	.....
	Dr.	.....
	Dr.	.....

Az értekezés védésének időpontja: 2017.....

Tartalom

1.	Bevezetés.....	1
1.1.	Tanszéki kutatási előzmények.....	2
1.2.	Kutatási téma és célkitűzéseim.....	3
2.	Irodalmi előzmények.....	5
2.1.	A nedvesség hatása az épületszerkezetre.....	5
2.2.	Az anyagok vízfelvételi együtthatója.....	7
2.3.	A nedvességtartalom.....	8
2.4.	Szilárdtestek hővezetése.....	9
2.4.1.	Hővezetés dielektrikumban.....	9
2.4.2.	Az effektív hővezetési tényező.....	10
2.4.3.	Porózus anyagok effektív hővezetési tényezője.....	10
2.4.4.	A „diffúziós” hővezetés.....	11
3.	Alkalmazott mérési és számítási módszerek.....	15
3.1.	A hővezetési tényező mérése.....	15
3.1.1.	A hővezetési tényező meghatározása.....	17
3.2.	A vizsgált szigetelőanyagok.....	19
3.2.1.	Expandált polisztirol hab (EPS 30).....	19
3.2.2.	Grafittal szennyezett expandált polisztirol hab (Grafitos EPS).....	20
3.2.3.	Kőzetgyapot.....	20
3.2.4.	Sárga színű extrudált polisztirol hab (Sárga XPS).....	20
3.3.	A vizsgált építőanyagok.....	21
3.3.1.	Gipszkarton.....	21
3.3.2.	Könnnyűbeton.....	21
3.3.3.	Parafa.....	22
3.3.4.	Pórusbeton.....	22
3.3.5.	Tömör téglá.....	22
3.4.	A vizsgált vakolatok.....	23
3.5.	A fajlagos hőkapacitás és a nedvesítési idő kapcsolata.....	24
3.5.1.	A vizsgált réteg fajhője és sűrűsége.....	24
3.5.2.	Falszerkezetek.....	25
3.6.	A fajlagos hőveszteség-tényező.....	26
3.6.1.	Fajlagos hőveszteség-tényező számítása.....	27
3.6.2.	Az épület alakja.....	28
3.6.3.	Megengedett hőátbocsátási értékek.....	29
3.6.4.	Transzmissziós veszteségek.....	29

3.6.5.	Direkt sugárzási nyereség, fűtési idényre vonatkoztatva.....	30
3.7.	Különböző környezeti klímák hatásának vizsgálata szimulációs programmal	31
3.7.1.	A vizsgált területek.....	31
3.7.2.	A vizsgált épület.....	33
3.7.3.	Az alkalmazott szoftver	35
3.7.4.	Az épületenergetikai jellemzők számítása a programmal	36
3.8.	A levegő mozgásának hatása a vizsgált falszerkezet hőáramára.....	37
3.8.1.	A hőáram mérése	38
3.8.2.	A levegő mozgása.....	39
3.8.3.	A felületi hőellenállás hasonlósági elmélet alapján.....	40
3.8.4.	A Hőátadási tényező szabvány szerinti számítása.....	42
3.8.4.1.	A felületi hőellenállás szabvány szerinti számítása.....	42
4.	Eredmények.....	43
4.1.	Különböző, gyakran használt hőszigetelő- és építőanyagok hőtechnikai tulajdonságai ...	43
4.1.1.	Szigetelőanyagok.....	45
4.1.1.1.	Expandált polisztirol hab	45
4.1.1.2.	Grafitos expandált polisztirol hab	46
4.1.1.3.	Kőzetgyapot.....	47
4.1.1.4.	Parafa.....	48
4.1.1.5.	Sárga színű extrudált polisztirol hab (Sárga XPS)	49
4.1.2.	Építőanyagok	50
4.1.2.1.	Gipszkarton	50
4.1.2.2.	Könnyűbeton	51
4.1.2.3.	Pórusbeton	52
4.1.2.4.	Tömör téglá	54
4.1.3.	Vízfelvételi együttható	55
4.1.3.1.	Vakolatok vízfelvétele.....	55
4.1.4.	Hővezetési tényező és a nedvesítési idő kapcsolata	57
4.1.5.	Hővezetési tényező nedvességre való érzékenysége	59
4.2.	A fajlagos hőkapacitás és a nedvesítési idő kapcsolata	61
4.2.1.	Falszerkezetek adatai.....	61
4.2.2.	Szerkezetek hőkapacitásai	62
4.2.2.1.	Nedvesítési időtől független hőkapacitású szerkezetek.....	64
4.2.2.2.	A nedvesítési időre kis mértékben érzékeny szerkezetek.....	65
4.2.2.3.	A nedvesítési időre érzékeny szerkezetek	65
4.3.	A fajlagos hővesztesség-tényező vizsgálatának eredményei	67

4.3.1.1.	„A” típus	67
4.3.1.2.	„B” típus	71
4.3.1.3.	Összegzés a fajlagos hőveszteség-tényezőre vonatkozóan.....	75
4.3.1.4.	Gazdaságossági vizsgálat	76
4.4.	Különböző környezeti klímák hatásának szimulációs programmal vizsgált eredményei .	79
4.4.1.	Első csoport	79
4.4.2.	Második csoport	82
4.4.3.	Harmadik csoport	85
4.4.4.	Éves primer energiaigény	89
4.5.	A levegőmozgás hatása a falszerkezeten keresztüli hőáramra	94
4.5.1.	A hőáram mérés eredménye	94
4.5.2.	A felületi hőátadási tényező hasonlósági elmélet alapján elvégzett számításainak eredményei	96
4.5.3.	Hőátadási tényező MSZ EN ISO 6946:2008 szabvány szerinti számítása.....	97
5.	Összefoglalás	98
5.1.	Új kutatási eredmények	106
5.2.	Summary	113
5.3.	Köszönetnyilvánítás	114
6.	Hivatkozások	115
6.1.	Szakirodalmi hivatkozások.....	115
6.2.	Internetes hivatkozások	119
6.3.	Szabvány hivatkozások	119
6.4.	Rendelethivatkozások.....	120
7.	Alkalmazott jelölések jegyzéke	121

Ábrák jegyzéke:

1. ábra	Venticell 111, Climacell 111 berendezések	15
2. ábra	Könnyűbeton és kőzetgyapot minta	18
3. ábra	Szerkezetek vázlata	26
4. ábra	Vizsgált országok a fővárosukkal.....	31
5. ábra	A mérőkamra vázlata	40

Diagramok jegyzéke:

1. diagram	Vízfelvételi együttható	8
2. diagram	Nedvességre való érzékenység függvénye	12
3. diagram	EPS 30 mért adatai	45
4. diagram	Grafitos EPS mért adatai	46
5. diagram	Kőzetgyapot mért adatai	48
6. diagram	Parafa mért adatai.....	49
7. diagram	Sárga XPS mért adatai	50

8. diagram Gipszkarton mért adatai	51
9. diagram Könnyűbeton mért adatai	52
10. diagram Pórusbeton mért adatai	53
11. diagram Tömör tégl mért adatai	54
12. diagram Szerkezetek hőkapacitásai	63
13. diagram Nedvesítési időtől független hőkapacitású szerkezetek	64
14. diagram A nedvesítési időre kis mértékben érzékeny tulajdonsággal rendelkező szerkezetek	65
15. diagram A nedvesítési időre érzékeny tulajdonsággal rendelkező szerkezetek	66
16. diagram 1. szerkezet (kőzetgyapot + tömör tégl) felületdiagramja	68
17. diagram 6. szerkezet (kőzetgyapot + könnyűbeton) felületdiagramja	69
18. diagram 11. szerkezet (kőzetgyapot + pórusbeton) felületdiagramja	69
19. diagram 16. szerkezet (könnyűszerkezet) felületdiagramja	70
20. diagram 3. szerkezet (EPS 30 + tömör tégl) felületdiagramja	71
21. diagram 8. szerkezet (EPS 30 + könnyűbeton) felületdiagramja	72
22. diagram 12. szerkezet (Grafitos EPS + pórusbeton) felületdiagramja	72
23. diagram 13. szerkezet (EPS 30 + pórusbeton) felületdiagramja	73
24. diagram 14. szerkezet (Sárga színű XPS + pórusbeton) felületdiagramja	74
25. diagram 15. szerkezet (parafa + pórusbeton) felületdiagramja	74
26. diagram A harmadik csoportba tartozó szerkezetek görbéi	75
27. diagram Szerkezetek összehasonlítása	77
28. diagram 4-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	80
29. diagram 5-ös szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	80
30. diagram 9-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	81
31. diagram 10-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	81
32. diagram 2-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	82
33. diagram 3-as szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	82
34. diagram 7-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	83
35. diagram 8-as szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	83
36. diagram 13-as szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	84
37. diagram 14-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	84
38. diagram 15-ös szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	85
39. diagram 1-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	86
40. diagram 6-os szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	87
41. diagram 11-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	87
42. diagram 12-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	88
43. diagram 16-os szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek	88
44. diagram Ausztriai éves primer energiaigény változás	90
45. diagram Horvátországi éves primer energiaigény változás	91
46. diagram Magyarországi éves primer energiaigény változás	91
47. diagram Romániai éves primer energiaigény változás	92
48. diagram Szlovákiai éves primer energiaigény változás	92

Táblázatok jegyzéke:

1. táblázat „Z” értékek Fekete Iván Épületfizikai kézikönyvéből (Fekete, 1985)	13
2. táblázat „Z” értékek a Fraunhofer Épületfizikai Intézet adatbázisából (Fraunhofer IPB, 2013)	14
3. táblázat Anyagok tulajdonságai	25
4. táblázat Falkombinációk	26
5. táblázat Vizsgált anyagok hővezetési tényezői	44
6. táblázat A minták vízfelvételi együtthatói	55
7. táblázat Vakolt minták nedvességtartalmai	56
8. táblázat Vakolt minták tájékoztató jellegű vízfelvételi együtthatói	56
9. táblázat Időben állandó hővezetési tényezőjű szigetelő anyagok	57
10. táblázat Időben lineárisan változó hővezetési tényezőjű anyagok	58
11. táblázat Időben exponenciálisan változó hővezetési tényezőjű anyagok	58

12. táblázat Hővezetési tényező nedvességre való érzékenysége (Fekete, 1985; Fraunhofer_IPB, 2013).....	59
13. táblázat Hőszigetelés vastagságok	61
14. táblázat Számított hőátbocsátási (U) értékek	62
15. táblázat Átlagos fajlagos hőveszteség-tényező változás	76
16. táblázat Szerkezetek fajlagos költségei	77
17. táblázat A vizsgált országok primerenergia követelményei közel nulla energiaigényű lakóépületekre (Maldonado, 2016)	89
18. táblázat Mérési elrendezések rövidítései	94
19. táblázat Mért értékek.....	94
20. táblázat Számolt hőellenállások	95
21. táblázat Adatok a hasonlósági elv általi számításhoz.....	96
22. táblázat MSZ EN ISO 6946:2008-általi számítási eredmények	97
23. táblázat Szerkezetek hőkapacitásának érzékenysége a nedvesítési időre	102
24. táblázat Fajlagos hőveszteség érzékenysége a nedvesítési időre.....	103
25. táblázat Fűtési energiaigény, transzmissziós veszteség érzékenysége a nedvesítési időre.....	104
26. táblázat Hőátadási tényezők	104
27. táblázat Anyagok nedvesítési időbeli függése.....	107

1. Bevezetés

Az EU teljes energiafelhasználásának 20-40 %-át az épületek teszik ki (Pérez-Lombard, et al., 2008). Napjainkban az épületek energiafogyasztásának csökkentése alapvető célkitűzés, mely által mérsékelhető Magyarország energiainport függősége, illetve a környezetterhelés is. Az Európai Unió 2020-as klíma- és energiapolitikai célkitűzéseihez kapcsolódóan minden tagállam vállalta, hogy csökkenti az energiaigényeit. A magyar állam többek között azt vállalta, hogy a megújuló energiaforrások részarányát a bruttó végső energiafelhasználás arányában 14,65 %-ra növeli (Tilesch, 2016). A Nemzeti Fejlesztési Minisztérium adatai alapján 2014-ben a pontos arány 9,51 % volt (Tilesch, 2016). Ezt a megoszlást kétféleképpen lehet növelni: vagy megújuló energiákat hasznosító berendezéseket telepítünk, vagy a bruttó végső energiafogyasztást csökkentjük. A megújuló energia alkalmazásával az épület energiaszükségletének egy részét fedezni tudjuk egy olyan forrásból, ami megfelelő alkalmazás mellett folyamatosan meg tud újulni. A megfelelő típusú megújuló energia alkalmazását az épület és környezetének adottságai és az épületben fellépő igények határozzák meg. Az épületek primer energiaigénye csökkenthető, ha hatékonyabb berendezéseket alkalmazunk és azok hatásfokát növeljük. Az épületek fűtésre, illetve hűtésre használt energiaigényeit az épületek hőszigetelésével is csökkenthetjük.

Az épület fennállása alatt számos hatás éri a külső szerkezetét. Ezek közül energetikai szempontból a legmeghatározóbb a külső hőmérséklet változása. Ez adja meg nagyságrendileg, hogy mennyi lesz az épület hőterhelése vagy hőszükséglete. A külső hőmérséklet függvényében létrejövő hőterhelés vagy hőszükséglet számítására már léteznek számítási módok (pl.: 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról (Rendelet-hivatkozás 1, 2006). Másik külső hatás lehet a nedvesség. Az épületszerkezetek nedvességfelvétele természetes jelenség, mert az épületek párás légtérben állnak és a beépített anyagok jelentős része nedvességet vesz fel a környezetéből. A környezet által okozott nedvességtartalom növekedés származhat vízzel történt közvetlen érintkezésből vagy páralecsapódásból. A folyadék állapotú nedvességnek az épületszerkezetre gyakorolt hatását a folyadék mennyisége befolyásolja. A nedvesség energiaigény módosító hatása nem a szélsőséges, nagyon meleg nyári vagy a fagypont alatti hideg téli napokon, hanem az átmeneti időszakokban fogja kifejteni a hatását, mivel az átmeneti időszakok tekinthetők csapadékosnak. A csapadék hosszú időn át fejt ki a hatását, többnyire az esős napokon és az utána következő időszakokban. A relatív páratartalomból adódó nedvességterhelésnek szintén van hatása, ami egy épületnél a fajlagos hőveszteség-tényezőben, a hőtároló képességben vagy

energiafelhasználásban lehetne kimutatható. Az épületre a szél is hatással van, az év során folyamatosan hűtő vagy fűtő hatást fejt ki rá. Dolgozatomban a felsorolt jelenségeknek épületre vonatkozó hatásait kívánom megvizsgálni.

1.1. Tanszéki kutatási előzmények

A disszertációmban bemutatott kutatásomat megelőzően és jelenleg párhuzamosan is a Debreceni Egyetem Épületgépészeti és Létesítménymérnöki Tanszéken folynak kutatások az építőanyagok és szigetelő anyagok tulajdonságainak mérésével kapcsolatosan. Számos publikáció született az tanszéken az anyagok nedvességfelvételéhez kötődően (Lakatos, 2011; Lakatos & Kalmár, 2013a) már a mérőberendezések és az anyagok hőtechnikai tulajdonságainak leírásából (Lakatos, 2013a; Lakatos, 2013b) a doktori iskolai tanulmányaimat megelőzően is. Doktori iskolai tanulmányaim elvégzése közben további kutatások folytak a hőátadási tényező mérésével kapcsolatban (Lakatos & Kalmár, 2014), továbbá a különféle épületfizikai paraméterek mérését és számítását érintve (Lakatos, et al., 2015) a nanotechnológiás szigetelőanyagok vizsgálatáig (Lakatos, 2016) láthattam példákat és meríthettem ötleteket kutatásaimhoz.

Feladatom volt a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Épületgépészeti és Létesítménymérnöki tanszéken eddig végzett méréseket, kutatásokat tovább fejlesszem, kiterjesszem új anyagokra és a mérési eredményeimet számítások és számítógépes szimulációk bemeneti paramétereként használjam fel.

1.2. Kutatási téma és célkitűzéseim

„Épületenergetikai elemzések az épülethatároló szerkezet környezet okozta változásai alapján.”

Az anyagok, és az abból épített szerkezetek és épületek vizsgálata több okból is fontos. Egyrészt a régebbi, akár 20-30 éves irodalmakban szereplő, anyagokra vonatkozó adatok elavultnak tekinthetők. Egyik fő motivációm és célom az anyagokra vonatkozó két legfontosabb jellemzőt, a hővezetési tényező nedvességre való érzékenységet és a vízfelvételi tényezőt megvizsgálni, egyes anyagokra vonatkozó értékét tisztázni. Másrészt 2012-ben visszavonták az MSZ-04-140-2 szabványt (Szabványszám 1, 1991), melyet az épületek hőtechnikai méretezésénél használtak a tervezők, és összefoglalta a legtöbb, akkor beszerezhető hőszigetelő és építőanyag épületfizikai (hőtechnikai) paramétereit, úgy, mint a hővezetési tényezőt, fajhőt és a sűrűséget. A technológiai fejlődésnek köszönhetően az anyagok gyártástechnológiája kiszélesedett. Így gyártási folyamattal akár azt is el lehet érni, hogy egy régebben lágy anyag más gyártási folyamatokkal akár lépésállóvá is tehető (polisztirol hab expandált és extrudált technológia közötti különbsége). Az elmúlt években új anyagok is megjelentek a piacon, például a grafitral adagolt polisztirol hab vagy az aerogél.

A vizsgálataim fő célkitűzései:

- különböző, napjainkban alkalmazott és az iparban fontos hőszigetelő- és építőanyagok hőtechnikai vizsgálata: hővezetési tényező mérése teljesen száraz állapotban és nedvesítés után, a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Épületfizikai laboratóriumában. A mérések végrehajtása után a kapott eredményeket a hazai és nemzetközi szakirodalmi értékekkel összehasonlítani.
- a hazai és nemzetközi szakirodalomban fellelhető és rendkívül ellentmondásos, kettő az anyagra jellemző és a nedvességfelvételhez kapcsolódó tényezőt megvizsgálni és értelmezni a telítődés előtti szakaszra: a vízfelvételi együtthatót (A_w), és a hővezetési tényező nedvességre való érzékenységet (Z).
- a vakolat nedvességfelvő hatását megvizsgálni.
- ezt követően a vizsgált anyagokból képzeletbeli szerkezetek létrehozása, és azok egyedi hőtechnikai tulajdonságainak vizsgálata (pl.: a hőkapacitás változása). A megalkotott szerkezetekből különféle méretű (geometriájú) hipotetikus épületek kialakítása, és elemzése aszerint, hogy miként hat az épület fajlagos hőveszteség-tényezőjére a nedvesítési idő.

- a vizsgált épületek egyike energetikai paramétereinek változását öt különféle klímaregióban (Bécs, Budapest, Bukarest, Pozsony, Zágráb) épületenergetikai szimulációk segítségével meghatározni.
- a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Épületfizikai laboratóriumában megvizsgálni több irányú légáramnak a falszerkezeten keresztüli hőtranszportot módosító hatását hőszigetelt és hőszigetelés nélküli állapotban. Az eredményeket összehasonlítani a hazai és nemzetközi szakirodalomban található következtetésekkel és a szabványban rögzített számítási módszer által kapott eredménnyel.

2. Irodalmi előzmények

2.1. A nedvesség hatása az épületszerkezetre

Dolgozatom egyik célja az épületszerkezetekkel kapcsolatba kerülő gőz- és folyadék halmazállapotú nedvesség hatásainak a vizsgálata. A kétféle halmazállapot hatásai elkülönülnek: a nedvesség (nehezen befolyásolható) mozgása főként gőz halmazállapotban megy végbe. A pára koncentráció növekedéséből származó kondenzálódott folyadék hatása káros is lehet, az anyag tűrőképességétől függően. Az egyik lehetséges károsodás a hővezetési képesség növekedése, a másik az anyag fizikai károsodása. Dolgozatomban a nedvesség okozta fizikai károsodások részletezésétől és azok vizsgálatától eltekintek. A következőkben a nedvesség pára- és folyadék halmazállapotra vonatkozó alapvető fogalmakat és összefüggéseket tárgyalom.

Az épületszerkezetekben levő nedvesség hatással van az építőanyagokra és ennek következményeként az épületre is. Mivel az épület rendszerint párás környezetben áll, ezért természetes, hogy a legtöbb épületszerkezet tartalmaz nedvességet. A normális mértékű nedvesség hatását az építőanyagok alapvető paraméterei tartalmazzák. Az ennél nagyobb mértékű nedvesség problémákat okoz. A nedves építőanyagban három fázist különböztetünk meg: a szilárd fázis az építőanyag (általában porózus) szilárd váza; a szilárd váz falán adszorpciós kötésben levő, vagy az üregeket kitöltő víz jelenti a folyadékfázist (abszorbeált nedvesség); a folyadék fázis felett levő (azzal egyensúlyt tartó) vízgőz a gázfázis. (Fekete, 1985)

Az építő- vagy hőszigetelő anyagok legtöbbje a víz és gőz számára átjárható. Ezek az anyagok általában porózus (vagy szálas) szerkezetűek. Normál légkörben levő pórusos anyag üregeiben levegő-gőz és folyadék-gőz található. A folyadék-gőz fázispár egyensúlyát az anyagok hőmérséklete és nedvességtartalma határozza meg. A fázisok közötti anyagcsere mértéke az előbbi paraméterektől függ. A nedvesség, halmazállapota szerint, eltérő módon befolyásolja az építőanyagot, ezért külön kell vizsgálnunk: a gőzállapotú, a folyadékállapotú és a jégállapotú nedvesség hatását. (Fekete, 1985)

A gőzállapotú nedvesség (a hővezető képesség és a sűrűség befolyásolásán túl) alig okoz lényeges hatást az anyagokra. A gőzfázisból lekondenzált, vagy direkt folyadék alapú nedvesség veszélyes, mert: növeli a hővezetést, egyes anyagokra kémiai hatással van, korróziós kárt okozhat és esztétikailag is hátrányos. A nedvesség az épületszerkezetben akkor válik veszélyessé, ha a folyadék a pórusokat kitölti. Ekkor a folyadék számára már biztosított a

diffúzió is. A jég már csak egy előzetesen elkövetett hiba végső fázisa: a bekövetkező térfogatváltozás rongálja a szerkezetet. (Fekete, 1985)

Párafizikai szempontból az építőanyagokat három fő csoportra oszthatjuk: tömör, zárt és nyitott pórusú anyagokra. A tömör anyagoknak, melyeknek további két csoportja van: amelyek legfeljebb kémiai kapcsolatot létesítenek (pl. fémek), illetve a tömörnek tekinthetők, melyek a felületükön adszorpcióval is képesek nedvességet felvenni; ezek tömegében a nedvességfelvétel főként ozmózissal megy végbe (pl. kötőanyagok). A zárt pórusú anyagok nedvességet csupán a külső felületükön tudnak adszorpcióval felvenni, csekély kapilláris-hatás és diffúzió miatt (pl. műanyag habok, habüveg stb.). A nyitott pórusú anyagok nedvességgel szembeni viselkedése eltérő: egyes anyagok nem adszorbeálnak nedvességet, kapilláris-hatás nem lép fel, de diffúzió bekövetkezhet (pl. bitumenkötésű hőszigetelők); más anyagokban adszorpció nincs, de kapilláris-hatás felléphet és diffúzió is van (pl. szálás szigetelőanyagok); a legtöbb anyag a nedvességet adszorbeálja, kapilláris-hatás is van és a diffúzió bekövetkezhet. (Fekete, 1985)

Az adszorpció felületen történő, fizikai (fiziszorpció és/vagy elektrosztatikus vonzás) vagy fizikai-kémiai (kemiszorpció) folyamat. Az adszorpció során az anyagok leggyakrabban van der Waals-kötéssel, ritkábban kemiszorpcióval kötődnek meg egy másik anyagnak (az adszorbensnek) a felületén. A kifejezés eredete latin: ad: -hoz, -hez (irányt fejez ki), sorptio: elnyelés. Ilyenkor az anyag belseje majdnem teljes egészében száraz marad és a hővezetési tényező csak kis mértékben, vagy egyáltalán nem változik (pl.: téglá vagy parafa). Előfordul olyan is, hogy a felületről visszapárolog a nedvesség a környezetbe, ilyenkor deszorpcióról beszélünk. Ha a nedvesség a felületről az anyag belseje felé tovább „halad”, diffundál, és így már az egész anyag szerkezetében jelen van („behatol” az anyagba), akkor abszorpcióról beszélünk. Nedvesítési idő hosszabbodásának hatására a külső felületen lévő pórusok, melyek az építőanyagokban számottevő százalékban jelentkezhetnek, nyomáskülönbség vagy kapilláris hatásra akár az anyag teljes térfogatában telítődhetnek. Ez a nedvesség-felvételi forma leginkább a nagy pórusméretű, illetve a szálás hőszigetelő anyagokra jellemző. Természetesen a nedvességfelvételben a hőmérsékletnek is szerepe van.

Az épületszerkezetet érő nedvességhatásokat két csoportra osztjuk: folyadékállapotú nedvesség hatások és párahatások. A folyadék állapotú nedvesség hatásairól akkor beszélünk, ha a folyadék közvetlenül éri a szerkezetet: Az építési nedvesség az építési technológia, vagy az építés alatti kedvezőtlen meteorológiai körülmények miatt a szerkezetben rekedt víztartalom; a talajvíz a kapilláris-hatás következtében a tényleges vízszintnél magasabban is jelentkezhet;

meteorológiai nedvesség: a különböző halmazállapotú csapadék az elkészült épület külső felületeire jelenthet veszélyt; az üzemeltetési nedvesség a technológiából vagy üzemi hibából eredő közvetlen hatás.

A szerkezetet érő párahatások alatt azokat a jelenségeket értjük, melyek a szerkezet és a vízgőz kapcsolatából keletkeznek; a páralecsapódás a légtér nedvességtartalma és a szerkezet felületi hőmérséklete közötti potenciálkülönbség következménye; az adszorpciós nedvesség az anyag normál állapota, ahol az üregek felületén lekötött nedvességréteg feletti párányomás egyensúlyt tart a légtér párányomásával; a páradiffúziós jelenségek a légtér molekulái és az építőanyag üregeiben levő gáz molekulái közötti kiegyenlítődést jelentik. A páradiffúziós jelenségek előfeltétele a különböző párányomás. A leírt jelenségek közül a lecsapódás felületi jelenség, amely az eltérő mértékű lecsapódás és elpárolgás során jön létre, ha a párányomás a felületen nagyobb a telítettnél. Az adszorpciós és diffúziós jelenség térfogati jellegű, előfordulásuk természetes. (Szodrai & Lakatos, 2014a; Richards, et al., 1992; Karoglou, et al., 2005)

2.2. Az anyagok vízfelvételi együtthatója

Ez a tényező megadja, hogy a vizsgált (abszorpcióra hajlamos) anyag nedvességgel érintkező felületén (A) keresztül mekkora tömegű víz ($m_n - m_{sz}$) képes adott idő (t) alatt az anyag belsejébe jutni (elnyelődni). Ha ábrázoljuk a fajlagosan (m^2 -re vetített) felvett nedvességet a nedvesítési idő négyzetgyökének a függvényében, akkor egy kezdetben növekvő függvényt kapunk. Természetesen ez nem egy végtelenbe tartó függvény, mivel az anyag nedvesség-felvételi folyamata egy idő után befejeződik, és a nedvességfelvétel telítésbe megy át. Emiatt az 1. diagramnál látható jelleggörbék a telítődés előtti pillanatig vannak jelölve. Ennek a kezdeti lineáris változásnak a meredeksége a vízfelvételi együttható. Továbbá az adott anyag A_w értéke képlettel meg is határozható:

$$A_w = \frac{m_n - m_{sz}}{A \cdot \sqrt{t}} \quad (1)$$

ahol,

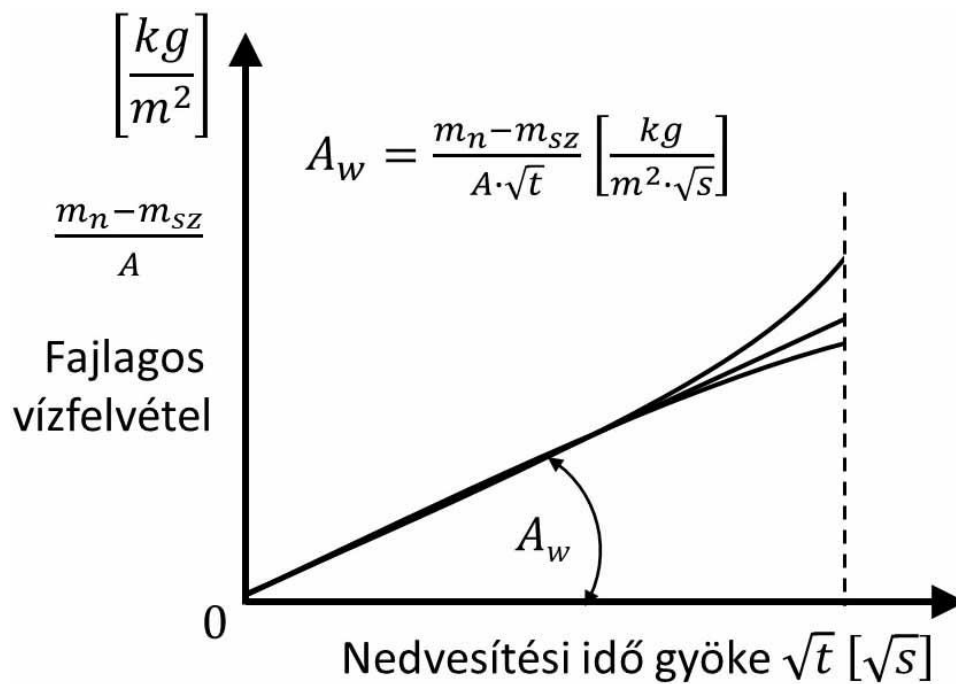
A_w - vízfelvételi együttható [$kg\ m^{-2}\ s^{-0,5}$],

m_n - a minta nedvesített tömege [kg],

m_{sz} - a minta száraz tömege [kg],

A - nedvességgel érintkező felület [m^2],

t - a nedvesítési idő, adott hőfokon és páratartalom mellett [s].



1. diagram Vízfelvételi együttható

Mivel ez a számolt tényező egy lineáris függvény meredeksége (1. diagram) azokban az esetekben, amikor a változás nem lineáris vagy az anyag a mérés folyamán telítődik, akkor a mért érték nem értelmezhető. Többnyire ezt a tényezőt egyedi összetételű vakolatokra szokták megadni, mivel a külső felület jobban ki van téve a nedvesítő hatásoknak. (Mukhopadhyaya, et al., 2002; Sicakova, et al., 2017)

2.3. A nedvességtartalom

A kutatásaimban izoterm folyamatokat vizsgáltam, állandó környezeti hőmérséklet (20 °C) és 90% -os relatív páratartalom mellett. Egy anyag nedvességtartalmát a nedves, illetve száraz tömegének az ismeretében egyszerűen meghatározhatjuk (tömegszázalékában kifejezve) (Fekete, 1985):

$$\omega = \frac{m_n - m_{sz}}{m_{sz}} \cdot 100 \quad (2)$$

ahol:

ω - a nedvességtartalom [m/m%],

m_n - a minta nedvesített tömege [kg],

m_{sz} - a minta száraz tömege [kg].

2.4. Szilárdtestek hővezetése

2.4.1. Hővezetés dielektrikumban

A homogén szilárdtestek λ hővezetési tényezője egyszerűen megállapítható, annak az egyensúlyi hőáramsűrűségnek a mérése útján, amely mintában $\partial T / \partial x^{-1}$ hőmérséklet gradiens hatására folyik

$$q_t = \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3)$$

ahol q_t hőáramsűrűség (egységnyi keresztmetszeten időegység alatt átáramlott energia). A hővezető-képességet definiáló (3) egyenlet alakjából következik, hogy a termikus energia terjedése sztochasztikus folyamat. Az energia nem egyszerűen a minta egyik végén belép és egyenes pályán halad a másik végéig, hanem diffundál a mintán keresztül, miközben gyakori ütközéseket szenved. Ha az energia eltérítés nélkül egyenesen haladna a mintán keresztül, akkor a hőáramot megadó kifejezés nem függne a hőmérséklet-gradienstől, hanem csak a minta két vége közötti ΔT hőmérsékletkülönbségtől (a minta hosszától függetlenül, skaláris mennyiségként lehet kezelni). A vezetési folyamat véletlenszerű természete követeli meg a hőáram kifejezésében a hőmérséklet-gradienst. A kinetikus gázelmélet alapján (bizonyos közelítésben) a hővezető-képességre a következő kifejezés adódik:

$$\lambda = \frac{1}{3} \cdot C_V \cdot u_{hang} \cdot \Lambda \quad (4)$$

ahol:

C_V - az egységnyi térfogatra eső fajhő [$J K^{-1} m^{-3}$],

u_{hang} - a részecske átlagsebessége [$m s^{-1}$],

Λ - a részecske közepes szabad úthossza két ütközés között [m].

Ezt az összefüggést először Debye alkalmazta szilárd dielektrikumok hővezető-képességének leírására, ahol C_V a rácsrezgésektől vagy fononoktól származó fajhő, u_{hang} a hang terjedési sebessége és Λ a fononok közepes szabad úthossza (szilárd kristályokban ez kb. 10^{-8} - 10^{-9} m nagyságrendbe esik). A szilárdtest fizikában fononoknak nevezzük a szilárdtesteket felépítő atomok kollektív rezgéseit leíró kvázirészecskéket. Ezeket rugalmas közegek (egyes szilárd testek és folyadékok) rezgési módusainak kvantummechanikai jellemzésére alkalmazzák. A fonon Λ közepes szabad út hosszát főleg két folyamat, a geometria szórás és más fononokon bekövetkező szórás szabja meg. Ha az atomok közötti erők tisztán harmonikusak lennének, akkor a különböző fononok között nem volna ütközés, vagyis ekkor a közepes szabad úthosszat

kizárólag a kristály határfelületén, valamint a rácshibákon való szóródás korlátozná. Vannak bizonyos esetek, amikor ezek a hatások döntőek. (Kittel, 1985)

2.4.2. Az effektív hővezetési tényező

A fent említett elméletet kiterjesztve tömb (középméretű $\sim 10^0$ - 10^{-2} m nagyságrendű) anyagokra (normál hőszigetelő táblák), már nem beszélhetünk homogén mintákról, így a hővezetés is teljesen máshogy történik. Alapvető tény, hogy egy porózus (gáztöltésű) cellás vagy szálás hőszigetelő anyagban a hőterjedés több részre oszódik: a gáz hővezetése ($\lambda_{v,g}$), a hősugárzás (λ_s), a vezetés a szilárdtesten keresztül ($\lambda_{v,sz}$) illetve a gáz konvekciója (λ_k) (ha van elég tér és a légmozgás nem akadályozott, de ez a tag inkább a szálás anyagokra jellemző).

$$\lambda_{eff} = \lambda_{v,sz} + \lambda_{v,g} + \lambda_s + \lambda_k + \lambda_{lyuk} + \lambda_{pár} \quad (5)$$

ahol λ_{eff} az egész tömbnyi anyagra jellemző hővezetési tényező, amely mérhető laboratóriumi körülmények között (hőárammérős, kalibrált kamra, doboz módszer stb.). Megjegyzendő, hogy az effektív hővezetési tényezőben a másodrendű folyamatok figyelembevételéhez még két tényezőt, a λ_{lyuk} és a $\lambda_{pár}$ tagokat is számításba lehet venni, de általában e tagok hatása elenyészően kicsi.

2.4.3. Porózus anyagok effektív hővezetési tényezője

A legtöbb tömbnyi méretű, építőiparban is használt szigetelő-, illetve építőanyag pórusos vagy szálás szerkezetű, melyek akár 90 %-ban is tartalmazhatnak üregeket. Ezek az üregek levegőt tartalmaznak, de egyéb gázok (pl.: pentán) is lehetnek bennük. Makroszkopikus szinten a fent említett effektív hővezetési tényező leginkább a szigetelőanyag fajtájától, sűrűségétől (ρ), hőmérsékletétől (T), nedvességtartalmától (ω) illetve a korától függ (műanyaghaboknál fellépő öregedéstől vagy szálás anyagoknál a rokadástól). Mikroszkopikus szinten a cellák, szálak méretétől és elrendezésétől függ, ahol a gáztöltésnek van jellemzően szerepe. Ezek hatásait korrekciós tényezőkkel lehet figyelme venni az MSZ EN ISO 10456:2008 (Szabványszám 2, 2008) szabvány szerint; e szabvány ad módszert a hővezetési tényezők deklarált (gyártói) értékének a meghatározására is.

Ennek megfelelően:

$$\lambda_{eff} = f(\omega, \rho, T, p, \text{egyéb}) \quad (6)$$

Egy „szokványos” hőmérsékleti tartományban ($-10 - 25$ °C) kimutatható, hogy a légköri nyomásnak illetve a hőmérsékletnek nincs számottevő hatása a száraz anyag hővezetési

tényezőjére, viszont a nedves anyagoknál már van. A dolgozatban nem célom a hővezetési tényező hőmérséklet, nyomás és sűrűség függésének az elemzése, csak a nedvességtartalom okozta hővezetési tényező változást vizsgálom. A továbbiakban tárgyalt hővezetési tényezők mind effektív hővezetési tényezők. (Lakatos & Kalmár, 2013a; Lakatos & Kalmár, 2013b; Lakatos, et al., 2015; Lakatos, 2016)

2.4.4. A „diffúziós” hővezetés

Nagy pórusokkal rendelkező nedves, nedvesített anyagoknál a hővezetési tényező 5. egyenlet szerint módosul. A pórusokat kitöltő gázt (általában levegőt) az anyagba behatolt nedvesség kiszorítja és átveszi a helyét, negatív hatást kifejtve így az egész anyag hővezetési tényezőjére, felerősítve a pórusbeli konvekciós és vezetési részt.

A szakirodalomban a nedvességtartalom (ω) és a hővezetési tényező (λ) közötti kapcsolatra számos modell található, melyek közül legelterjedtebb az egyszerűsített lineáris összefüggés, de létezik polinomiális és exponenciális kapcsolat is:

$$\lambda_n = f(\lambda_{sz}, \omega) \quad (7)$$

Az első modell egy lineáris összefüggést mutat a hővezetési tényezőre és a nedvességtartalomra:

$$\lambda_n = \lambda_{sz} \cdot \left(1 + \frac{\omega Z}{100}\right) \quad (8)$$

ahol:

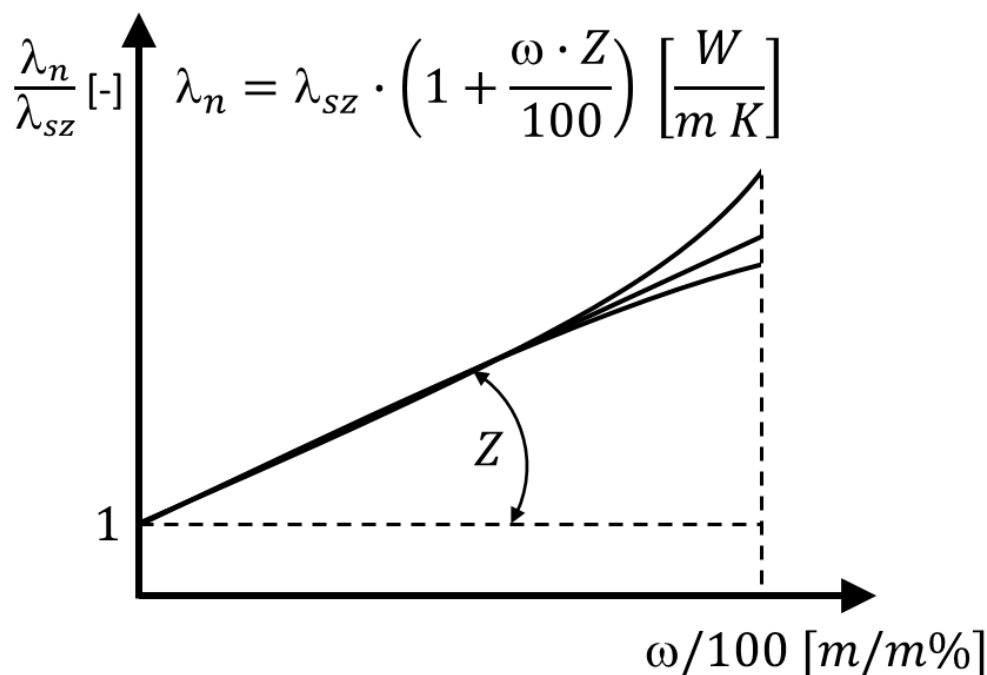
λ_{sz} : a teljesen kiszáritott minta hővezetési tényezője [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$],

λ_n : a nedves anyag hővezetési tényezője [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$],

ω - a nedvességtartalom [m/m%],

Z: az adott anyag hővezetési tényezőjének a nedvességre való érzékenységet fejezi ki [(m/m%)⁻¹].

Az anyag hővezetési tényezőjének a nedvességre való érzékenységet (Z) az alábbi 2-es diagrammal kívánom szemléltetni.



2. diagram Nedvességre való érzékenység függvénye

A „Z” érték, vagy ahogy Fekete-féle kézikönyvben (Fekete, 1985) ez a pótszázalék. A nedvességre való érzékenység (Z) megmutatja azt, hogy mekkora hővezetési tényező (λ) változás következik be egy anyagban nedvességtartalom (ω) változás hatására mindaddig, míg el nem éri az anyag telítési állapotát. Ez nem más, mint egy lineáris függvény meredeksége, emiatt ez a tényező csak lineáris összefüggés esetén a telítődésig értelmezhető.

A gyakorlat a nedvesség befolyását a hővezetési tényezőre a nedvességnövekedés százalékaának arányában adja meg. Az 1. táblázatban a Fekete Iván-féle Épületfizikai kézikönyvből látható néhány 1985-ben használt építőipari anyagokra vonatkozó pótszázalék érték. (Fekete, 1985) Megjegyezném, hogy ezen képlet fellelhető Künzel tanulmányában is. (Künzel, 1995)

Az 1. táblázatból látható, hogy a műanyaghabok kategória megfogalmazása nem tér ki arra, hogy az anyag extrudálva (fokozott vízzáró képességgel rendelkező) vagy expandálva (csökkentett vízzáró képességgel rendelkező) készült, vagy polisztirol (PS), polietilén (PE), poliuretán (PUR) esetleg poliizocianurát (PIR) típusú anyagból készült. Az irodalom egy anyaggá általánosítja a műanyag habokat. Továbbá a pórusbeton, ami manapság elterjedt építőelem, nem szerepel a 1. táblázatban. Az is észrevehető, hogy az anyagok közül a tömör téglának a legnagyobb nedvességre való érzékenysége, míg a hőszigetelőanyagoknak (beleértve az ásványgyapotot is) ehhez képest tized akkora ez a tényezője. Megjegyzendő, hogy ez az 1985-ös irodalom (Fekete, 1985) számít Magyarországon az egyetlen elérhető

szakirodalomnak ebben a témában, ezért is szükséges ezeket a tényezőket megvizsgálni a jelenleg használatban lévő építőipari anyagokra is.

1. táblázat „Z” értékek Fekete Iván Épületfizikai kézikönyvéből (Fekete, 1985)

Anyag neve	Z_{Fekete} [(m/m%) ⁻¹]
Tömör téglá	20
Üreges téglá	12,5
Beton, gázbeton, könnyűbetonok	12
Gipszlapok	12,5
Farost, faforgács lemez	1
Más szerves hőszigetelők	1
Parafa lemezek	1
Ásványgyapot hőszigetelők	2
Műanyag habok	2

A különböző anyagokra vonatkozó „Z” értéket a Fraunhofer Épületfizikai Intézet „Wärme Und Feuchte Instationär” (röviden WUFI) (Fraunhofer IPB, 2013) adatbázisából is összegyűjtöttem a 2. táblázatba.

A második adatbázisban még mindig a téglá számít a legérzékenyebb anyagnak, viszont itt a Fekete könyvben szereplő értékhez képest 40%-kal kisebb. A 1-2. táblázatokból látható, hogy ezen anyag állandók nincsenek meghatározva minden anyagra. Ráadásul az anyagok állandói a különféle szakirodalmakban más értékeket mutatnak. Ez köszönhető annak is, hogy az építőiparban egyre modernebb anyagokat használnak, aminek hatására ez az anyagállandó változik.

A különböző anyagokra vonatkozó értékek tisztázása volt a doktori munkám egyik legfontosabb célkitűzése.

2. táblázat „Z” értékek a Fraunhofer Épületfizikai Intézet adatbázisából (Fraunhofer IPB, 2013)

Anyag neve	Z _{WUFI} [(m/m%) ⁻¹]
Pórusbeton	4
Tömör tégl	8
Könnyűbeton EPS gömb adalékkal	3
Normál beton	8
EPS	0,05
XPS	0,1
PUR	0,4

A második modell polinomiális összefüggést ír le a száraz és nedves hővezetési tényező között:

$$\lambda_n = \lambda_{sz} \pm A\omega \pm B\omega^2 \pm C\omega^3 \pm \dots \quad (9)$$

ahol A, B, C anyagra jellemző állandók.

(Koci, et al., 2017; Björk & Enochsson, 2009; Cagon, et al., 2014; Cammerer, 1963; Crank, 1975; Gertis & Kiessl, 1980; Hall & Allinson, 2009; Karamanos, et al., 2008; Koči, et al., 2014; Kutilek, 1992) (Künzel, 1986; Liuzzi, et al., 2013; Mar, et al., 2008; Mar, et al., 2008; Mrlík, 1985; Skramlik, et al., 2009; Tang, et al., 2008)

A harmadik modell egy exponenciális összefüggést ad meg. Az építőanyagoknál „szokásos” (Fekete, 1985) körülmények között a hővezetési tényező változását leíró exponenciális összefüggés, mely figyelembe veszi az anyag hőmérsékletét (T):

$$\lambda_n = \lambda_{sz} + A \cdot T \cdot \omega \cdot e^{-B\omega} \quad (10)$$

ahol A és B kísérletekkel meghatározható anyagi állandók. A hővezetési tényező nedvességtartalom (ω) függvényében történő, elvi változási lehetőségének egyik paramétere a hőmérséklet (T). Ez a hőmérséklet a víz fázisváltozása miatt alapjában eltérő görbéket eredményez. (Fekete, 1985)

3. Alkalmazott mérési és számítási módszerek

3.1. A hővezetési tényező mérése

A vizsgálataim során különböző anyagok hővezetési tényezőit (λ) mértem teljesen száraz állapotban és eltérő nedvességtartalom (ω) mellett a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Épületfizikai laboratóriumában.

A mérések rendeleleteket, szabványokat és előírásokat betartva történtek. Az anyagok nedvesség felvételével kapcsolatosan az „MSZ EN ISO 12571:2013 (Szabványszám 3, 2013) Építési anyagok és termékek hő- és nedvességttechnikai viselkedése. A higroszkopikus szorpció tulajdonságok meghatározása.” című szabványt követtem. A kis és közepes hővezetési ellenállásánál (nem kevesebb, mint $R=0,1 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$) a MSZ EN 12664:2001 (Szabványszám 4, 2001) szabványt vettem figyelembe. Közepes és nagy (legalább $R=0,5 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$ rendelkező) hővezetési ellenállással rendelkező száraz és nedves építőanyagok esetében az MSZ EN 12667:2001 (Szabványszám 5, 2001) szabványt használtam.

A méréseim során felhasznált anyagok a parafa, expandált polisztirol (EPS 30), pórusbeton (Ytong), grafitos EPS, könnyűbeton, kőzetgyapot, gipszkarton, tömörtégla és sárga színű extrudált polisztirol (XPS) voltak. A vizsgálataimhoz, melyeknél a nedvességtartalmat meghatároztam, szárítógépet (Venticell 111), klímakamrát (Climacell 111) és egy milligramm pontosságú mérleget kombináltam. (Szodrai & Lakatos, 2014b; Szodrai & Lakatos, 2017a)



1. ábra Venticell 111, Climacell 111 berendezések

A minimális nedvességtartalom ($\omega=0 \text{ m/m\%}$) meghatározásához szárítógépet használtam. A szárítógép (Venticell 111) belső terének hőmérséklete 10°C és 250°C között változtatható. A homogén hőmérséklet eloszlást a szárítási folyamat közben egy légárammal biztosítja a

berendezés, így a száradás a mért anyag felületén egyenletesen történik. A készülék szabályozása pontos, a kamra ajtajának kinyitása után a belső hőmérséklet hamar visszaáll, ezt minimális eltéréssel (DIN 12 880:2007-05 Electrical laboratory devices - Heating ovens and incubators (Szabványszám 6, 2007) szabvány szerint 0,4 °C pontossággal) képes tartani. Ezért használható nagy nedvességtartalommal rendelkező anyagok gyors kiszáritásához is.

A szárítás 70 °C hőmérsékleten ment végbe. A hőmérsékleti érték megválasztása abból adódott, hogy ezen a hőfokon a műanyag, habszerű anyagoknál még nem jelentkezik sem fizikai deformáció, sem olvadás. A hőmérséklet viszont elegendően magas ahhoz, hogy a szárítás gyorsan végbe menjen. A szárítás minden esetben MSZ EN ISO 12571:2013 (Szabványszám 3, 2013) szerint tömegállandóságig (de legalább 24 óráig) tartott. A tömegállandóság a szárítás alatt lévő minták súlyméréséből ellenőrizhető. Ha a tömeg három egymást követő mérés során 1 %-nál kevesebbet változott akkor, tömegállandóságot értem el.

A nedvesítésnél klímakamrát használtam. A Climacell 111 típusú klímakamrában páratartalom szabályozás (10 - 95 %) mellett 10 °C-tól 90 °C-ig állítható be a kívánt hőmérséklet. A kívánt páratartalom és a hőmérséklet a szárítógéphez hasonlóan egy légáram segítségével homogenizálható. A működési elvből adódóan gyorsan elérhető a kívánt légállapot. A berendezés a megfelelő relatív páratartalom eléréshez desztillált vizet adagol, melyet egy külső tárolóban tartva, egy csővezetékkel összekötve, szükségszerűen automatikusan vételez a klímakamra, és porlaszt be.

A nedvesítési folyamat a kamrában 20 °C hőmérsékleten és 90 % relatív páratartalom mellett ment végbe. A nedvesítés 4, 8, 12, 16 és 20 órán át tartott. A 90 %-os relatív páratartalmat azért választottam, mert törekedtem a lehető legintenzívebb nedvesítő hatás elérésére. A nedvesítés tehát nem a szorpciós egyensúlyok elérésig tartott, hanem a klímakamrában töltött nedvesítési időig (t). Továbbá a MSZ EN 12664:2001 (Szabványszám 4, 2001) és MSZ EN 12667:2001 (Szabványszám 5, 2001) szabvány megadja azt a szabadságot, hogy tetszőleges relatív páratartalom mellett lehessen nedvesíteni a mintát.

A hővezetési tényező mérése 17 °C-os közepes hőmérsékleten történt. A hővezetési tényező mérés során, hogy a nedvességtartalom ne változzon, a próbatesteket egy vékony fólia réteggel vontam be, ezzel megakadályozva a nem kívánt száradást.

A vizsgált minták klímakamrában 90 % relatív páratartalom és 20 °C-os léghőmérsékleten töltött idejét a továbbiakban „nedvesítési idő”-ként (t) definiálom, ezzel fogom a nedvesség hatását modellezni. (Lakatos, 2014a; Lakatos, 2013a; Lakatos, 2014b; Lakatos, 2011; Lakatos,

2015b; Lakatos, 2013b; Lakatos & Kalmár, 2013a; Lakatos & Kalmár, 2014; Szodrai & Lakatos, 2014b; Szodrai & Lakatos, 2017a)

3.1.1. A hővezetési tényező meghatározása

A Holometrix 2000 hőáram mérő berendezés az anyagok hővezetési tényezőjét képes mérni az „ASTM C518 Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus” (Szabványszám 7, 1991), „MSZ ISO 8301:1998 Hőszigetelés. A hővezetési ellenállás és a kapcsolódó tulajdonságok meghatározása állandósult állapotban. Hőárammérő készülék” (Szabványszám 8, 1998) „Hőszigetelés. Hőátbocsátási tulajdonságok meghatározása állandósult állapotban” (Szabványszám 9, 2000) alapján.

A hővezetési tényező számítását a berendezéshez tartozó Q-Lab nevezetű szoftver végezte. A szoftver először a Fourier egyenletet veszi alapul.

$$Q = \lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (11)$$

ahol Q a hőáram és ΔT a hőmérséklet különbség a minta alsó és felső lapja között.

A - a minta alapterülete [m^2],

Δx - a minta vastagsága [m],

λ - a minta hővezetési tényezője [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$].

Itt a berendezésnek meg kell adni a számításhoz szükséges paramétereket, úgy mint az anyag vastagságát, sűrűségét, a felső és alsó felület hőmérsékleteit.

A mérések előtt meghatároztam a minták vastagságát, majd betápláltam a Q-Lab szoftverbe. Szükséges volt, hogy minden mintánál az alsó és felső lapok párhuzamosan legyenek kialakítva, a mérőberendezés megfelelő használatához. A minták méretre vágását minden esetben az adott építőanyag gyártója végezte el. A mérőberendezés korlátai miatt a minták vastagságai 1 és 10 cm között változhattak. A minta alapterületét a mérőberendezés adott paraméterként kezelte, ezért volt szükséges, hogy a minták szélessége és hossza közel 30 cm legyen. (A 2. ábrán látható egy vastagabb és egy vékonyabb minta kialakítása.) Az anyagok tömegét minden mérés előtt egy milligramm pontos mérlegen határoztam meg, majd kiszámolva az anyag térfogatát, megállapítottam a minta testsűrűségét. A testsűrűség a vizsgált minták tömegének és a hézagokat, üregeket, pórusokat is tartalmazó térfogatának hányadosa.



2. ábra Könnyűbeton és kőzetgyapot minta

A mintákat a berendezésben két mérőlap fogja össze. A mérés során a lapok hőmérsékletét különböző értékeken kell tartani. Az általam választott alsó és felső lap hőmérséklete $T_1=12\text{ °C}$ és $T_2=22\text{ °C}$ volt, így az átlagos hőmérséklet $T_{\text{átlagos}}=17\text{ °C}$ lett. A mérést elkezdve kb. 2-4 óra után a lapok között beállt a hőegyensúly, tehát a mért mintákon egy állandósult állapot, egy egységes hőmérsékleti gradiens alakult ki.

Mérés közben a hőárammérő egy feszültségben mérhető jelet adott a jelátalakítónak, mely ezáltal kiszámolta a hőáramot. Mivel ez a jel egyenesen arányos a hőárammal, a következő képletet írhattam fel.

$$Q = N \cdot U \quad (12)$$

ahol,

N - egy kalibrációs érték, az

U - pedig a feszültségérték szintje a jelátalakítón [V].

A hiteles eredmények érdekében minden mérési időszakban újra kalibráltam a berendezést. Ezzel mindig egy pontos, 5 %-os hibahatárral rendelkező N értékkel tudott számolni a berendezés. A kalibrációt egy ismert hővezetési tényezőjű anyaggal végeztem, ami egy üvegszálas anyag volt ($\lambda_{\text{kalibráció}}=0,05\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$). A kalibráció elvégzése után a szoftver egy kalibrációs fájlt generált. Az aktuális kalibrációs fájlt minden mérés előtt be kellett tölteni a szoftverbe.

A (11) és (12)-es egyenletet egyesítve a következő összefüggést kapjuk:

$$\lambda = \frac{N \cdot U}{A} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta T} \quad (13)$$

ami alapján a berendezés a betáplált paraméterek és a minta függvényében meghatározta a hővezetési tényezőt. Mind a száraz minták, mind a nedvesített minták esetében legalább 10

hővezetési tényező lett mérve és a végeredményt ezen mérések átlaga szolgáltatta. Minden esetben az átlagértékektől való eltérések számtani közepét is kiszámoltam. Ezt az értéket definiáltam mérési hibaként. (Lakatos, 2014a; Lakatos, 2013a; Lakatos, 2014b; Lakatos, 2014b; Lakatos, 2011; Lakatos, 2015b; Lakatos, 2013b; Lakatos & Kalmár, 2013a; Lakatos & Kalmár, 2014; Kalmár, 2002)

3.2. A vizsgált szigetelőanyagok

A hőszigetelő anyagok a természetben előforduló vagy mesterségesen előállított anyagokból gyártott, pórusos vagy szálas szerkezetű, kis sűrűségű termékek. Hőszigetelő anyagoknak azokat a termékeket tekinthetjük, melyek hővezetési tényezője nem haladja meg a $0,15 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ -t. Hatékony hőszigetelő anyagoknak a $0,06 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ alatti hővezetési tényezővel rendelkező termékeket tekintjük. (Horváthné, 1998) A hőszigetelő anyagokat a szerkezeti felépítésük határozza meg, mégpedig az, hogy mekkora mennyiségben tartalmaznak pórusokat és azok milyen összeköttetésben vannak egymással. (Kalmár, 2002; Gróf, 2013)

3.2.1. Expandált polisztirol hab (EPS 30)

A többi hőszigetelő anyaghoz képest alacsony fajlagos ára miatt hazánkban az egyik legnépszerűbb hőszigetelő anyag. Az építőiparban főként a Nikecell és Hungarocell márkanamevein ismerik. Ez a szigetelőanyag nyíltcellás expandált polisztirolból készül. Szerkezetét tekintve kisebb polisztirol golyókból áll, melyek külső felületén a nedvesség megtud tapadni. A hőszigetelés a gyöngyökbe bezárt levegő alacsony hővezetését használja ki.

A gyöngyök viszonylag zártak, így a bennük lévő levegő konvekcióját gátolják. Az EPS 30 megnevezésben a 30 a nyomószilárdságra utal. Ez azt jelenti, hogy már 30 kPa nyomás hatására is az anyag 10 %-ot fog deformálódni. Emiatt egyáltalán nem terhelhető az anyag, így főként függőleges felületeken, elsősorban homlokzatokon használható. Hőmérsékletre érzékeny, 80°C fok felett meglágyul, így deformációra érzékennyé válik. Ezen tulajdonsága miatt a függőleges felülethez való rögzítéséhez dübel kiosztási terv szükséges. (Horváthné, 1998 ; Duskov, 1997; Gnip, et al., 2006; Gnip, et al., 2006; Vējelis & Vaitkus, 2006)

Mindezek mellett tűzveszélyes anyag is, viszont a megfelelő tűzvédelmi előírásokat betartva (Rendelet-hivatkozás 2, 2011) (tűzgátló sávok kialakításával) az egyik leggazdaságosabban alkalmazható hőszigetelés. (Lakatos & Kalmár, 2013b)

3.2.2. Grafittal szennyezett expandált polisztirol hab (Grafitos EPS)

A grafittal „szennyezett” expandált polisztirol hab az EPS-ek egyik változata. A gyártás során hozzá adagolt grafitnak köszönhetően jobb hőszigetelő képességgel rendelkezik, mint a többi hasonló habosított szigetelő anyag. A jobb képesség oka az, hogy grafit részecskéket adagolva a szigetelőanyagba az infravörös hullámhosszú hősugárzás nagy részét visszaveri. A jobb hőszigetelő képességéből adódóan kisebb rétegvastagsággal is elérhető, ugyanaz a hőtechnikai tulajdonság a mint az EPS 30-nak. A grafitos EPS szerkezeti felépítését tekintve a fent említett anyagéhoz rendkívül hasonló. A különbség abban nyilvánul meg, hogy a gyöngyökben lévő apró grafit részecskék jobban vissza tudják verni a hősugárzást, mint a grafit nélküli változatuk. (Lakatos, 2013a; Zhang, et al., 2014)

3.2.3. Kőzetgyapot

A kőzetgyapot gyártása során a bazaltot és a mészkövet magas hőmérsékleten megolvasztják, és vékony szálakat fűjnek belőle. A szálakat szabályos vastagságú, vattaszerű táblákká préselik. A kőzetgyapot szálak szerkezetű, hosszú pórusok építi fel. Az ilyen jellegű anyagok nagy mennyiségű levegőt képesek tárolni magukban. A táblák átszellőznek, így a páradiffúzió könnyen létrejöhét, nedvesség abszorpciója jelentős. A szálszerkezet a fallal párhuzamosan van összepréselve, vagy lépésálló kivitelben a felületre merőlegesen. Ennek köszönhetően relatívan homogén réteg alakul ki, ami egyenletesen képes felvenni a nedvességet. Ezáltal a hőt is egyenletesen vezeti az anyagban, a hőáram ott fokozódhat, ahol a szálak közötti résekbe több víz tud bejutni. Ha a kőzetgyapot tábla külső felületét a környezettől lezárjuk (levakoljuk), a konvekciót megszüntetjük és a nagy levegőtartalom miatt igen jó hőszigetelő képességre lehet szert tenni. Teljes mértékben hő- és tűzálló anyag. Magas hőmérsékletnek kitett helyeken, például padlásfödémeken vagy hőtermelő berendezések közelében a kőzetgyapot nyugodtan alkalmazható. A műanyag hőszigetelő anyagokhoz képest hő általi deformáció nem fenyegeti ezt az anyagot. Sok esetben a tűzvédelmi előírások miatt csak ilyen szilikát alapú szálak hőszigetelés alkalmazható (Rendelet-hivatkozás 2, 2011). Hátrányai közé sorolható a többi hőszigetelő anyaghoz képest a bekerülési költsége és az, hogy a szálak szerkezetből adódóan összenyomható, roskadásra hajlamos. (Horváthné, 1998)

3.2.4. Sárga színű extrudált polisztirol hab (Sárga XPS)

Az extrudált polisztirol hab használatát (a többi hőszigetelő anyaghoz képest) magas árának köszönhetően többnyire minimalizálják. Gyártása körülményesebb az expandált polisztiroléhoz képest, viszont a gyártási technológiával a zártcellás szerkezet teljes mértékben vízzáró lesz,

csak adszorpció, azaz felületi kondenzáció léphet fel rajta. Az anyag szerkezete nem engedi be a nedvességet, mivel a cellák szorosan egymáshoz tapadnak. A hő csak az összetapadt felületeken tud közlekedni, mivel a zárt cellákban lévő levegő nehezebben vezeti a hőt. A nedvesség bejutása a szerkezetbe csak akkor történhet meg, ha az anyag felületén repedés keletkezik. Így talajvíznek vagy egyéb nagy nedvesítési időnek kitett helyeken is alkalmazható, elsősorban épületek lábazatainál, tetőtérnél, teraszoknál.

A zárt cella másik előnye a nagy nyomásállóság, vízszintes teherhordó szerkezetek alatt közkedvelten alkalmazzák. A felépítő polisztirol miatt a hőre érzékeny, magasabb hőmérsékleten, már 85 °C felett visszafordíthatatlan deformáció léphet fel. (Horváthné, 1998 ; Koru, 2016)

3.3. A vizsgált építőanyagok

3.3.1. Gipszkarton

A gipszkartonok között legelterjedtebb az 1,25 cm vékony gipsz készítmény. A könnyűszerkezetes épületek egyik legmeghatározóbb eleme, valamint belső térelválasztásra is alkalmas. Dekorációs elemként is előszeretettel alkalmazzák. A gipsz önmagában rendkívül rideg és porózus anyag, viszont a rá illesztett kartonlapoknak köszönhetően könnyen szerelhető. A gipsz nedvesség abszorpcióra rendkívül érzékeny. A pórusok könnyen telítődnek nedvességgel, ha ez bekövetkezik, mind hőellenállási, mind mechanikai tartóképesége jelentősen csökken. A nedvességfelvétel csökkentésére különleges borítást alkalmaznak. Ezt a (többnyire zöld színnel jelölt) gipszkartont párás helyen, akár fürdőszobákban is lehet alkalmazni. Viszont sem hőszigetelőként, sem teherhordó szerkezeti elemként nem használható. Általában két gipszkarton lap közé közetgyapot hőszigetelést tesznek, ahol a lapok közötti távolság rögzített. Külső felületen való alkalmazás esetén meg kell óvni a csapadéktól. (Horváthné, 1998 ; Ang & Wang, 2004)

3.3.2. Könnyűbeton

Viszonylag egyszerűen előállítható falazati elem, hőszigetelő képessége jobb a nehézbetonhoz képest. Ez abból adódik, hogy a beton keverésekor polisztirol gyöngyöket, kohósalakot adagolnak hozzá. A polisztirol gyöngyök csökkentik a beton szilárdságát, ezért gyártáskor ügyelni kell a megfelelő adagolásra, illetve, hogy a polisztirol gyöngyök ne vándoroljanak fel a szerkezetben és ezáltal ne hozzanak létre inhomogén szerkezetet a beton kiöntésekor.

A beton által kitöltött porózus szerkezet a nedvességet könnyen abszorbeálja, viszont a beleadagolt EPS gyöngyök a hőterjedést gátolják, ezzel javítva a hővezetési ellenállást. A

könnyűbetonok testsűrűségtől függetlenül lépésálló, viszont sűrűségük egyenes arányban változik a hővezetési képességükkel. (Babu, et al., 2006; Horváthné, 1998)

3.3.3. Parafa

A parafát a mediterrán országokban honos paratölgy kérgének hántolásával állítják elő. A parafában 1 cm³-ben kb. 40 millió léggömböszerű sejtecske kapcsolódik össze rugalmasan természetes gyantákkal. A fában lévő gyanta és az apró sejtméretetek miatt hidrofób zárt cellás anyag. Nedvesítés esetén csak adszorpcióra alkalmas, vízálló, így a nedvesség nem jut be a szerkezetébe, fagyálló. Ugyanakkor pára- és légáteresztő képességgel is rendelkezik. Tartósan jó hőszigetelő képességű, az időjárás hatásainak ellenáll. Nagy terhelhetőségű, valamint lépésálló. Főként dekorációként alkalmazott külső és belső burkoló elemként, illetve hangszigetelésként is használják. Nyugat-Európában, ahol olcsóbban hozzáférhető építőanyag, külső vakolat nélkül, hőszigetelésként is alkalmazzák. (Sierra-Pérez, et al., 2016; Horváthné, 1998)

3.3.4. Pórusbeton

A pórusbeton alapanyaga a kvarchomok, a mész és a cement. Meghatározott arány szerint keverve finom szerkezetű és szemcseeloszlású homogén szerkezet érhető el. A pórusos szerkezet a gyártási folyamat közben kis mennyiségű alumínium por hozzáadagolása után érhető el. A gyártmányok sűrűsége, teherhordó képessége és hővezetése az alapanyagok aránya alapján változik. Összetételüktől függetlenül elmondható, hogy a pórusos szerkezetnek köszönhetően jó hőtechnikai képességük van, és teherhordó szerkezetként is alkalmazhatók. Magyarországon pórusbetont a legnagyobb mértékben az Ytong vállalat gyárt, ennek összetétele a gyártó által biztosított. Méréseim során Ytong terméket vizsgáltam. (Horváthné, 1998 ; Azree, 2011; Azree, et al., 2012)

3.3.5. Tömör tégl

Az agyagban lévő adalék (pl. fűrészpor vagy polisztirol gyöngy) anyagok kiegészése során durva, porózus szemcseszerkezetű (mégis sima felületű) kerámia formálódik. Így egy olyan anyagszerkezet alakul ki, amely nagy nyomószilárdsággal rendelkezik, és képes teherhordó szerkezetként funkcionálni. A megfelelően repedésektől mentes kivitelnél a tégl agyag nehezen veszi fel a nedvességet, így csak adszorpcióra képes. Épületeken akár burkolatként is használható. A belső inhomogén porózusságának köszönhetően rossz hővezetési tényezővel rendelkező anyag, mivel a levegővel teli pórusokat a hő kikerüli. A falazóelem hővezető

képességének csökkentésére külön üreges részeket lehet kialakítani. Ebben az esetben az üregek kitölthetik az össztérfogat felét. A tömör téglát az egyik legrégebben használt építőanyag. A felépítő anyagát tekintve változó, kiégetés után többnyire vöröses színű. Hőszigetelő képességét és sűrűségét adalékanyagok megválasztásával lehet befolyásolni. (Horváthné, 1998 ; Morales, et al., 2011) Méréseim során a Wienerberger vállalat külön kérésre készített tömör vörös téglát agyag mintáját alkalmaztam.

3.4. A vizsgált vakolatok

A vakolat az épület homlokzatának az elsődleges védelme. Külső homlokzaton kétfajta vakolatot szokás alkalmazni. Az egyik a nemesvakolat, amit szemcseátmérő (2- 5 mm) vastagságában szokás felhordani a külső felületre. A másik típus a perlitvakolat, amit hőszigetelő vakolatnak is neveznek. Ez azt jelenti, hogy a hőszigetelésre egy bizonyos vastagságban (maximum 3-4 centiméter) helyeznek fel, a nemesvakolat mögé. Megjegyzendő, hogy ekkora vastagság esetén, ami több rétegben való felhordást jelent és a kivitelezhetőség határán van, csupán egy-két században mérhető javulást eredményez a hőátbocsátási tényezőben (U). (Molnár, 2006)

A vakolatoknak tehát nem hővédelmi feladata van, hanem az egyéb külső hatásoktól (UV sugárzás, nedvesség, mechanikaihatás) való védelem a célja. A falszerkezeteknek a nedvességfelvételét is nagyban mérsékelni tudja.

Kutatásaim egyik célja nemesvakolat és perlitvakolat mérséklő hatásának a vizsgálata víz abszorpcióra hajlamos hőszigeteléseken.

Létezik egy harmadik típusú vakolat is: a cementvakolat. A cement hatására a vakolat vízzáró lesz. Ezt csak lábazatoknál használják, ezért vizsgálatom tárgyát ez a típusú vakolat nem képezi.

3.5. A fajlagos hőkapacitás és a nedvesítési idő kapcsolata

A hőtárolás jelenségét elsődlegesen a fűtési idényben, a szakaszos fűtésnél tudjuk kellő mértékben kihasználni, mivel így a hőtermelő energiatárolóként tudja használni az épületet. (Zhun, et al., 2015; Marco, et al., 2016). A hőtárolás nem állandósult, legfeljebb 24 órás ciklus alatt belépő és onnan távozó hőáramok összegeként értelmezhető. A hőkapacitás (C) a hőtároló képesség (w) és túlhőmérséklet hányadosa (T), melyet az alábbi képlettel lehet definiálni (Kalmár, 2003)

$$C = A_j \cdot \sum_{j=1}^n d_{j,t} \cdot \rho_{j,t} \cdot c_{j,t} = \frac{w}{\Delta T} \quad (14)$$

ahol,

C - hőkapacitás [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$],

A_j - a vizsgált felület nagysága [m^2] (Az egyszerűség kedvéért ezt az értéket 1 m^2 -nek veszem, így könnyen általánosítható fajlagos értékről tudok a továbbiakban beszélni.),

$d_{j,t}$ - a j-edik réteg vastagsága [m],

$\rho_{j,t}$ - a j-edik réteg sűrűsége adott nedvesítési időnél [kg m^{-3}],

$c_{j,t}$ - a j-edik réteg anyagának fajhője adott nedvesítési időnél [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$],

w - tárolt hő [kJ],

ΔT - túlhőmérséklet [K] (A túlhőmérséklet a hőtároló réteg átlaghőmérséklete és a külső hőmérséklet különbsége.).

3.5.1. A vizsgált réteg fajhője és sűrűsége

A j-edik réteg fajhője (c_j) és sűrűsége (ρ_j) a nedvességtartalom függvényében változik. Ezeknek a jellemzőknek a nedvességtartalomtól való függését a (15-16) képletekkel írhatjuk le.

$$c_j = \frac{c_{jszáraz} \cdot (100 - \omega_t) + c_{víz} \cdot \omega_t}{100} \quad (15)$$

ahol:

$c_{jszáraz}$ - a j-edik réteg fajhője, melynek lehetséges értékei a 3. táblázatban láthatók [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$],

$c_{víz}$ - a víz fajhője, értéke szintén a 3. táblázatban látható [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$],

ω_t - az építőanyag nedvességtartalma adott nedvesítési időnél [m/m%].

$$\rho_j = \rho_{j0} \cdot \left(\frac{\omega_t}{100} + 1 \right) \quad (16)$$

ahol:

ρ_{j0} - a j réteg testsűrűsége száraz állapotban [kg m^{-3}],

ω_t - adott nedvesítési időhöz tartozó nedvességtartalom [$\text{m/m}\%$].

A képletben szereplő nedvességtartalmakat (ω_t) a mérésekből határozom meg. A nedvességtartalmakból a fajhőket (c) és a sűrűségeket (ρ) a 4, 8, 12, 16 és 20 órás nedvesítési időkre számolom ki. A számításhoz szükséges fajhő értéket a 3. táblázatban rögzítettem.

3. táblázat Anyagok tulajdonságai

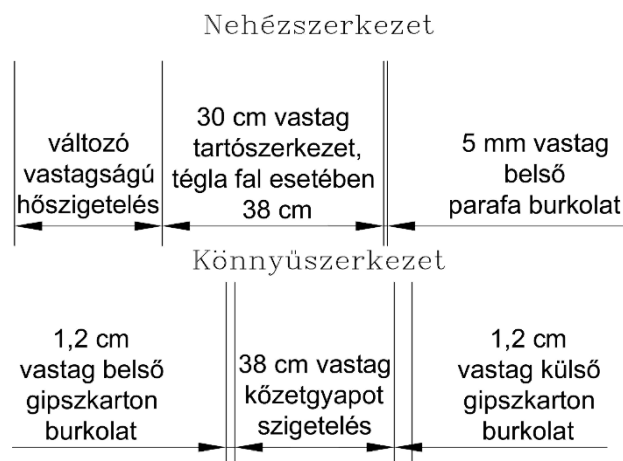
Anyag neve	Fajhő [$\text{kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
EPS 30	1,46
Gipszkarton	0,85
Grafitos EPS	1,46
Könnnyűbeton	1
Kőzetgyapot	0,84
Parafa	1,67
Pórusbeton	1
Sárga XPS	1,46
Tömör tégl	0,76
Víz	4,18

3.5.2. Falszerkezetek

Vizsgálataimban három teherhordó építőanyaggal foglalkoztam: tömör téglával, pórusbetonnal és könnyűbetonnal. A teherhordó építőanyagokat kőzetgyapot, grafitos EPS, EPS 30, sárga színű XPS és parafa hőszigetelésekkel kombináltam. Ezen kombinációk felhasználásával 15 nehézszerkezetet, továbbá a gipszkarton és a kőzetgyapot felhasználásával egy könnyűszerkezetet hoztam létre. A könnyűszerkezet kialakítása egy a mérnöki gyakorlatban sokat használt kombináció volt, mely külső oldalon 2,4 cm, belső oldalon 1,2 cm gipszkartonból és köztük 18 cm kőzetgyapot hőszigetelésből állt. Az általános felépítést a 3. ábrán jelöltem. A nehézszerkezet tartalmazott egy 0,5 cm vastag belső parafa burkolatot, melyet a könnyűbeton és pórusbeton esetében 30 cm, a tömör tégl

esetében pedig 38 cm vastag teherhordó rétegre vittem fel. A hőszigetelést a teherhordó szerkezet külső oldalára rögzítettem. (Szodrai, et al., 2015a)

Vizsgálataimban a hőszigetelés vastagsága szerkezeetről szerkezetre változott. A kívánt vastagságot úgy határoztam meg, hogy a falszerkezet hőátbocsátási értéke teljesen száraz állapotában feleljen meg a közel nulla energiaigényű épületekre vonatkozó követelménynek ($U_{fal}=0,24 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$) (Rendelet-hivatkozás 1, 2006).



3. ábra Szerkezetek vázlata

4. táblázat Falkombinációk

	Tömör téglafal	Könnyűbeton	Pórusbeton
Közetgyapot	1	6	11
Grafitos EPS	2	7	12
EPS 30	3	8	13
Sárga XPS	4	9	14
Parafa	5	10	15
Könnyűszerkezet			16

Az átláthatóság szempontjából készítettem a 4. táblázatot, hogy könnyebben tudjak a továbbiakban hivatkozni az egyes generált szerkezetekre. A 4. táblázatban láthatók az adott szerkezetek kombinációi. A falszerkezetek pontos paramétereit csak a mérési eredményeket felhasználva tudom meghatározni, így ennek bővebb leírását a 4.2.1. fejezetben fogom megtenni.

3.6. A fajlagos hőveszteség-tényező

Az épületek energetikai besorolását a 2006-ban kiadott tárcánélküli miniszteri rendelet (röviden 7/2006. (V.24.) TNM rendelet) határozza meg, ez tartalmazza az épületek energetikai követelményeit. A követelmények közé tartoznak a falszerkezetek hőátbocsátási tényezői, a

fajlagos hőveszteség-tényezője és a primer energiaigénye. Az utóbbi két jellemző magába foglalja az épületgépészeti rendszereket és az épület alakjára, összetettségére vonatkozó összetevőket is. 2014-ben a belügyminiszter a 20. módosításban szigorított a követelményeken. A szigorítás kiterjedt az épületek hőátbocsátási tényezőire, fajlagos hőveszteség-tényezőire és a primer energiaigényekre is. (Rendelet-hivatkozás 1, 2006)

3.6.1. Fajlagos hőveszteség-tényező számítása

Magyarországon az épületek fajlagos hőveszteség-tényezőjét az épületek geometriáját és összetettségét jellemző értékkel, az úgynevezett A/V (fűtött épülettérfogatot határoló szerkezetek összfelület / fűtött épülettérfogat) arányának függvényében adja meg a 7/2006. (V.24.) TNM rendelet (Rendelet-hivatkozás 1, 2006). A következőkben a fajlagos hőveszteség-tényező felső határát vizsgálom meg közel nulla energiaigényű épületekre. (Szodrai, et al., 2015a)

A fajlagos hőveszteség-tényező két részből áll, transzmissziós veszteségből és sugárzási nyereségből. Az értéke az előzőekben részletezett számításokat felhasználva a következő képlet segítségével számolható ki:

$$q = V^{-1} \cdot (\sum(A_j \cdot U_j) + \sum(l \cdot \psi) + Q_{SD} \cdot 72^{-1}) \quad (17)$$

ahol:

V - fűtött épülettérfogat [m^3],

A_j - a fűtött épülettérfogatot határoló szerkezetek összfelülete [m^2],

U_j - az adott épület részének a hőátbocsátási értéke [$W m^{-2} K^{-1}$],

l - az épület kerülete [m],

Ψ - a padló vonalmenti hőátbocsátási értéke [$W m^{-1} K^{-1}$],

Q_{SD} - direkt sugárzási nyereség fűtési idényre vonatkoztatva [$kW h \text{ év}^{-1}$],

q - fajlagos hőveszteség-tényező [$W m^{-3} K^{-1}$],

72 - hőfogyasztás számításánál: az órafokban kifejezett konvencionális ($12 \text{ } ^\circ C$ határhőmérséklethez és $20 \text{ } ^\circ C$ belső hőmérséklethez, azaz 8 K egyensúlyi hőmérséklet-különbséghez tartozó) hőfokhíd értékének ezredrésze (a $W kW^{-1}$ átszámítás miatt) [$h K$].

Az így leírt módszer alapján generált épületekből lehetőségem nyílt tetszőleges A/V arányú épület fajlagos hőveszteség-tényezőjének változását leírni a nedvesítési idő függvényében és megvizsgálni, hogy bizonyos idejű nedvesítési idő után a szerkezet megfelel-e a közel nulla energiaigényű épületekre vonatkozó követelménynek.

A számításaim elvégzéséhez definiálnom kell az épületgeometriát, meg kell adnom, hogy a nedvesítés előtt mekkora hőátbocsátásokkal rendelkezett az épület, továbbá hogyan alakultak a transzmissziós veszteségei és mekkora a sugárzási nyereség. (Szodrai, et al., 2015a)

3.6.2. Az épület alakja

Annak érdekében, hogy szemléltetni tudjam a nedvesítési idő hatását tetszőleges alakú épület fajlagos hőveszteség-tényezőjére, egy képzeletbeli épület modellt hoztam létre. Ennek az épületnek a fűtött felülete és fűtött térfogatának aránya (A/V) bizonyos megkötések között mozog. Az A/V arány növekedése egy 10 méter széles és 10 méter hosszú egyszintes épületnél kezdődött, majd az épület hossza egészen 200 méter hosszúságig növekedett. Az épület alakjának változása lépésről lépésre történt. Az épület belmagassága 2,7 méter, ezt végig állandó értéken tartottam. Az épület magassága úgy változott, hogy a szintmagassághoz hozzáadtam 3 métert minden egyes szintnövekedésnél, az épület hossza pedig 20 méterrel nőtt. Mivel az épület hossza megnőtt, a födém területe és az épület kerülete is változott. Az épületnek a méretétől függetlenül egy bejárata volt, melynek a felülete $2,4 \text{ m}^2$. A minimális üvegezett felületnek a fűtött alapterület nyolcad részét vettem. Ezeket a peremfeltételeket alkalmazva készültek el az épületek.

A homlokzat felületét úgy számoltam ki, hogy a kerületet megszoroztam a szintmagassággal és az emeletek számával. A padlót és a födémét vízállónak feltételeztem, így a nedvesítési időnek nem volt hatása rájuk a számításaim során. A szerkezetek hőtechnikai adatait az 4.2.1. fejezetben megadott értékekkel vettem figyelembe. (Szodrai, et al., 2015a)

A számítások egyszerűsítéséhez további peremfeltételeket alkalmaztam: 1) a homlokzatnál a külső és belső vakolatnak sem a hőtechnikai sem a nedvességfelvételi tulajdonságaival nem számoltam. Bár vakolat alkalmazása szükséges a fal mindkét oldalán, energetikai szempontból ennek nem kívántam a hatását megvizsgálni, a vakolatot a hőtechnikai számításokból kihagytam. Mert a hőtechnikai hatása elenyésző. 2) A felületi hőátadási tényezőket szintén állandónak adtam meg a külső felületre $24 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ -t (h_e), míg a belső felületre $8 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ -t (h_i) vettem alapul a számításokhoz. (Kalmár, 2003)

Feltételeztem továbbá, hogy a nedvesség, mint magas páratartalom vagy csapóeső a vizsgálatomban csak az épület homlokzatára hat. Az épület alapzatát jó talajnedvesség elleni és páravédelemmel ellátott XPS (extrudált polisztirol) hőszigeteléssel zártam el, ami remek lépésállóságot is biztosít. Hasonlóképpen jártam el a födém esetében is, mert itt is rendkívül fontos a nedvesség teljes mértékű távoltartása.

3.6.3. Megengedett hőátbocsátási értékek

Ahhoz, hogy a fajlagos hőveszteség-tényezőt megvizsgáljam, az épületekre különféle szerkezeteket kellett létrehozni. Mindegyik szerkezeti elemnek meg kell felelnie a közel nulla energiaigényű épületek elvárásainak, ahol a szerkezetre vonatkozó megengedett hőátbocsátási értékek a következők:

$U_{\text{fal}}=0,24 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ a fal hőátbocsátási tényezője,

$U_{\text{ajtó}}=1,45 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ az ajtó hőátbocsátási tényezője,

$U_{\text{ablak}}=1 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ az ablak hőátbocsátási tényezője,

$U_{\text{padló}}=0,3 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ a padló hőátbocsátási tényezője,

$U_{\text{födém}}=0,17 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ a lapostető vagy padlásfödém hőátbocsátási tényezője.

A számításom alapját ezek az értékek képezték, azonban a falak hőátbocsátási tényezőjét (U_{fal}) a nedvesítési idő függvényében változtattam. (Szodrai, et al., 2015a)

3.6.4. Transzmissziós veszteségek

A transzmissziós veszteségek két kategóriába sorolhatók: felületi, illetve vonalmenti hőveszteségre. A számításaim során az alábbi képletet alkalmaztam:

$$\sum(A_j \cdot U_j) = A_{\text{fal}} \cdot U_{\text{fal}} \cdot (1 + \chi) + A_{\text{födém}} \cdot U_{\text{födém}} + A_{\text{ablak}} \cdot U_{\text{ablak}} + A_{\text{ajtó}} \cdot U_{\text{ajtó}} \quad (18)$$

ahol:

A_j - az adott épület részének a felülete [m^2],

U_j - az adott épület részének a hőátbocsátási értéke [$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$],

χ - a rendelet vonatkozásában a hőhidak hatását kifejező korrekciós tényező [-].

A vonalmenti hőveszteség csak a külső fal és a talajra fektetett padló mentén lépett fel. A falra vonatkoztatott hőhidak hatását kifejező korrekciós tényezőnek 0,15-öt vettem fel. Továbbá a talajra fektetett padló hőveszteségét a vonalmenti hőveszteség és az épület területének szorzata adta meg.

A padló vonalmenti transzmissziós hőveszteségét egy lineáris hőátbocsátási értékkel számoltam. Ennek az értéknek a meghatározásainál az „MSZ EN ISO 10211:2008 Hőhidak az épületszerkezetekben. Hőáramok és felületi hőmérsékletek. Részletes számítások” elnevezésű szabványt használtam (Szabványszám 10, 2008), így a padló vonalmenti hőátbocsátási értéke $\Psi=0,85 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

3.6.5. Direkt sugárzási nyereség, fűtési idényre vonatkoztatva

Az éves szoláris nyereség egyszerűsített módszer alapján az északi tájolásra vonatkozó sugárzási energiahozammal számítható.

$$Q_{SD} = \sum A_{ablak} \cdot g_{\ddot{u}} \cdot \varepsilon_h \cdot Q_{TOT} \quad (19)$$

ahol:

A_{ablak} - az üvegezett részek felülete [m^2]

$g_{\ddot{u}}$ - az üvegezés összesített sugárzásátbocsátó képessége, ötrétegű ablakok esetében ez az érték 0,5,

ε_h - a hasznosítási tényező, értéke nehéz szerkezetű épületekre: 0,75,

Q_{TOT} - sugárzási energiahozam a fűtési idényre, fajlagos hőveszteség-tényező számításához, északi tájolásra 100 kW h m^{-2} .

3.7. Különböző környezeti klímák hatásának vizsgálata szimulációs programmal

Célom volt éghajlati jellemzők alapján megvizsgálni, hogy a nedvesség hatására a 16 általam (3.5.2-es alfejezetben) kialakított szerkezetből összerakott épületnek mennyire változnak meg az átmeneti időszakban a transzmissziós veszteségei illetve fűtési energiaigényei, valamint az egész éves primer energiaigényei. A számításaimhoz felhasznált adatbázis Magyarország és négy vele szomszédos ország (Ausztria, Románia, Szlovákia és Horvátország) fővárosainak éghajlati adatait tartalmazta. (Szodrai & Lakatos, 2015b; Szodrai & Lakatos, 2016)



4. ábra Vizsgált országok a fővárosukkal

3.7.1. A vizsgált területek

A hűvös kontinentális éghajlatot hideg tél és meleg nyár, nagy hőmérséklet ingás és alacsonyabb évi középhőmérséklet jellemzi. A közepes és magasabb földrajzi szélességeken lévő kontinenseken alakulnak ki, ahol kedvező vízellátottság tapasztalható. A csapadék évi mennyisége 500-1000 mm között változik. Nagyobb része a vegetációs időszakban, tavasz végén és nyár elején hull le, de a tél sem csapadéktalan. A nyári csapadékmaximum oka részben a hőmérsékletjárás, amely miatt a levegő vízgőztartalma nyáron nagy, télen kicsi. (Péczy, 1979) Ezen a kontinentális éghajlaton Magyarország és vele szomszédos négy további ország klímáját vizsgáltam meg.

Ausztria a mérsékelt égövben fekszik, mégpedig a közép-európai klímazóna azon részén, ahol az óceáni és a kontinentális hatás egyaránt érvényesül. A négy évszak (tavasz, nyár, ősz, tél) mindegyike tipikus hőmérsékleti értékeket és éghajlati adottságokat mutat. A földrajzi sokszínűségnek, valamint a relatív nagy nyugat-keleti kiterjedésnek köszönhetően három klímazónát különböztethetünk meg az országon belül. A keleti vidékeken kontinentális jellegű pannóniai klíma (csapadékban szegény, forró nyár és enyhe tél). A hegyvidékeken alpesi klíma (csapadékban gazdag, rövid nyár, hosszú tél). Egyéb térségekre jellemző az átmeneti klíma óceáni befolyással nyugaton, kontinentális befolyással délkeleten. (Internetes hivatkozás 1, 2017)

Horvátországban részben kontinentális, mérsékelt szárazföldi, hegyvidéki, az adriai tengerpart mentén pedig kellemes mediterrán éghajlat van. A szárazföldön az átlagos januári hőmérséklet 0 és 2 °C között van, augusztusban 24 – 28 °C között, míg a tenger melléken az átlagos januári hőmérséklet 6 és 11 °C, augusztusban pedig 26 és 30 °C között mozog. A kontinentális részen a június az egyik legcsapadékosabb hónap, 10-14 mm esővel lehet számolni, tavasszal általában lényegesen kevesebb a csapadék esik. (Internetes hivatkozás 2, 2017)

Magyarország a 45 ° 45 ' és 48 ° 35 ' északi szélességek között fekszik, nagyjából középen az Egyenlítő és az Északi-sark között, a szoláris éghajlati felosztás szerint a mérsékelt övben. Éghajlata nagyon változékony. A változékonyság egyik fő oka az, hogy éghajlatára a kiegyenlítettebb hőmérsékletjárású, csapadékos óceáni, a szélsőséges hőmérsékletű, kevés csapadékú kontinentális, illetve a nyáron száraz, télen csapadékos mediterrán éghajlat egyaránt hatással van; ezen klímátípusok közül bármelyik hosszabb-rövidebb időre uralkodóvá válhat. Az országon belül az időjárásban ezért jelentős különbségek fordulhatnak elő a viszonylag kis terület és sík felszín ellenére. Az 1981-2010 közötti havi csapadékösszegek alapján január, február, július és október tekinthető kiemelkedően esősnek. (Internetes hivatkozás 3, 2017)

Romániának átmeneti mérsékelt kontinentális éghajlata van, de módosító hatással van rá az óceáni és a mediterrán klíma is. Az éghajlat mérsékelt jellegét az ország földrajzi fekvése határozza meg. Románia a 45°-os északi szélesség mentén, a mérsékelt éghajlati övben fekszik, egyenlő távolságra az Egyenlítőtől és az Északi-sarktól. Ennek következtében az évi középhőmérséklet +10 °C, jól elkülönül a négy évszak, valamint a szél és a csapadék rendszertelenül jelentkezik. Az éghajlat kontinentális, mivel az ország a földrajzi Európa középső övezetében helyezkedik el. Az éghajlat átmeneti jellegű, mert a keleti kontinentális éghajlat hatása éppúgy érződik, mint a nyugati óceáni éghajlaté. A fenti tényezők mellett az

éghajlattípusokat meghatározza a domborzat is, elsősorban a hegységek iránya és magassága valamint a Fekete-tenger közelsége. A csapadék mennyisége és térbeli eloszlása híven tükrözi az ország domborzatát. A legkevesebb csapadékot a Duna-delta vidéke és a Fekete-tenger partvidéke kapja (400 mm-en alul), a legtöbbet pedig a Déli-Kárpátok (évi 1200 mm körül). A csapadék időbeli eloszlása kontinentális jellegű. Súlyos, nyári aszályok főleg a Román-alföldön és Dobrudzsában lépnek fel. A magas hegyvidékekben többnyire 6 hónapig van hótakaró. Az ország többi részén a csapadék legnagyobb része eső alakjában hull le. (Ádám, et al., 1971)

Szlovákia a mérsékelt éghajlati övezetben, Európa atlanti és kontinentális zónájának a határán fekszik. Az éghajlati körülmények nagy mértékben különböznek a síkságokon és a hegyekben. A síkságok éghajlata száraz és meleg. A hegységek éghajlata inkább nedvesebb, hűvösebb és változékony. Szlovákia legmelegebb része a Dunamenti-alföld, a leghidegebb pedig a Tatra vidéke. Az ország legszárazabb része a Dunamenti-alföld, itt az éves csapadékmennyiség 500 és 600 mm között van. A legnedvesebb vidék a Tatra vidéke. Különösen csapadékosak a tatrai völgyek, ahol évente több mint 2000 mm csapadék is lehullhat. A magasabb hegységekben a csapadék nagy részét hó alkotja. A Tátrában a nyár közepén is havazhat, és magasabb tengerszint feletti magasságokban az összefüggő hóréteg novembertől egészen májusig megmarad. A legcsapadékosabb hónapok június és július, a legszárazabbak az őszi hónapok. (Internetes hivatkozás 4, 2017)

Az éghajlat további sajátossága, hogy legalább három hónap középhőmérséklete 18°C fölött van a 0°C -nál alacsonyabb középhőmérsékletű hónapok száma háromnál nem több. A téli csapadék egy része hó alakjába hullik le, a hócsapadék mennyisége kevesebb a téli csapadékösszeg felénél. Általánosságban elmondható, hogy ezen térségekben októbertől márciusig az átlaghőmérséklet 12°C alatt van, amikor a relatív páratartalom átlagosan 70 % fölött van, vizsgálatomat erre az időszakra nézem meg. (Péczy, 1979)

3.7.2. A vizsgált épület

A primer energia számítógépes programmal történő számításához meg kellett adnom néhány belső paramétert. Az energetikai vizsgálatokat egy családi házra vonatkozóan végeztem el. A vizsgálataimat egy hipotetikus, szokványos paraméterekkel rendelkező lapostetős családi házra végeztem el. A gondolatkísérlet elvégzéséhez, ami a számítások és a szimulációk alapját képezte, az előzőekben említett 16 teljesen száraz és képzeletben nedvesített homlokzati szerkezetet vettem alapul. A szimulációkat a CASAnova 3.3 energetikai szimulációs szoftverrel hajtottam végre. (Clemens, 2000; Clemens, et al., 2001)

A homlokzat mind a négy oldalán azonos méretű, üvegezett, fakeretes ablak található, egyenként $3,2 \text{ m}^2$ területűek és háromszoros üvegezésűek. A keretezés a teljes ablakfelület 20 %-át teszi ki. A bejárat ajtó $2,1 \text{ m}^2$ területű. A vizsgált épület egyszintes, négyzet alapú és homlokzatai a fő égtájak felé irányulnak. Az épület nettó fűtött alapterülete 100 m^2 , a belmagassága 2,7 m. A primer és fűtési energiaigények számításához szükséges volt megadni a belső gépészeti paramétereket. Fontos megjegyezni, hogy a szimulációk könnyebb elvégzéséért az épületet egyzónásnak tekintettem, miszerint az épület nem tartalmaz külön fűtött tereket, szobákat. Ez a valóságban nehezen lenne kivitelezhető a szobák különböző funkciói miatt, habár ma már az összevont terek (nappali+étkező+konyha) alkalmazása a családi házak tervezésénél és kivitelezésénél egyre nagyobb hangsúlyt kap. A belső tevékenységek közben a többnyire nyitott belső ajtók egy légteret generálnak, így mégis egyzónásnak tekinthető az épület. A ház hőforrása egy kondenzációs kazán, mely $70/50 \text{ }^\circ\text{C}$ -os hőfoklépcsővel működik. A hőleadók falra helyezett radiátorok, melyek mindegyike termosztatikus szeleppel van ellátva 1 K-es szabályozási fokkal.

A fűtési energiaigényt nagyban befolyásolja a belső környezet állapota. A vizsgálataimnál egy teljesen átlagos belső állapotot feltételezve, $20 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékletet állítottam be, az emberi tevékenységből származó hőt pedig $2,9 \text{ W m}^{-2}$ -nek vettem fel. A filtrációból származó légcserére 1 h^{-1} -t alkalmaztam. Az épület mesterséges szellőzéssel nem rendelkezik.

A fűtési energiaigényt nagyban befolyásolják a helyi klimatikus adottságok. Az 3.7.1 pontban bemutatott klíma zónák különböző mértékben igényelnek fűtési energiát. A vizsgálatomban öt közép-európai ország fővárosának klímájára vonatkozó adatokat választottam ki: Bécsét (Ausztria), Budapestét (Magyarország), Bukarestét (Románia), Pozsonyét (Szlovákia) és Zágrábét (Horvátország). Ezek, bár földrajzilag viszonylag közel helyezkednek el egymáshoz, kis mértékben mégis különböző a klímájúak. A változó klimatikus adatokat a szimulációs szoftver biztosította számomra. (Szodrai & Lakatos, 2015b; Szodrai & Lakatos, 2016)

3.7.3. Az alkalmazott szoftver

Ahogy korábban említettem, számításaimat CASAnova 3.3 energetikai szimulációs programmal készítettem el. A programot a siegeni egyetemen fejlesztették ki, lényege, hogy oktatási célból, grafikus felületen a számításokhoz szükséges paramétereket megadva, ki tudja számolni egy vizsgált időszakra az energiaértékeket (szoláris nyereségek, primer energiaigény, fűtési energiaigény, transzmissziós veszteség, belső nyereségek).

A programban először adhatók meg a belső geometriai értékek, a hosszúság és a szélesség, az emeletek száma, valamint a tájolás. Kiegészíthető nyeregtetővel is az épület, ekkor a nyeregtető magasságát is meg kell adni.

A homlokzati üvegezetség arányát százalékosan adhatjuk meg mind a négy égtáj felé. Az ablakok paramétereit is fel lehet vinni előre elrendelt opciók szerint vagy egyedileg.

A határoló szerkezetek (fal, ajtó, födém, padló) hőátbocsátási tényezőit is megadhatjuk külön égtájanként. A hőhidak megadása tekintetében három lehetőséget ad: átlagosan, gyengén illetve elhanyagolható mértékben hőhidas szerkezet.

A szoftver csak egyzónás épületet tud leszimulálni. Ez azt jelenti, hogy nem lehetséges egyszerre több különböző belső paraméter megadására az épületre vonatkozóan. Ha többzónás szimulációt akarunk végig futtatni, akkor párhuzamosan egyszerre több szimulációt kell véghez vinni. A belső paramétereket tekintve megadhatjuk azokat a hőmérsékleti értékeket, ami alatt fűteni vagy ami felett hűteni szeretnénk. Továbbá meg lehet adni a szellőzés módját, belső nyereségeket és, hogy a falak könnyű-, közepes- vagy nehézszerkezetűek.

Mivel klimatikus adatokat is felhasznál a program, a világ különböző területeiről hívhatók be adatok, amivel számolhat. Mivel a program Németországban készült, így a németországi területekre vonatkozóan nagyobb adatmennyiség áll rendelkezésre. Európára csak a fővárosok adatai vannak megadva. Lehetőség van külön, saját meteorológiai adatok bevitelére is. A dolgozatomban a programba megadott klímaadatokkal számoltam. Végül az épület hőtermelői, hőleadói és a primer energiaforrás típusa is kiválasztható.

A szimulációs eredményeket különböző diagramok szemléltetik. A program hónapokra lebontva megadja a fűtési vagy hűtési órák számát, vagy az előbb említett energia értékeket. Az energiaszámítások ábrázolására Sankey diagramot használ. A kutatásomban ezekből a adatokból vettem ki a szükséges primer energiaigényt, az fűtési energiaigényt, valamint a transzmissziós veszteségeket. E három paraméter tekinthető az épületre vonatkozó legfontosabb

épületenergetikai jellemzőnek. (Internetes hivatkozás 5, 2007; Internetes hivatkozás 6, 2007; Internetes hivatkozás_7, 2007; Clemens, 2000; Clemens, et al., 2001; Schnieders & Heidt, 1997; Szabványszám 11, 1981; Szabványszám 12, 2003)

3.7.4. Az épületenergetikai jellemzők számítása a programmal

Ezen jellemzők számításával kapcsolatban a (Clemens, 2000) irodalom ad pontosabb leírást. A számítást tekintve a program eltérően számol a 7/2006 (V.24.) TNM rendelethez képest. A számítási eltérés a rendelethez viszonyítva abból adódik, hogy a program más országokra vonatkozó klíma adatokat is fel tud használni, továbbá az egyes energetikai számításokban a németországi átalakítási tényezőket használja, míg a valóságban azok európai országokként változhatnak.

A transzmissziós veszteség megmutatja a hőátadási tényezők és a hőmérséklet függvényében, hogy mennyi hőenergia távozik az épület szerkezetein át a vizsgált időszak alatt. A nedvesítési időnek erre az épületenergetikai jellemzőre van a legnagyobb hatása.

A fűtési energiaigény megmondja, hogy az épületekben található fűtési rendszereknek a vizsgált időszakban mennyi hőenergiát kell szolgáltatniuk. Ebben a hőenergiában benne van az épület éves transzmissziós veszteségéből az a hányad, amit a fűtési rendszer fedez, és a szellőztetésből származó veszteség is, viszont a belső hőnyereségek és a szoláris nyereség csökkentik az értékét.

A primer energia a TNM (Rendelet-hivatkozás 1, 2006) rendelet szerint: „Az a megújuló és nem megújuló energiaforrásból származó energia, amely nem esett át semminemű átalakításon vagy feldolgozási eljárásen.” Ez alapján a fűtési primer energiaigény ténylegesen megmutatja, hogy a fűtési rendszerbe évente mekkora mértékű primer energiát szükséges betáplálni, hogy képes legyen a kívánt igényeket fedezni. Ennek az értéknek a nagyságát a hőtermelő berendezés és a fűtési rendszer határozza meg. (Szodrai & Lakatos, 2015b; Szodrai & Lakatos, 2016)

3.8. A levegő mozgásának hatása a vizsgált falszerkezet hőáramára

A doktori munkám során célom volt a falszerkezeten áthaladó hőáram laboratóriumi körülmények közötti vizsgálata. Ez fontos lehet a tervezőnek is, mivel nem csak az adott építőanyagról kaphat képet, hanem egy teljes falszerkezetről is adott esetben és a hőátadási tényezőkről is.

A munkámban a hőáram mérését és számítását mutatom be egy falszerkezet előtti szabad és kényszerített légáramlás esetén. Hukseflux berendezéssel kvázi stacioner állapotban megmértem a falnak a hővezetési ellenállását. A méréseket egy két oldalról vakolt téglafalon végeztem el, amit utána 1,3 cm vastag aerogél paplannal szigeteltem. Az aerogél könnyű nanopórusos anyag, amit már 70 éve felfedeztek, de csak az elmúlt években terjedt el a használata. A hővezetési tényezője $0,02 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ körüli értékű. Előállítás rendkívül költséges, ezért csak olyan helyeken használják, ahol elengedhetetlen a vékony falszigetelés, például műemlék jellegű épületeknél. Az aerogélt általában paplan kivitelben árusítják, ami szilikagéllal összekötött aerogél szálakból áll. (Galliano, et al., 2016; Ghazi, et al., 2015; Jelle, 2011; Stahl, et al., 2012)

Vizsgálataim során szabad és kényszerített légáramlásnál hőszigetelt és szigeteletlen falon végeztem mérést. A kényszerített áramlást egy ventilátor segítségével hoztam létre három különböző irányból 1 m s^{-1} -os légsebességgel.

A szél egy épületre statikus és dinamikus nyomást fejt ki, amire az épület a szerkezetétől függően reagál. A légmozgás (szél) hatással van az épületszerkezet hőveszteségére, ezáltal az energiafelhasználására is. Vannak létező kísérleti eljárások a szélhatás kifejezésre, különféle légáramok esetére. Az épület külső felületéről távozó konvektív hőáramsűrűség $q_c \text{ (W m}^{-2}\text{)}$ fontos része az épületek energiafelhasználásának modellezésében. A hőáramot a következő módon fejezhetjük ki:

$$q_c = h_c \cdot (T_w - T_a) \quad (20)$$

ahol:

h_c - konvektív hőátadási tényező [$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$],

T_w - a fal felületi hőmérséklete[K],

T_a - a léghőmérséklet [K].

A h_c értéke sok tényezőtől függ, befolyásolhatja az épület formája, érdeessége, a légmozgás iránya vagy sebessége $u_{\text{levegő}}$ (m s^{-1}). A vezetési és sugárzásos hőátadás számolására mára jól leírt, általánosan elfogadott módszerek vannak. A (20)-as egyenletben láthatjuk a h_c tényezőt, amelynek segítségével számítható a felületi hőátadás. (Chávez-Galán, et al., 2014; Dodog & Halász, 2016; Davies, et al., 2005; Martynenko & Khramtso, 2005; Khalifa, 2001; Obyn & Moeseke, 2015; Ohlsson, et al., 2016)

3.8.1. A hőáram mérése

A falszerkezeten áthaladó hőáram méréséhez két darab Hukseflux (HF) HFP01 típusú (kör alakú és $50,24 \text{ cm}^2$ felület nagyságú) hőárammérő-szenzor használható, amihez tartozik továbbá négy hőmérsékletérzékelő. A hőmérséklet érzékelőket párban, a falszerkezet hideg és meleg oldalára kell feltenni. Ezek segítségével a falon keresztül átmenő hőáram és a hőmérséklet különbség közvetlenül mérhető. A mért hőáramokból és a hőmérsékletek különbségéből a falak hőátbocsátási ellenállása (R) kiszámítható. Az alkalmazott eszközök ISO 9869, ASTM C1046 és a ASTM C1155 szabványok szerint működnek.

A mérés $-30 - +70 \text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékletek között végezhető -2000 -tól 2000 W m^{-2} tartományban 5% -os pontosság mellett. A hőáram méréséhez stacioner vagy kvázi stacioner állapotra van szükség, amiben egy stabil hőfok gradiens alakul ki. Ennek eléréséhez egy közel adiabatikus kamra szükséges, mely rendelkezik egy fűtött és egy hűtött oldallal. A két oldalt elválasztó részen végezhető a mérés. A kamra két részre osztott, egy hideg és egy meleg oldalra, mindegyikük 2×3 méter nagyságú, belmagasságuk $2,55 \text{ m}$, és 50 cm vastag EPS 200-as hőszigetelés veszi körbe. A hideg szoba hőmérséklete 3 hűtőgerenda segítségével $-16 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ -ig csökkenthető, míg a meleg oldal $25 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra fűthető fel egy elektromos fűtővel. Így a mérés során ezek a hőmérsékleti adatok rögzítettek voltak. A hőmérséklet szabályozása miatt viszont tapasztalható volt némi ingadozás, ezért a kamra léghőmérsékleti adatait bizonyos tűréssel tüntettem fel. A szabályozó rendszer működése miatt tekintettem ezt a folyamatot kvázi stacioner állapotnak. Az elválasztó falnál 52 cm magas parapett magasságnál egy, $1,2 \times 1,2$ méteres, 25 cm vastag téglával befalazott ablak található. A fal mindkét oldala $1,5 \text{ cm}$ vastag vakolattal ellátott. A méréseim egyik felében a mért falat $1,3 \text{ cm}$ vastag aerogél szigeteléssel vontam be.

A Hukseflux használatával meg lehet határozni a mérőkamrában vizsgált szerkezet hőellenállását a következő képlettel:

$$R_w = \Delta T_w / \varphi \quad (21)$$

ahol ΔT_w a mért és K-ben kifejezett hőmérséklet különbség a falszerkezet belső és külső felülete között, φ (W m^{-2}) az átlagos hőfluxusa a falnak, R_w pedig a falszerkezet hőellenállása $\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$ -ben.

A hőmérsékletérzékelőkkel a léghőmérsékletet is rögzítettem, a fal két oldala közötti levegő hőmérséklet különbséget (ΔT_a)-t pedig kiszámítottam, így

$$R_a = \Delta T_a / \varphi \quad (22)$$

egyenletet kaptam, ahol R_a a teljes hőellenállás.

$$R_a = R_{sT} + R_w \quad (23)$$

$$R_{sT} = R_a - R_w \quad (24)$$

A teljes felületi hőellenállás (R_{sT}) tartalmazza a mindkét (hideg és meleg) oldalra vonatkoztatott felületi hőellenállási tényezőt.

$$R_{sT} = \frac{1}{h_{is}} + \frac{1}{h_{es}} = \frac{1}{h_{is,es}} \quad (25)$$

ahol h_{is} és h_{es} a belső és külső felületi hőátadási tényezők, melyek a HF mérés eredményéből számolhatók ki. Mivel kezdetben mindkét oldalon szabadáramlást vizsgáltam, ezt a két tényezőt egyenlő nagyságúnak tekinthetjük. (Lakatos, 2017; Lakatos, 2014b; Lakatos, 2015a; Lakatos, et al., 2015)

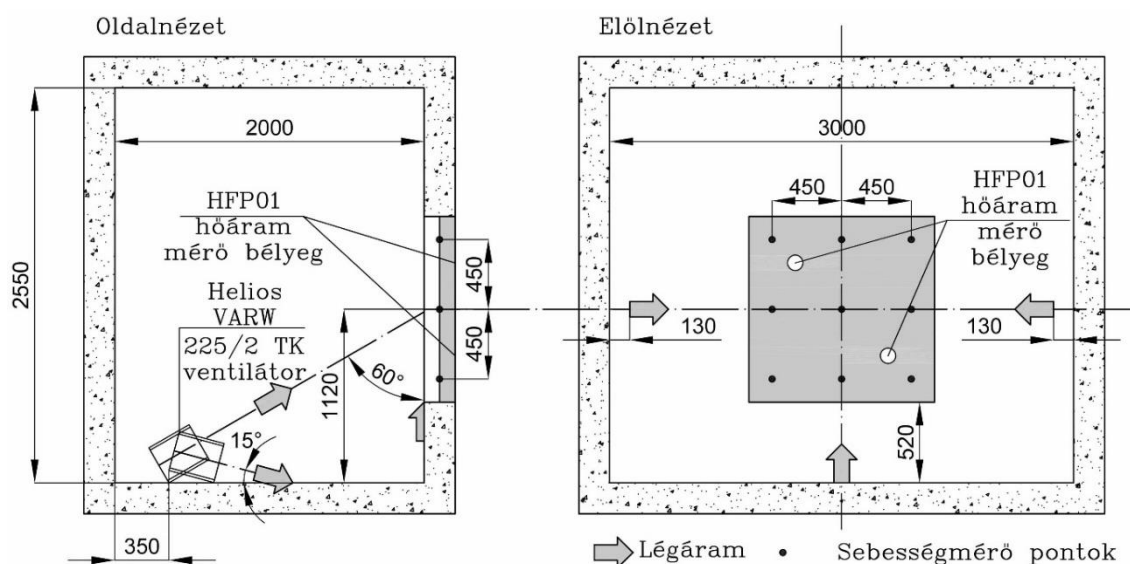
3.8.2. A levegő mozgása

A kényszeráramot egy Helios VARW 225/2 TK 350 W axiál ventilátorral biztosítottam. A célom az volt, hogy a mérési felület mentén egy $1 \pm 0,1 \text{ m s}^{-1}$ -os sebességű légáramot biztosítsak. A légáram esetenként jobbról, balról vagy alulról érkezett.

A 5. ábra segítségével szeretném bemutatni, hogyan állítottam be ezeket a légáramokat. Az ábrán látható vastag szürke nyilak segítségével jelöltem a levegő irányát. Az előlnézeti képen láthatók a légáramok támadási pontjai, tehát azok a pontok, ahol a ventilátor hossz tengelye metszi az előtte lévő fal síkját. Azokban az esetekben, amikor a ventilátorral oldalról fújtam a mért felületet, a ventilátort a kamra oldalához tettem és a mért felület (szürke négyzet)

középmagasságát céloztam be. Ekkor a ventilátor hossz tengelye és a mért felület 60 °-os szöget zárt be. Abban az esetben, amikor alulról lett megfújva a falfelület, a ventilátort előre döntöttem a padló felé, ezzel javítva a légáram szétterülését a felületen.

A sebességeloszlás homogenitását egy szárnykerekes anemométerrel ellenőriztem le. A sebességmérő pontokat az 5. ábrán jelöltem. A mérési pontok között 45 cm távolságot hagytam.



5. ábra A mérőkamra vázlata

Ezekkel a megkötésekkel három kényszeráramlási és egy szabadáramlási esetet hoztam létre. A szigetelés levétele után, megismételve a méréseket, további nyolc esetet tudtam vizsgálni.

3.8.3. A felületi hőellenállás hasonlósági elmélet alapján

A hőátadás számítását két részre bonthatjuk. Kiszámoljuk először a szabadáramlásra és a kényszeráramra vonatkozó hőátadási tényezőket. A számításhoz a következő peremfeltételek szükségesek:

- állandósult állapot legyen jelen;
- a sugárzási nyereség elhanyagolható legyen (hőforrás nélküli legyen a hideg oldali kamra);
- a levegőt ideális gázként tudjuk figyelembe venni.

A konvektív hőátadási tényező (h_{c1}) számításához először a Nusselt számot (Nu) kell meghatározni.

$$Nu = h_{c1} \cdot L / \lambda_l \quad (26)$$

ahol L a fal hossza méterben, λ_l [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$] a levegő hővezetési tényezője az adott hőmérsékleten.

$$Nu = f(Re, Gr, Pr) \quad (27)$$

ahol Re , Gr , Pr a Reynolds, a Grasshof és a Prandtl számok.

Szabadáramlás esetén a Nusselt számot a következő módon számolhatjuk ki

$$Nu = C \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (28)$$

ahol, C és n állandó értékek, de összefüggésben vannak Gr és Pr számok szorzatának értékével. A következő egyenlettel meghatározható, mekkora lehet C és n értéke adott hőmérsékleten.

$$Gr \cdot Pr = \frac{g \cdot L^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot Pr \quad (29)$$

ahol:

g - a gravitációs állandó m s^{-2} -ban,

$\Delta T = T_w - T_a$ a hőmérsékletkülönbség a levegő és a vizsgált felület között [K],

β - a levegő és a vizsgált felület átlaghőmérséklet értékének reciproka [K^{-1}],

ν - a viszkozitás $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ -ban.

A továbbiakban azt a megkötetést alkalmazom, hogy a kritikus Reynolds szám $Re_{cr} = 5 \cdot 10^5$, ha a légmozgás kényszerített, ahol a Reynolds szám a levegő áramlási sebességének ($u_{\text{levegő}}$) m s^{-1} -ban a függvénye.

$$Re = u_{\text{levegő}} \cdot L / \nu \quad (30)$$

Ebben az esetben a Nusselt szám a következő módon fejezhető ki:

$$Nu = 0,064 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{0,33} \quad (31)$$

A Nusselt szám ismeretében a (26)-os egyenletet felhasználva a h_{c1} kiszámolható.

3.8.4. A Hőátadási tényező szabvány szerinti számítása

Az MSZ EN ISO 6946:2008 (Szabványszám 13, 2008) szabvány egy egyszerűsített módszer alapján ad módot a hőátadási tényező meghatározására. A következő egyenletből látható, hogy ez a tényező csak a fal menti szélsébség függvénye.

$$h_{c3} = 4 + 4 \cdot u_{levegő} \quad (32)$$

A szabvány megadja továbbá az adott szélsébségeknél fellépő külső hőátadási tényezőket is. Például 1 m s^{-1} -nál a hőellenállás $0,08 \text{ m}^2 \text{ K W}^{-1}$.

3.8.4.1. A felületi hőellenállás szabvány szerinti számítása

A hőellenállást a h_c és a h_r , azaz a sugárzásos és a konvektív hőátadás ismeretében határozhatjuk meg:

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (33)$$

A sugárzásos hőátadási tényező függ a félgömb emissziós tényezőtől (ε), ami általában külső felületre 0,9, és a h_{r0} -tól, ami a fekete test sugárzási tényezője.

$$h_r = \varepsilon \cdot h_{r0} \quad (34)$$

A sugárzásos tényező (h_{r0}) fekete testre az alábbi módon számolható ki:

$$h_{r0} = 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3 \quad (35)$$

ahol T_m az átlaghőmérséklet K-ben a test felülete és a környezete között, σ pedig a Stefan Boltzmann állandó, aminek az értéke:

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^4 \quad (36)$$

Továbbá a (33) egyenletből következik, hogy:

$$h_{c2} = \frac{1}{R_s} - h_r \quad (37)$$

ahol R_s mérésekkel határozható meg.

4. Eredmények

Ettől a fejezettől kezdve az elért eredményekre szeretnék rátérni.

4.1. Különböző, gyakran használt hőszigetelő- és építőanyagok hőtechnikai tulajdonságai

Célom volt megállapítani, hogy az eltelt nedvesítési idő mellett a vízfelvétel az egyes anyagoknál mekkora mértékű volt és hogyan befolyásolta azok hővezetését. Az anyagok viselkedését négy-négy ábrával szeretném szemléltetni.

A nedvességtartalom (ω) és nedvesítési idő (t) diagram segítségével meg akarom állapítani, hogy a nedvesítés alatt az anyagban bekövetkezett-e a vízfelvétel telítődése. Ez úgy állapítható meg, hogy ha egy bizonyos idő eltelte után a nedvességtartalom (ω) már nem változik, akkor az anyag valószínűleg telítődik. A nedvességtartalmakat (ω) a 2.3-as fejezet (2)-es egyenletének segítségével számoltam ki a hővezetési tényező mérések előtt meghatározott nedves tömegekből. Tehát a nedvességtartalmakat a 4, 8, 12, 16 és 20 órás nedveségterhelés után határoztam meg, nulla nedvesítési időnél a ami a száraz állapotot jelenti 0 m/m%-nak vettem fel.

A vízfelvételi együtthatót (A_w) a fajlagos vízfelvétel ($(m_{\text{nedves}} - m_{\text{száraz}})/A$) és a nedvesítési idő (t) (1. diagram) kapcsolatából határoztam meg, ami ennek a függvénynek a meredeksége. A pontos értéket az 1. diagram alapján a mért eredményeimet felhasználva határoztam meg. Az együttható átlagos hibáját és az illesztett függvény regresszióját (R^2) a diagramokon feltüntettem. Az illesztett függvény minden esetben az origóból indult.

A hővezetési tényezőket (λ) a nedvesítési idő (t) függvényében ábrázoltam, ami a további számításaimhoz volt szükséges. A hővezetési tényezők értékeit a minta száraz állapotában mért értékétől kezdve négy órás bontásokban a 20 órás nedvesítési időig mértem, majd az eredmények átlagát a hozzá tartozó átlagos hibával a diagramokon jelöltem. Ezután az értékekre egy függvényt illesztettem, melynek a paramétereit és regresszióját (R^2) a diagramon jelöltem.

A negyedik diagramra a hővezetési tényezők nedvességre való érzékenysége (Z) meghatározásához volt szükség. A nedvességtartalmak (ω) és a hozzá tartozó száraz és nedvesített hővezetési tényezők hányadosának ($\lambda_{\text{nedves}}/\lambda_{\text{száraz}}$) ismeretében, $\lambda_{\text{nedves}}/\lambda_{\text{száraz}}=1$ pontból kiinduló egyenest illesztettem az értékekre. Az így kapott egyenes meredeksége a Z érték matematikai definíciója szerint, ami egyezik a 2.4.4. fejezet 8-as képletével.

Méréseimet kilenc különböző anyagon végeztem el. Ezen anyagok nedvesítés előtti, teljesen száraz állapotban vett hővezetési tényezőinek átlagait láthatjuk a 5. táblázatban.

5. táblázat Vizsgált anyagok hővezetési tényezői

Megnevezés	Hővezetési tényező (λ) [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Átlagos hiba (λ) [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Irodalmi értékek (források) (λ) [W m ⁻¹ K ⁻¹]
Parafa	0,045	0,001	0,042 (Sierra-Pérez, et al., 2016)
EPS 30	0,045	0,0005	0,048 (Paolo, et al., 2015)
Pórusbeton	0,123	0,0019	0,157 (Sayadi, et al., 2016)
Grafitos EPS	0,033	0,0003	0,037 (Koru, 2016)
Könnyűbeton	0,365	0,0132	0,580 (Paolo, et al., 2015)
Kőzetgyapot	0,037	0,0016	0,0041 (Hua & Fuad, 2015)
Gipszkarton	0,140	0,0031	0,12 (Sareh, et al., 2016)
Tömör tégl	0,391	0,028	0,512 (Hua & Fuad, 2015)
Sárga XPS	0,040	0,0007	0,04 (Paolo, et al., 2015)

Látható, hogy az anyagok hővezetési tényezői (λ) két csoportra választhatók szét, a 0,06 W m⁻¹ K⁻¹ alatti hőszigetelő anyagokra és az ezen érték feletti építőanyagokra. A továbbiakban, a táblázatból is látható nagyságrendnyi hővezetési tényező különbség miatt, külön szeretném elemezni a vizsgált anyagokat. Továbbá megjegyezném, hogy az MSZ EN 12664:2001 (Szabványszám 4, 2001) és az MSZ EN 12667:2001-es (Szabványszám 5, 2001) szabvány is külön foglalkoznak a kis és közepes illetve nagy és közepes hővezetési ellenállású (R) építőipari termékkel.

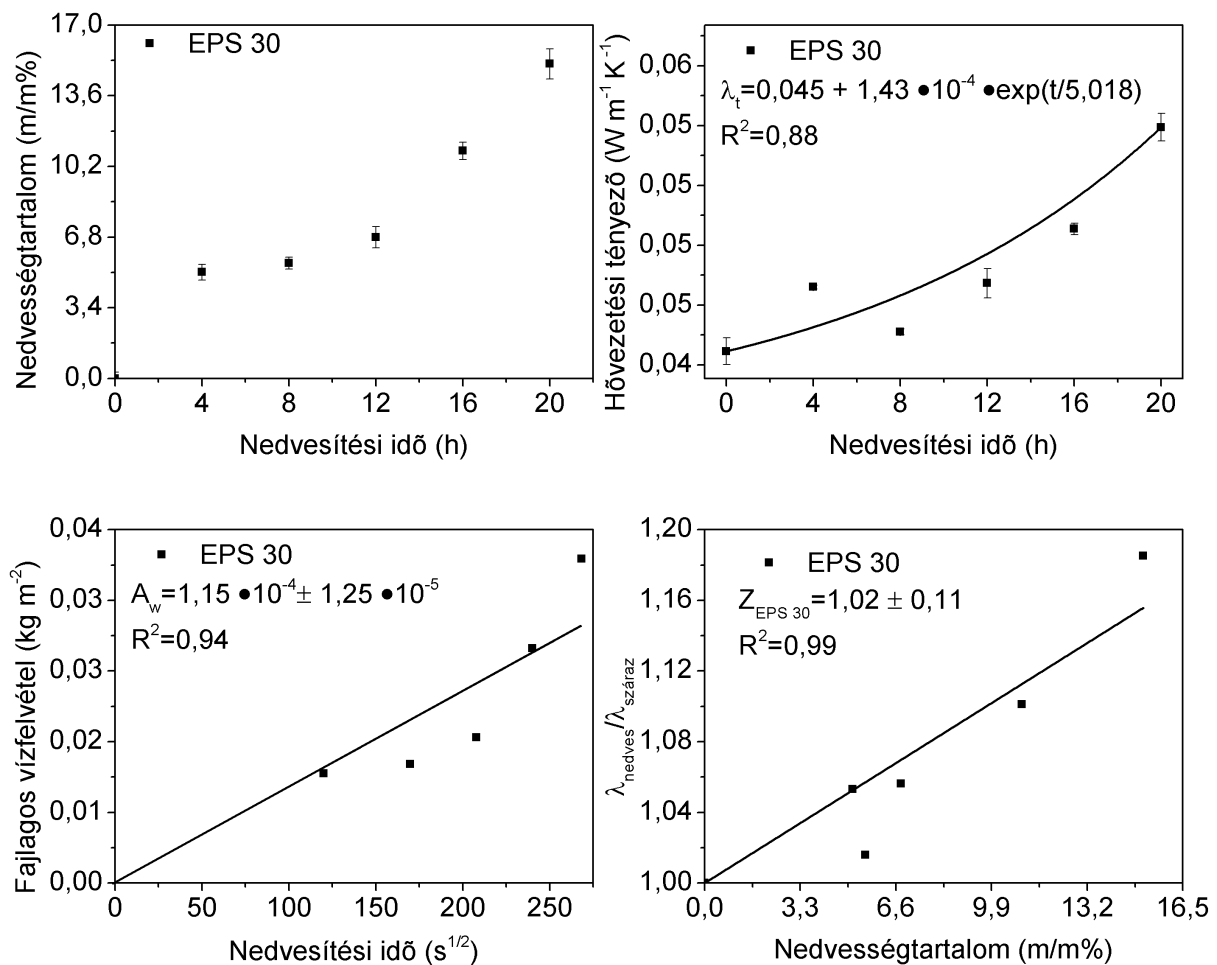
A száraz állapotban megmért eredmény hitelességét ellenőrizni akartam, ezért a minták anyagára vonatkozó hővezetési tényezőket megkerestem különböző szakirodalmakban. A keresésem alapján a mért minták (5. táblázat) hővezetési tényező: száraz állapotban jó közelítéssel megegyeznek a szakirodalmakban szereplő értékekkel.

4.1.1. Szigetelőanyagok

4.1.1.1. Expandált polisztirol hab

Megvizsgálva a nedvességfelvétel időbeli lefolyását, a vizsgált időtartamig nem tapasztaltam telítődést. A nedvességfelvétel a vizsgált mintánál még kezdeti szakaszban volt így a vízfelvételi tényezőt meg lehetett állapítani.

A nedvességtartalom (ω) növekedésnél megfigyelhető egy kezdeti lineáris emelkedés. Ez az emelkedés a kezdeti első, 16 órás szakaszban nagyon jól megközelíti az egyenes növekedést. Továbbá a 3. diagramon láthatjuk, hogy a nedvességtartalmak a nedvesítési idő 4, 8 és 12 órájában viszonylag közeli értéket vesznek fel. Viszont ezután a nedvességtartalom (ω) növekedésbe kezd, egészen 15 m/m%-ig. Exponenciális növekedés jellemzi a hővezetési tényező és nedvesítési idő függvényét is. A teljesen száraz állapotból egyenest húzva a nedvesített értékekre megállapítható az, hogy mind a vízfelvételi együttható ($A_w=1,15 \cdot 10^{-4}$), mind a hővezetés nedvességre való érzékenysége ($Z=1,02$) pontosan meghatározható. Az értékek átlaghibái mindkét esetben a tizede a megállapított értéknek.

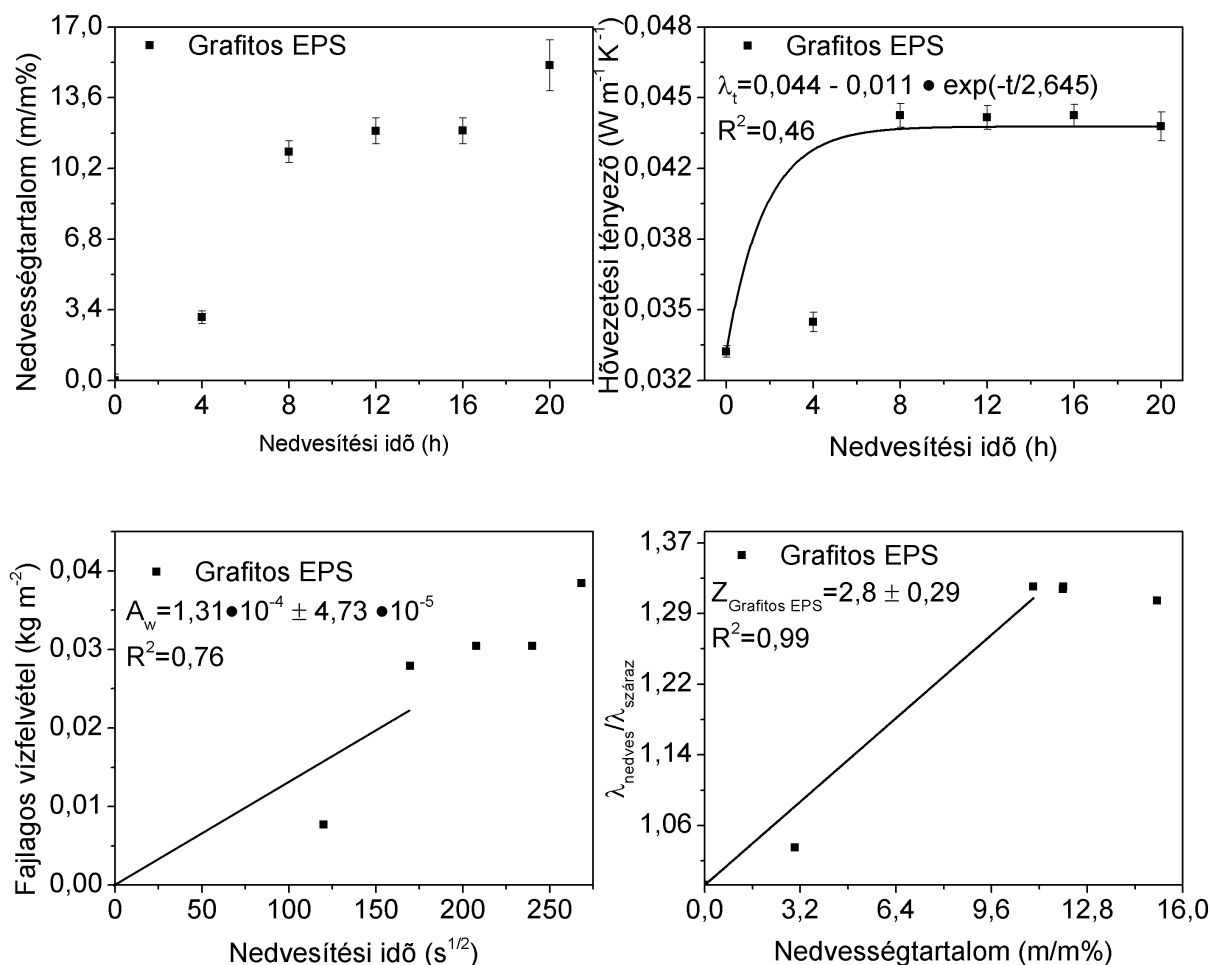


3. diagram EPS 30 mért adatai

Továbbá megfigyelhető az is, hogy néhány pont illeszkedik az egyeneshez, de mégsem hagyhatók figyelmen kívül, mert ezek mindegyike 15 mérés átlagából jött ki, az pedig rendkívül kis átlagos hibát eredményezett. A vizsgálat alatt a teljes növekedés az anyag hővezetési tényezőjénél körülbelül 1,2-szeres változást idézett elő. Ez a jelenség annak köszönhető, hogy az EPS szerkezete apró gömbökből épül fel, ami egy nyílt cellás struktúrát hoz létre. A gömbökbe a nedvesség nehezen juthat be, de a gömbök közötti réseket a nedvesség könnyen ki tudja tölteni. (Szodrai & Lakatos, 2014b)

4.1.1.2. Grafitos expandált polisztirol hab

A grafitall szennyezett EPS minta vízfelvételét vizsgálva mind a nedvességtartalom, mind a hővezetési tényező függvényében egy gyors telítődést láthatunk a 4. diagramon. Láthatjuk, hogy a nedvesítési idő első 8 órájáig egy gyors telítődési folyamat zajlik le, amikor a minta a nedvességet felveszi. Majd ezután látható, hogy telítődik a minta, nedvességtartalma 12 m/m%-nál állandósul, azaz szaturáció megy végbe.



4. diagram Grafitos EPS mért adatai

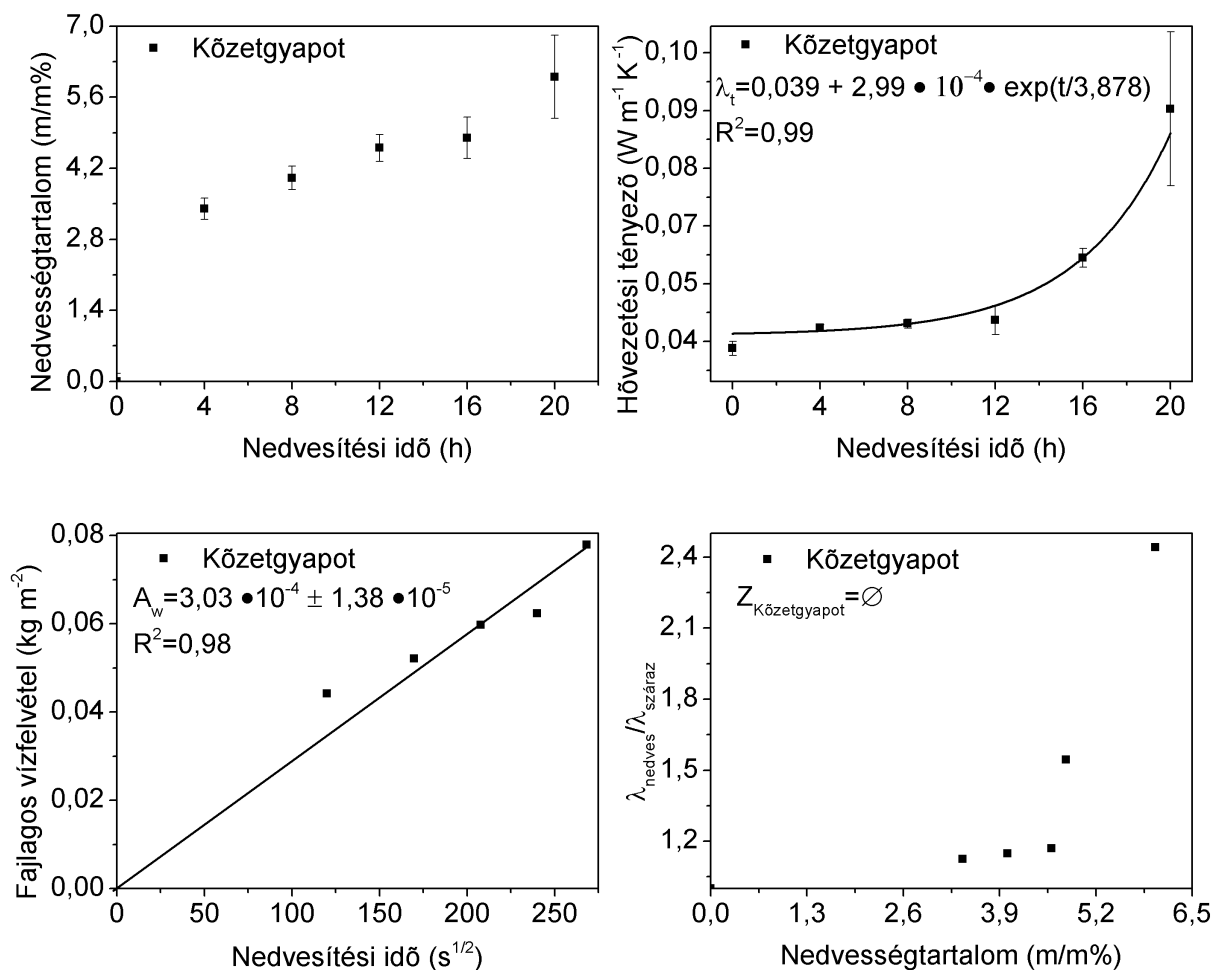
Kivételt képez a 20 órás nedvesítési időhöz tartozó nedvességtartalom, ami annak tudható be, hogy a minta mindegyik esetben a 16. órára már telítődött, további nedvesítési idő hatására a pára a külső felületen összpontosult. A hővezetési tényezőket tekintve 8 órás nedvesítés után stabilan egy átlag körül mozgott.

A grafitos EPS hővezetési tényezőjének értéke 10-20 %-kal alacsonyabb, mint a többi EPS habé. Az EPS 30 és a grafitos EPS-nek 20. órában mért nedvességtartalma közel azonos (15 m/m%- 15 m/m%) volt. A vizsgálat alatt a teljes növekedés az anyag hővezetési tényezőjénél körülbelül 30 %-os változást idézett elő. A vízfelvételi együtthatót ($A_w=1,31 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-0,5}$) és a hővezetési tényező nedvességre való érzékenységet (Z) csak a telítődés előtti időszakra (8 óráig) számoltam ki. A grafitos EPS számolt hővezetési tényező nedvességre való érzékenysége ($Z=2,8$) az EPS 30 mintával összehasonlítva közel háromszor nagyobb értéket mutat.

Ezek alapján elmondható, hogy a grafitos EPS, bár érzékeny a nedvességre, mégis 12 m/m%-os nedvességtartalmat elérve tovább nem mutat hajlandóságot a nagyobb hővezetési tényező emelkedésére. (Szodrai & Lakatos, 2014b)

4.1.1.3. Kőzetgyapot

A nedvesítési idő függvényében figyelve a kőzetgyapot nedvességtartalmát, látható az 5. diagramból, hogy az értékei monoton nőnek, tehát az anyagról elmondható, hogy 20 órás nedvesítés után sem telítődik. Ez azért fontos tény, mivel a hővezetési tényező exponenciálisan növekszik. Az exponenciális függvényt tehát én csak egy kezdeti, még nem telítődött állapotra írtam fel. A nedvességtartalmakat figyelve 4 és 16 órás nedvesítés között 4 m/m% körül stagnál az érték. Ezután a nedvességtartalom és a hővezetési tényező a nedvesítési idő teltével rohamos emelkedésbe kezd. A 16 és 20 órás nedvesítési idő között kb. 1,25-szörös nedvességtartalom-növekedést figyelhetünk meg. A nedvesítési idő alapján a kőzetgyapot hővezetési tényezője egyértelműen exponenciálisan növekszik, ezt a függvény 0,99-es regressziója (R^2) is mutatja. A 20. órában történt mérésnél viszonylag nagy hibát diagnosztizáltam, ez az anyag szálas szerkezetéből adódhatott. Megjegyzendő, hogy itt az érték 20 mérés átlagából adódott. Az exponenciális jellegű növekedés miatt a hővezetési tényező nedvességre való érzékenysége (Z) nem értelmezhető. Mivel nem telítődött az anyag, a vízfelvételi együtthatója (A_w) meghatározható, amit láthatunk a diagramon. (Szodrai & Lakatos, 2014b)

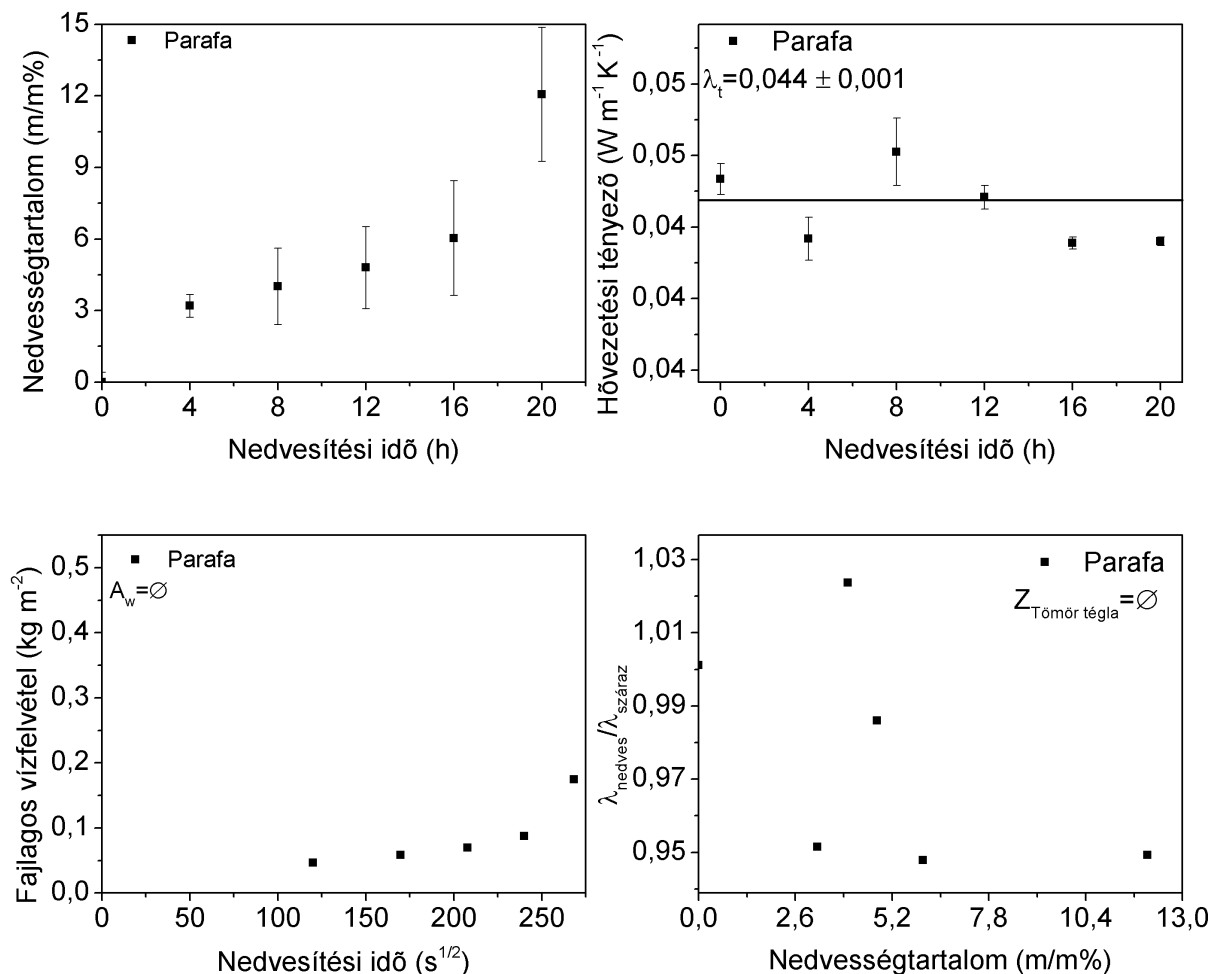


5. diagram Kőzetgyapot mért adatai

4.1.1.4. Parafa

A parafa mintán történt mérésekből azt kaptam, hogy a nedvesítési idő teltével nőtt a nedvességtartalom. A 20 órás nedvesítést követően a nedvességfelvétel végül 12 m/m%-os értéket vett fel. Ebből arra következtethetünk, hogy az anyag 20 órás nedvesítési időn túl képes lehet még további nedvesség felvételre. Továbbá a 6. diagramról látható, hogy a nedvességfelvétel a nedvesítési idő függvényében az első 16 órában egy átlag körül mozgott. Viszont a parafa zárt cellás szerkezetéből adódóan itt csak adszorpcióról beszélhetünk. Ezt a megállapítást pontosan alátámasztja a hővezetési tényező és a nedvesítési idő diagramja. A parafa hővezetési tényezője elhanyagolható (kevesebb, mint 5 %-os) változást mutatott. Emiatt a hővezetési tényezőt állandó értékűnek tekinthetjük, melyet a középértékek átlagából számítottam ki. Megállapítható, hogy a felvett nedvesség csak részlegesen vagy egyáltalán nem hatolt be az anyagba, a felületre kondenzálódott, így nem volt hatással a hővezetési tényezőre. A parafa esetében sem a vízfelvételi tényezőt (A_w), sem a hővezetési tényező nedvességre való érzékenységét (Z) nem tudtam értelmezni. A méréseim alapján a parafa jó hőszigetelő anyagnak

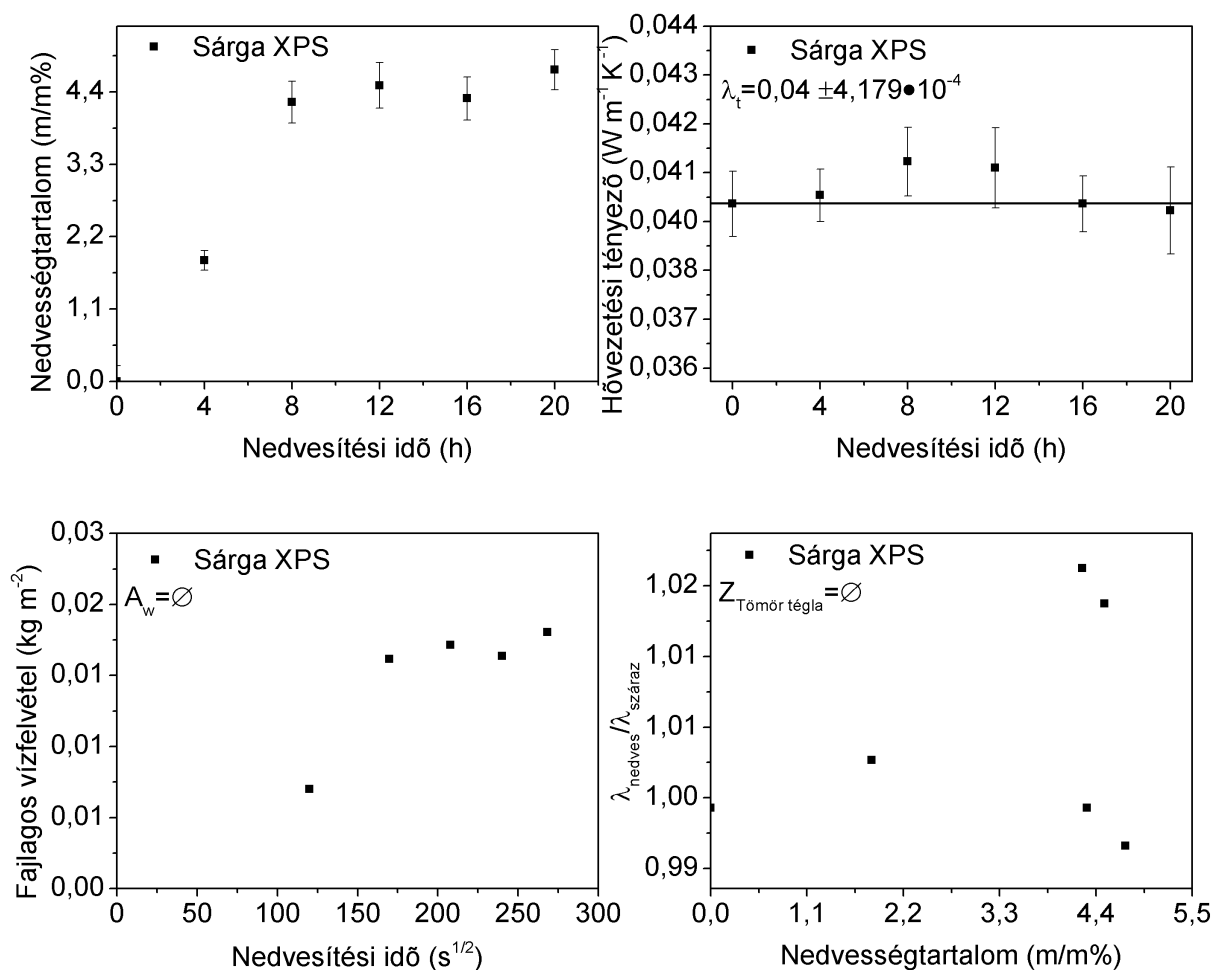
bizonyult, mivel magas nedvességtartalom mellett is képes volt megőrizni az alacsony hővezetési értékét. (Szodrai & Lakatos, 2017a)



6. diagram Parafa mért adatai

4.1.1.5. Sárga színű extrudált polisztirol hab (Sárga XPS)

A sárga színű extrudált polisztirol hab nedvesítési idő és nedvességtartalom függvénye alapján egy gyors telítődési folyamatot láthatunk, ahol a minta a 8. nedvesítési óra után nem képes több nedvességet felvenni, 4,5 m/m% körül állandósul az érték. Ez azt jelenti, hogy a felületen ekkor telítődik a nedvesség és utána további nedvességet nem tud felvenni a minta. Ez a tulajdonság a zártcellás szerkezetből adódik. A zártcellák egy sima, nedvesség számára áthatolhatatlan felületet képeznek. A nedvesség csak az anyag felületén képes kondenzálódni. Ez rendkívül jó víztaszító képességet jelent. Ez tovább erősíti a tényt, hogy ezen zárt pórusú anyagok nagy nedvességterhelésnek kitett helyeken való alkalmazásra ideálisak. A kizárólagosan adszorpciós nedvességh felvétel miatt a vízfelvételi együttható (A_w), (ami csak abszorpcióra vonatkozik) nem értelmezhető ennél az anyagnál.



7. diagram Sárga XPS mért adatai

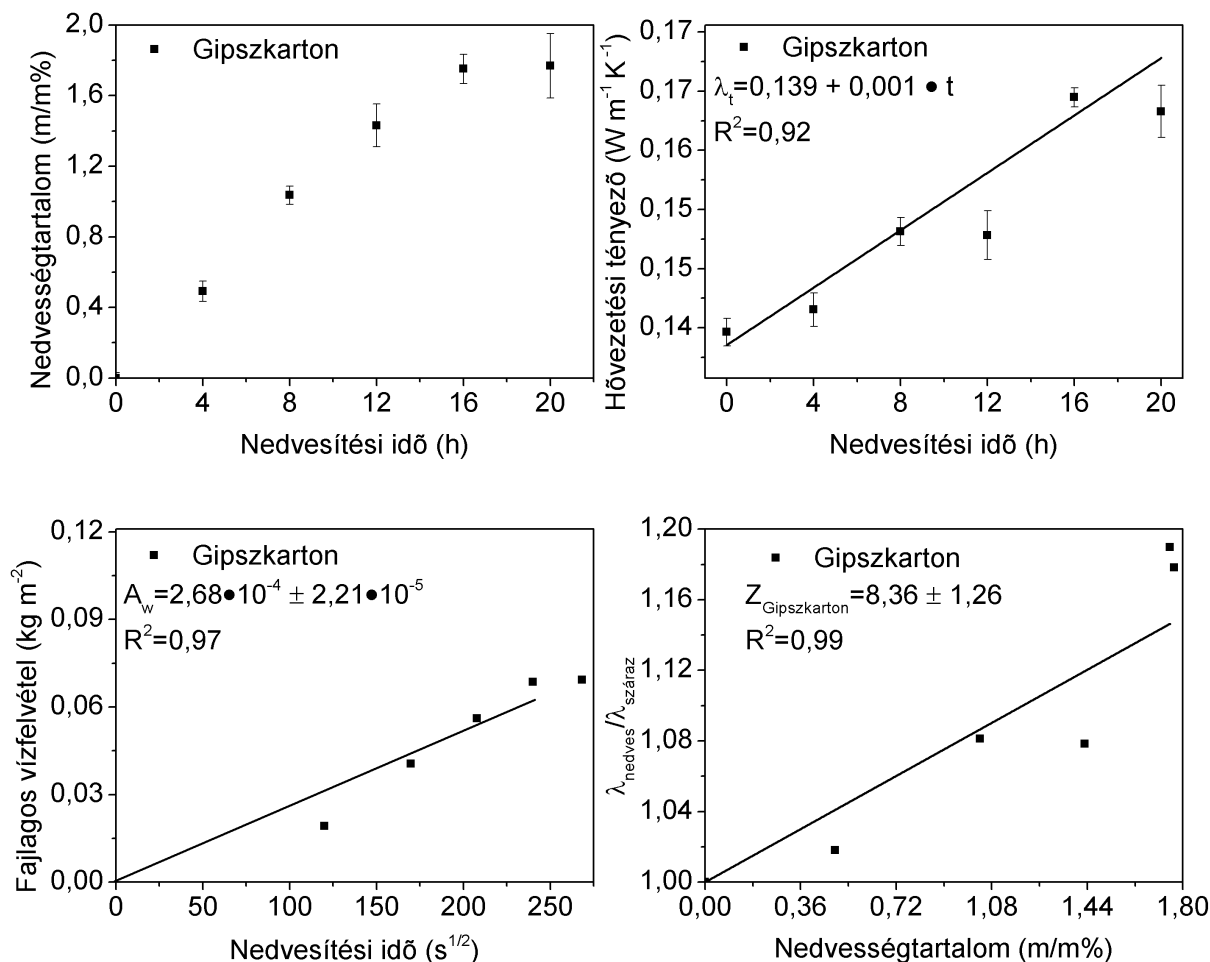
A mért eredmények alapján látható, hogy a nedvesítési idő nem befolyásolja a minta hővezetési tényezőjét (abszorpció nem lépett fel). A 7. diagramon látható, hogy a nedvesítési idő teltével a minta hővezetési tényezőinek átlaga az egyes mérések hibahatárait érinti. Ezért a hővezetési tényezőt állandónak tekintem, így a hővezetési tényező nedvességre való érzékenysége (Z) nem értelmezhető ennél az anyagnál. Hővezetési tényezőjét tekintve a többi hőszigetelőanyagéhoz hasonló értéket kapott. (Szodrai & Lakatos, 2014b)

4.1.2. Építőanyagok

4.1.2.1. Gipszkarton

A gipszkarton nedvességtartalma a mérési eredményeim alapján az első 16 órában lineárisan nőtt, majd 16 óra után állandósult. Emiatt mind a vízfelvételi együtthatót (A_w), mind a hővezetési tényező nedvességre való érzékenységét (Z) csak az első 16 órás nedvesítési időre határoztam meg. Ezután a nedvességtartalma 1,8 m/m%-nál, a hővezetési tényezője pedig 0,168 W m⁻¹ K⁻¹-nél értéknél állandósult. A gipszkarton nedvességtartalma és hővezetési tényezője a

nedvesítési idővel egyenes arányban változott. A közel egyenes arányos változásokból látható, hogy a gipszkarton egész térfogatában elnyelte a nedvességet. A gipszkarton számolt nedvességre való érzékenysége az eddig bemutatott hőszigetelő anyagokéhoz képest nagy, $Z=8,36$ -os értékű, amit csupán 2 m/m% nedvességtartalom növekedés idézett elő. Viszont ennyi nedvességfelvétel (vízfelvételi együttható értéke: $A_w=2,68 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-0,5}$) is rossz hatással van az anyagra, mind mechanikai tulajdonságai, mind hőszigetelő képességének szempontjából. (Szodrai & Lakatos, 2017a)

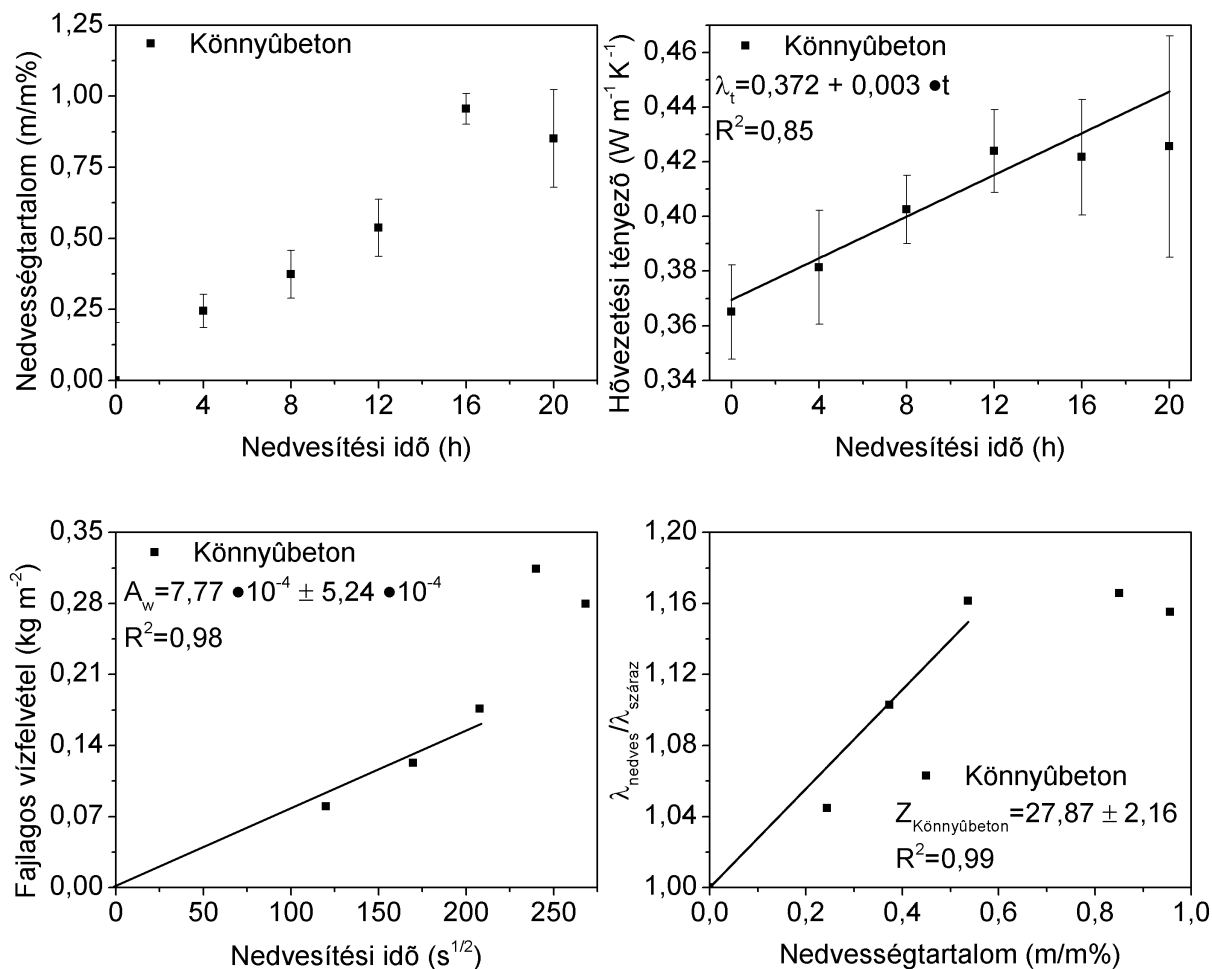


8. diagram Gipszkarton mért adatai

4.1.2.2. Könnyűbeton

A könnyűbeton hővezetési tényezőjének változása a nedvesítési idő függvényében lineáris jelleget mutatott. A 20 órás nedvesítés után a hővezetési tényező 17 %-ot növekedett. Ez a hővezetési tényező növekedés viszont a 9. diagram alapján láthatóan csak 1 m/m%-os nedvességtartalom növekedés hatására jött létre. A kismértékű nedvességtartalom és a nagy hővezetési tényező változása abból adódhat, hogy a beton pórusos szerkezetű és a nedvességet könnyedén fel tudja venni, ezzel lehetőséget teremt a hővezetési tényező növekedésének.

A nedvesítési idő teltével a könnyűbeton egy érdekes jelenséget mutatott. A 9. diagram felső részén látható, hogy a nedvességtartalom 16. óránál míg a hővezetési tényező a 12. óránál állandósult. Emiatt a vízfelvételi együtthatót (A_w) és nedvességre való érzékenységet (Z) a hamarabb bekövetkezett állandósult állapotra, az első 12 órás nedvesítési időre határoztam meg. Így a vízfelvételi együtthatónak $A_w = 7,77 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-0,5}$ és a nedvességre való érzékenységeknek $Z = 27,87$ értéket kaptam. A vizsgált minták közül a könnyűbetonnak van a legmagasabb Z értéke. (Szodrai & Lakatos, 2017a)



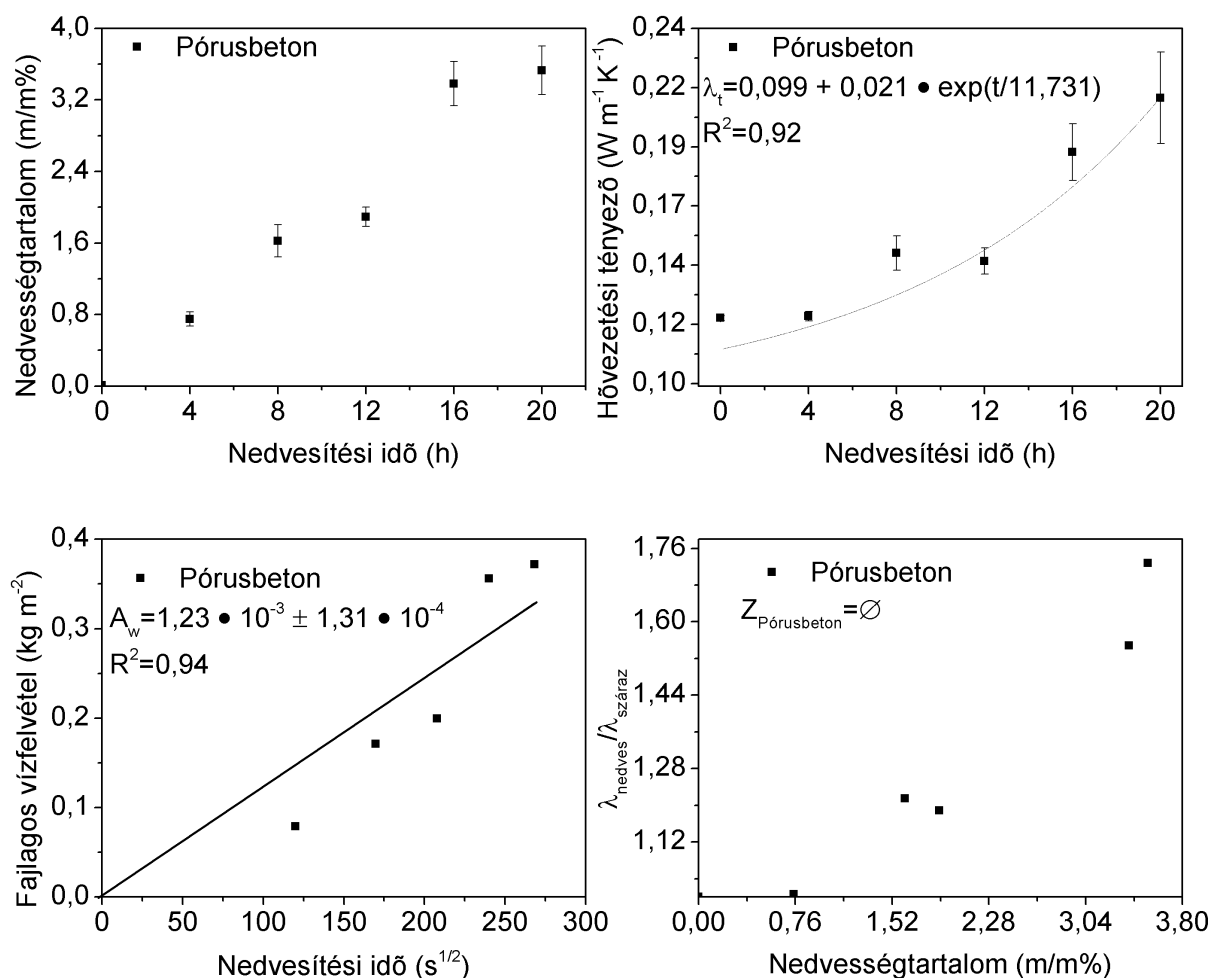
9. diagram Könnyűbeton mért adatai

4.1.2.3. Pórusbeton

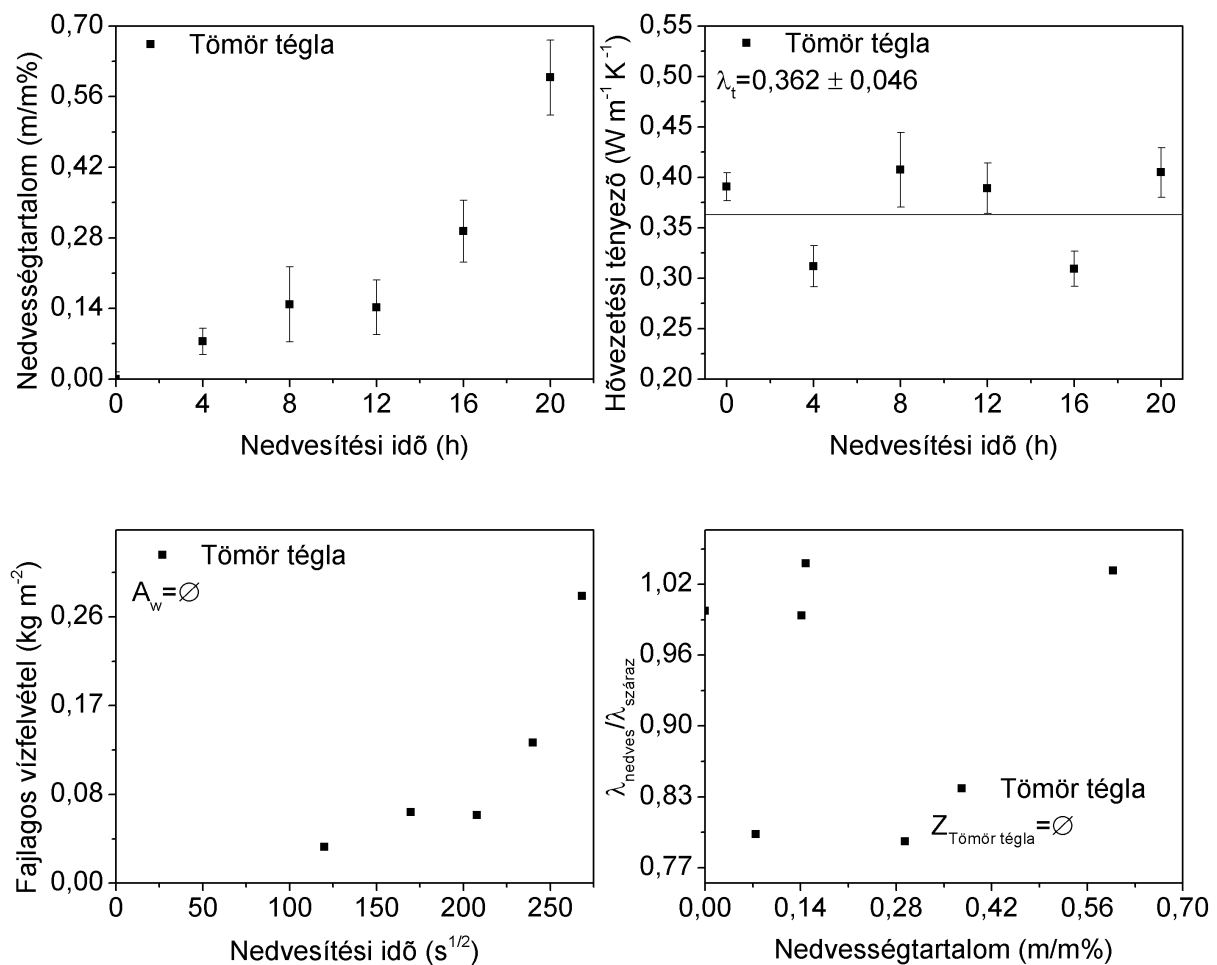
A pórusbetonnak jellegzetesen nyílt pórusos szerkezete van, ami elősegíti az abszorpciót. A 10. diagramon a nedvességtartalmakat figyelve látható, hogy a 8 és 12 órás, illetve a 16 és 20 órás nedvesítési időhöz tartozó nedvességtartalmak közel azonosak. Ez egy monoton, lépcsőzetesen növekvő jelleget ad a függvénynek. A hővezetési tényező nedvesítési idő függvényében exponenciális jellegű növekedését figyelve nem jelenthető ki, hogy a pórusbeton telítődött. Feltételezhető, hogy a minta további nedvesség hatására még képes lehet nedvességet felvenni.

Ehhez hasonló jelenséget tapasztaltam a közetgyapot hőszigetelésnél. Az exponenciális hővezetési tényező növekedés miatt a hővezetési tényező nedvességre való érzékenysége nem értelmezhető. A vízfelvételi együttható a jó abszorpciós tulajdonságnak köszönhetően viszonylag nagy ($A_w=1,23 \cdot 10^{-3} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-0,5}$) értéket adott.

A húsz órás nedvesítés alatt a minta megduplázza hővezetési tényező értékét, mégis, a könnyűbetonhoz képest jóval alacsonyabb hővezetési tényezőt figyelhetünk meg a 10. diagramból. A mérés során a maximális nedvességtartalom 3,5 m/m%-ra tehető. Az építőanyagok közül ez az anyag volt képes a legtöbb nedvesség felvételére. A nedvességtartalom változás a nedvesítési idő függvényében lineárisnak tekinthető. A pórusbetonról tehát elmondható, hogy bár nedvességre érzékeny, nagyobb nedvesítési idő esetén is viszonylag alacsony hővezetési tényezővel rendelkezik a többi építőanyaghoz képest (beleértve, hogy 20. órás nedvesítési időre a hővezetési tényezője megduplázódott). (Szodrai & Lakatos, 2017a)



10. diagram Pórusbeton mért adatai



11. diagram Tömör téгла mért adatai

4.1.2.4. Tömör téгла

A mérés folyamán a hővezetési tényező értékek különböző nedvesítési idő mellett kis mértékben, egy átlag körül változtak. Ezért a középértékek átlagából határoztam meg a minta hővezetési tényezőjét. A számolt nedvességre való érzékenységet a sárga színű XPS-hez hasonlóan itt sem tudtam értelmezni.

A 11. diagram alapján látható, hogy a nedvességnek elenyésző hatása van a tömör téгла paramétereire. A kis mértékű nedvességh felvétel a nagy sűrűségű, tömör szerkezetből adódik. A mért nedvességtartalom változás is csak az adszorpcióból adódott. Mivel adszorpciós nedvességh felvétel a jellemzőbb tömör anyagoknál, így a vízfelvételi együtthatót (A_w)-t nem tudtam értelmezni. Ezekből a tulajdonságokból kiindulva a tömör téгла ideális teherhordó szerkezeti elem, mivel nehezen engedi be a nedvességet az anyag belsejébe, így az nem tud az anyagban fagykárokat okozni. Hővezetési tényezője a hőszigetelő anyagokéhoz képest aránylag magas, így épületeknél valamilyen hőszigetelő anyaggal való párosítása szükséges. (Szodrai & Lakatos, 2017a)

4.1.3. Vízfelvételi együttható

A vízfelvételi együtthatót (A_w) tömör anyagokra nem tudtam meghatározni, mivel csak adszorpció útján vették fel a nedvességet. Így a 6. táblázatban az értékeiket nem tüntettem fel. A vizsgált minták közül a legnagyobb abszorpciós vízfelvételt a pórusbetonra állapítottam meg. A pórusos szerkezetből adódóan jó nedvességfelvevő tulajdonsággal bír, könnyen el tudja raktározni az anyag belsejébe a nedvességet. A hőszigetelések közül a kőzetgyapot rendelkezett a legmagasabb vízfelvételi együtthatóval, szálás szerkezetének köszönhetően.

6. táblázat A minták vízfelvételi együtthatói

	Vízfelvételi együttható (A_w) [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0,5}$]	Vízfelvételi együttható átlagos hibája (ΔA_w) [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0,5}$]	Regresszió (R^2) [-]
EPS 30	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-5}$	0,94
Grafitos EPS	$1,31 \cdot 10^{-4}$	$4,73 \cdot 10^{-5}$	0,76
Gipszkarton	$2,68 \cdot 10^{-4}$	$2,21 \cdot 10^{-5}$	0,97
Könnyűbeton	$7,77 \cdot 10^{-4}$	$5,24 \cdot 10^{-5}$	0,98
Kőzetgyapot	$3,03 \cdot 10^{-4}$	$1,38 \cdot 10^{-5}$	0,98
Pórusbeton	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-4}$	0,99

4.1.3.1. Vakolatok vízfelvétele

Célom volt megvizsgálni, hogyan képesek a vakolatok megvédeni a hőszigetelést a nedvességtől. A vizsgálataim alapján kiderült, hogy az EPS 30, grafitos EPS és kőzetgyapot hőszigetelések víz abszorpcióra hajlamosak, ezért típusonként két-két mintát vakolattal láttam el. Ezekből az egyik minta vizsgált oldalára egy réteg (5 mm) nemesvakolat (Baumit duoTop K2), a másikra pedig egy réteg 1 cm vastag perlitvakolat (Baumit ThermoPutz I) és egy réteg nemesvakolat (Baumit duoTop K2) került. A többi oldal fóliával lett hermetikusan lezárva. Így tudtam megvizsgálni, mennyire képes a két vakolat típus csökkenteni a nedvességfelvételt.

Az összehasonlítás tárgyát a 20 órán át nedvesített vakolt és vakolatlan hőszigetelés minták képezték. A mintáknak csak egyik oldala lett kezelve vakolattal, ebből adódóan csak egyik oldalán lett mérve a nedvességelvétel. Így csupán a nedvességtartalom (ω) változás közlésével nem lehetséges megfelelő következtetést levonni, mivel a nedvesített felületek mérete különbözött. Azonban a 20 órás nedvesítési időhöz tartozó vízfelvételi együtthatók (A_w) összehasonlítása a vakolt és vakolatlan mintákkal már lehetséges. Mivel a vakolt mintának csak

egy adott értékére lett meghatározva a vízfelvételi együttható, csupán tájékoztató jelleggel bír az összehasonlítás.

A 7. táblázatból látható, hogy a kezeltelen mintákhoz képest jóval kisebbek a nedvességtartalmak. Ez egyrészt abból adódik, hogy hat helyett csak egy felületen történik a nedvességfelvétel, továbbá abból is, hogy a száraz tömegbe a kezelt felületnél a vakolat tömegét is beleszámítottam, így egy homogén és egy heterogén mintához tartozó érték összehasonlításáról beszélek.

7. táblázat Vakolt minták nedvességtartalmai

	nedvességtartalom átlag (ω) [m/m%]	nedvességtartalom hiba ($\Delta\omega$) [m/m%]
Perlitvakolat + EPS 30	0,58	0,01
Nemesvakolat + EPS 30	1,13	0,15
Perlitvakolat + kőzetgyapot	0,73	0,08
Nemesvakolat + kőzetgyapot	0,93	0,05
Perlitvakolat + grafitos EPS	0,72	0,02
Nemesvakolat + grafitos EPS	2,06	0,78

8. táblázat Vakolt minták tájékoztató jellegű vízfelvételi együtthatói

	Tájékoztató jellegű vízfelvételi együttható átlag (A_w') [kg m ⁻² s ^{-0,5}]	Tájékoztató jellegű vízfelvételi együttható hiba ($\Delta A_w'$) [kg m ⁻² s ^{-0,5}]
Perlitvakolat + EPS 30	3,60 10 ⁻⁴	0,18 10 ⁻⁴
Nemesvakolat + EPS 30	2,54 10 ⁻⁴	0,25 10 ⁻⁴
Perlitvakolat + kőzetgyapot	5,48 10 ⁻⁴	0,48 10 ⁻⁴
Nemesvakolat + kőzetgyapot	4,28 10 ⁻⁴	0,33 10 ⁻⁴
Perlitvakolat + grafitos EPS	3,99 10 ⁻⁴	0,40 10 ⁻⁴
Nemesvakolat + grafitos EPS	3,94 10 ⁻⁴	0,17 10 ⁻⁴

A 8. táblázatban az látható, hogy a vakolat a ráillesztett hőszigetelésnél jóval nagyobb (tájékoztató jellegű) vízfelvételi együtthatóval rendelkezik. Ez arra következtetne egy homogén mintánál, hogy a nedvességtartalomnak is nagyobbnak kellene lennie. Az vizsgált esetben

azonban a nagyobb vízfelvételhez tartozó vakolt minta nedvességtartalma alacsonyabb, a vakolatlan mintához képest. Méréseim alapján arra következtetek, hogy a nedvesség feltehetően a vakolatban tárolódott el és a hőszigetelésbe viszonylag kevés víz juthatott be, ami céloim is volt kimutatni.

Az eredmény alapján elmondható, hogy a vakolat nedvességvédelmi feladatát abszorpció elven látja el. A nagy kapilláris vízfelvevő képességéből adódóan magában tárolja a nedvességet, viszont azt nem engedi tovább a szerkezet belsejébe.

4.1.4. Hővezetési tényező és a nedvesítési idő kapcsolata

A parafa, tömör tégl és a sárga XPS nem mutatott jelentős eltérést sem a nedvesítési idő (t), sem a nedvességtartalom (ω) függvényében. Így ezeknek a mért értékeit átlagoltam és ezt időben állandónak tekintettem.

9. táblázat Időben állandó hővezetési tényezőjű szigetelő anyagok

Anyag neve	Hővezetési tényező (λ) [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]	Hővezetési tényező átlagos hibája ($\Delta\lambda$) [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$]
Parafa	0,044	0,001
Sárga XPS	0,04	$4,179 \cdot 10^{-4}$
Tömör tégl	0,362	0,046

Az 9. táblázat alapján látható, hogy a mérés során diagnosztizált hiba mindig legalább egy nagyságrenddel kisebb, mint az átlagérték.

A gipszkarton és a könnyűbeton hővezetési tényezője lineáris kapcsolatot mutatott a nedvesítési idővel, amit az alábbi módon fejeztem ki:

$$\lambda_{tj} = \lambda_{sz} + t \cdot A_1 \quad (38)$$

ahol:

λ_{sz} - minta hővezetési tényezője száraz állapotban [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$],

A_1 - a függvény együttható [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1} \text{h}^{-1}$],

t - nedvesítési idő [h],

λ_{tj} - hővezetési tényező értéke adott időpillanatban. [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$].

10. táblázat Időben lineárisan változó hővezetési tényezőjű anyagok

Anyag neve	λ_{sz} [W m ⁻¹ K ⁻¹]	A_1 [W m ⁻¹ K ⁻¹ h ⁻¹]	R^2 [-]
Gipszkarton	0,139	0,001	0,87
Könnyűbeton	0,372	0,003	0,85

A két építőanyag A_1 függvény meredekségét jelző számon látható, hogy a növekedés a nedvesítési idő alatt csak kisebb mértékben változtatta a hővezetési tényezőt. A 10. táblázatban nem jelöltem a hibát, mivel a hibaérték itt a mérési átlag körül változna. Helyette az illesztett függvény regresszióját jelöltem.

Az EPS 30, a grafitos EPS, a kőzetgyapot és a pórusbeton esetén exponenciális függvény írható fel a hővezetési tényező változására a nedvesítési idő függvényében, mely a következő:

$$\lambda_{tj} = \lambda_{sz} + A_1 \cdot e^{(t/t_1)} \quad (39)$$

ahol:

λ_{sz} - minta hővezetési tényezője száraz állapotban [W m⁻¹ K⁻¹],

A_1 - a függvény együttható [W m⁻¹ K⁻¹ h⁻¹],

t_1 - a függvény exponenciális együtthatója [h],

t - nedvesítési idő [h],

λ_{tj} - hővezetési tényező értéke adott időpillanatban [W m⁻¹ K⁻¹].

11. táblázat Időben exponenciálisan változó hővezetési tényezőjű anyagok

Anyag neve	λ_{sz} [W m ⁻¹ K ⁻¹]	A_1 [W m ⁻¹ K ⁻¹ h ⁻¹]	t_1 [h]	R^2 [-]
EPS 30	0,045	$1,43 \cdot 10^{-4}$	5,018	0,88
Grafitos EPS	0,044	-0,011	-2,645	0,46
Kőzetgyapot	0,039	$2,99 \cdot 10^{-4}$	3,878	0,99
Pórusbeton	0,099	0,021	11,73	0,92

A regressziókat vizsgálva látható, hogy a grafittal szennyezett extrudált polisztirol hab alacsony regressziós értéket vett fel. Ezt a 4 órás nedvesítési időnél lévő alacsony hővezetési tényező értéke okozza. Emiatt a függvény a kezdeti és a gyors telítődési idő (kevesebb mint 8 óra) között nagyobb hibatűréssel használható.

4.1.5. Hővezetési tényező nedvességre való érzékenysége

A nedvességfelvételre való érzékenységet a Épületfizika kézikönyvben (Fekete, 1985) és Künzel tanulmányában (Künzel, 1995) található (8)-as képlet segítségével és a 2.4.4 fejezet 2. diagram értelmezése alapján határoztam meg. A nedves (λ_n) és száraz (λ_{sz}) hővezetési tényezők hányadosára és a hozzá tartozó nedvességtartalmakból (ω) adódott pontokra a száraz állapotból induló egyenest illesztettem, melynek meredeksége volt a Z érték.

12. táblázat Hővezetési tényező nedvességre való érzékenysége (Fekete, 1985;

Fraunhofer IPB, 2013)

Anyag neve	Fekete I. (Z) [(m/m%) ⁻¹]	WUFI (Z) [(m/m%) ⁻¹]	Méréseim alapján (Z) [(m/m%) ⁻¹]	Regresszió (R ²) [-]
EPS 30	2	0,05	1,02 ± 0,11	0,99
Gipszkarton	12,5	-	8,36 ± 1,26	0,99
Grafitos EPS	2	-	2,8 ± 0,29	0,99
Könnyűbeton	12	3	27,87 ± 2,16	0,99
Kőzetgyapot	2	-	nem értelmezhető	-
Parafa	1	-		
Pórusbeton	12	4		
Sárga XPS	2	0,1		
Tömör tégl	20	8		

A 12. táblázatból látható, hogy a kilenc vizsgált építőipari termékből csak négy anyagra lehetett meghatározni a hővezetési tényező nedvességre való érzékenységét (a Z értéket). Ennek oka az anyagok változatosságából eredt. Egyik jellegnél az anyagok vízzárása miatt azok belsejébe nem jutott be nedvesség, ami fokozni tudta volna a hővezetési tényezőt. Ezen anyagok voltak a parafa, sárga színű XPS és a tömör tégl. Másik jelleghez azok az anyagok tartoztak, amiknek magas a vízfelvételi együtthatójuk, és exponenciális függvény szerint nő a hővezetési tényezőjük. Az exponenciális növekedésből adódóan nem adható meg az anyagokra a Z érték. Vizsgálataim során a kőzetgyapot és a pórusbeton tartozott ebbe a kategóriába. A méréseim alapján a könnyűbetonra kaptam a legnagyobb értéket, ez egy nagyságrenddel nagyobb a többi értékhez képest.

Látható, hogy a különféle (Fekete, 1985; Fraunhofer IPB, 2013) adatbázisokban található értékek és a mérési eredményeim között nagy, 1,5-3-szoros eltérések vannak. A fellepett különbségek annyiban magyarázhatók, hogy a gyártástechnológia fejlődésével az egyes

anyagok nedvességfelvételre való hajlama csökken. Továbbá a Fekete-féle épületfizika kézikönyvben (Fekete, 1985) a műanyag habok és a szálalás közetgyapot Z értékei megegyeztek. Mért eredményeim közül a legnagyobb különbség az irodalmi adatokhoz képest a könnyűbetonnál adódott. Ennek oka a könnyűbeton minta elkészítéséből eredhet. Feltehetően más technológiát és összetételt alkalmaztak a mintáik elkészítésénél, mint amit a közel 30 éve készült felsorolt irodalmak vizsgáltak. Kutatásaim szükségességét és létjogosultságát is tovább erősíti a tény, hogy a meglévő adatbázisok már elavultnak tekinthetők, frissebb értékek szükségesek. Továbbá meg kellett állapítani, melyek azok az anyagok, amikre a hővezetési tényező nedvességre való érzékenysége nem értelmezhető.

A 4.1. fejezetben elért eredményeket a következő publikációkban közöltem:

Szodrai Ferenc és Lakatos Ákos. „Effect of wetting time in the sorption and in the thermal conductivity of the most commonly used structural materials.” *Building Services Engineering Research and Technology* 37, 7. szám (2017): 1-10.

Szodrai Ferenc és Lakatos Ákos. „Measurements of the thermal conductivities of some commonly used insulating materials after wetting.” *Environmental Engineering and Management Journal* 13, 11. szám (2014): 2881-2886.

4.2. A fajlagos hőkapacitás és a nedvesítési idő kapcsolata

A továbbiakban a vizsgált mintáimból képzeletben épített szerkezetek kombinációival számolok, amiket nedvességgel terhelek. A szerkezet bizonyos részei más mértékben tudják felvenni a nedvességet, így a szerkezeti elemek kollektívan történő nedvességtartalom növelése nem célszerű. A száraz állapot kivételével ritka az olyan eset a gyakorlatban, amikor a két építőipari termék nedvességtartalma megegyezik, ezért a nedvességtartalom helyett a nedvesítési idővel számoltam. A nedvesítési időnél figyelembe vehető az anyagok változó nedvességfelvevő képessége. A 90 % relatív páratartalom melletti 20 °C-hoz tartozó nedvesítési idő egy olyan állapotot határoz meg, mely más relatív páratartalom, hőmérséklet és időtartam mellett is elérhető lenne. Ez után a nedvességtartalom a szerkezetben az év során stagnálhat, átlag körül mozoghat vagy jelentősen eltérhet.

4.2.1. Falszerkezetek adatai

A további számításaimhoz a 3.5.2. fejezetben létrehozott falszerkezetekből és a mérési eredményeimből kiindulva kiszámoltam az egyes falkombinációk rétegvastagságait. A számításaimban arra törekedtem, hogy lehetőleg a legpontosabban közelítse meg a hőátbocsátásra vonatkozó $U_{fal}=0,24 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ -es közel nulla energiaigényű épületekre érvényes követelményi szintet. (Rendelet-hivatkozás 1, 2006) A teherhordó szerkezet vastagságát állandónak vettem. Mivel ez a vastagság többnyire adott, ezért különféle szerkezeteknél a hőszigetelés vastagságát változtattam. Itt meg kell jegyezni, hogy a hőszigetelés pontos vastagságának vannak korlátai, mivel a gyártók csak járatos méretekben árúsítják ezeket, így a vastagságokat mindig ezekre az értékekre kerekítettem fel. A felhasznált vastagságok a következő, 13-as táblázatban olvashatók.

13. táblázat Hőszigetelés vastagságok

	Tömör téglá (38 cm)	Könnyűbeton (30 cm)	Pórusbeton (30 cm)
Kőzetgyapot [cm]	12	13	6
Grafitos EPS [cm]	10	10	5
EPS 30 [cm]	14	14	7
Sárga XPS [cm]	12	14	6
Parafo [cm]	12,5	13,5	7

Az oszlopokban az adott falazóelemre illesztett hőszigetelő anyag közel nulla szint eléréséhez szükséges vastagsága látható. A 13. táblázat harmadik sorának második oszlopában látható egy 10 cm-es érték. Ennek megfelelően, ha azt szeretnénk, hogy egy 38 cm vastag tömör téglafalazat hőátadási tényezője megfeleljen az $U_{fal}=0,24 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ -es közel nulla energiaigényű épületekre vonatkozó követelményi szintnek (Rendelet-hivatkozás 1, 2006), akkor azt 10 cm vastag grafitos EPS hőszigeteléssel kell ellátni. Hasonlóan a többi esetben is, a jelölt vastagságban kell alkalmazni a hőszigeteléseket. Az 14. táblázatban láthatók a szerkezetekre számolt U értékek. Ahogy már azt említettem, összesen 16 falszerkezetet vizsgáltam meg, 15 nehézszerkezetet és egy könnyűszerkezetet.

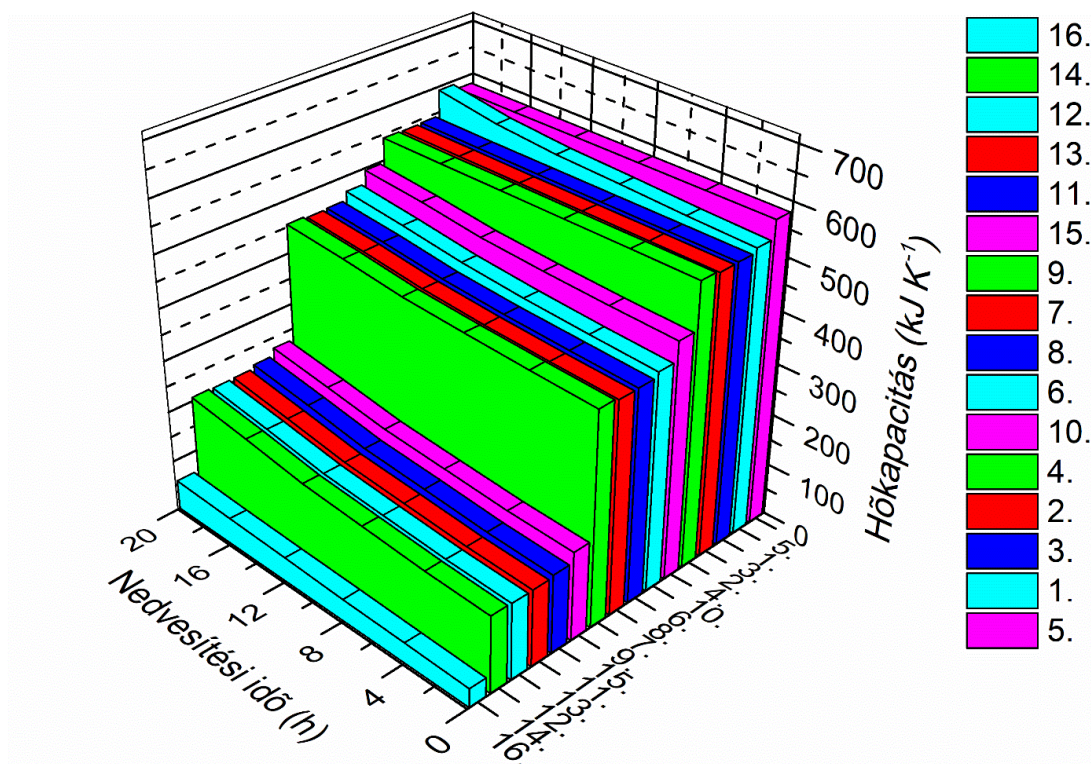
14. táblázat Számított hőátbocsátási (U) értékek

Számított hőátbocsátási értékek (U)	Tömör téglafal	Könnnyűbeton	Pórusbeton
Kőzetgyapot [$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$]	0,24	0,228	0,232
Grafitos EPS [$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$]	0,241	0,243	0,233
EPS 30 [$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$]	0,239	0,24	0,232
Sárga XPS [$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$]	0,218	0,219	0,23
Parafa [$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$]	0,239	0,24	0,229
Könnnyűszerkezet [$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$]			0,2

Az adatokból látható, hogy a követelményt két esetben csak megközelítették az értékek. Akkor, amikor a grafitos EPS-t kombináltam a tömör téglával vagy a könnyűbetonnal. Az értékek azonban csak 1-3 ezrednyi, tehát elhanyagolható mértékben nem feleltek meg. Így ezeket az értékeket is megfelelőnek tartottam. Elmondható, hogy a gyakorlatban alkalmazott könnyűszerkezetek a követelmény szintet könnyedén elérik. (Szodrai & Lakatos, 2017b)

4.2.2. Szerkezetek hőkapacitásai

A vizsgált minták száraz állapotából és 4, 8, 12, 16, 20 órás nedvesítése után meghatározott nedvességtartalmakból a (14), (15) és (16)-os képleteket felhasználva kiszámoltam a hőkapacitást a 16 szerkezetre, mely értékek a 12. diagramon láthatók. Megjegyzendő, hogy a tömör, zárt cellás anyagokat (parafa, sárga színű XPS és tömör téglafal), ahol csak adszorpció útján történt nedvességfelvétel, a számításaimban nedvesítési időtől független anyagként kezelem, mivel a gyakorlatban nem tud az anyag belsejébe jutni a víz. Ezáltal az anyagnak se a sűrűsége se a fajhője nem fog változni. Ezekben az esetekben az anyag száraz állapotához tartozó paraméterekkel számoltam.



12. diagram Szerkezetek hőkapacitásai

(A 12-es 13-as 14-es és 15-ös diagramon színkódokkal jelöltem az alkalmazott hőszigeteléseket; világoskék: kőzetgyapot, piros: grafitos EPS; sötétkék: EPS 30, zöld: sárga XPS, lila: parafa.)

A 12. diagramon az egyes szerkezetek nedvesítési idő menti hőkapacitás függvényét láthatjuk egymás mellett növekvő sorrendben. Ez egy lépcsőzetes elrendezést eredményezett, ahol az 1-es és 5-ös szerkezet rendelkezett a legnagyobb, míg a 16-os szerkezet a legkisebb hőkapacitásokkal. Külön kiemelendő jelenség tapasztalható a grafitos EPS, EPS 30 és sárga színű XPS-nél. Az anyagokhoz tartozó hőkapacitások a számításaimban minimálisan különböztek. Emiatt jelleggörbéjük közel azonosnak tekinthető, legfőképpen ez indokolta a háromdimenziós ábrázolást, így átláthatóbbak és elkülöníthetőek a jellegek. Megfigyelhető az is, hogy a parafa hőszigetelés mindhárom tartószerkezetnél kiemelkedik a többi közül, ami az anyag nagy fajhőjének és sűrűségének köszönhető.

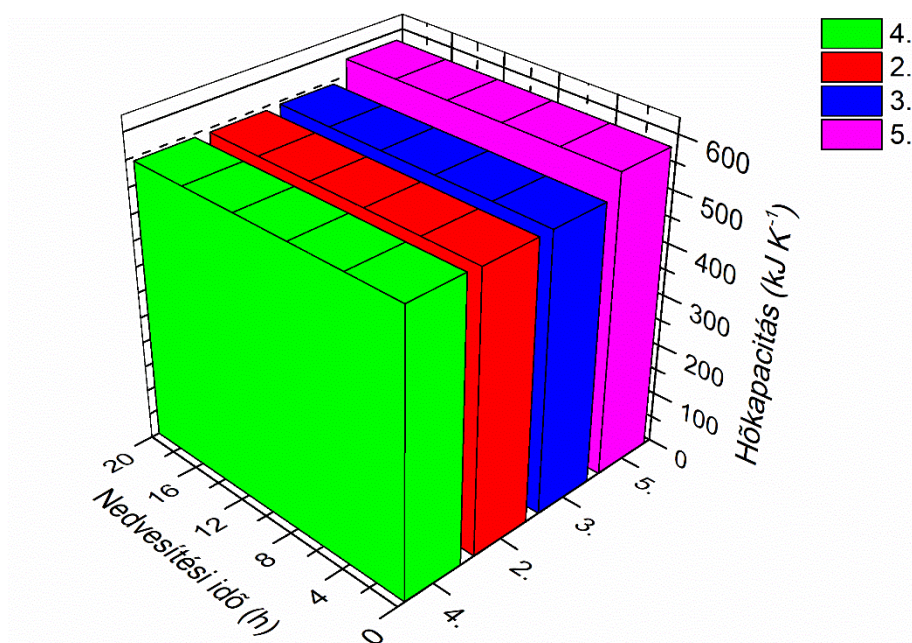
A lépcsőzetes elrendezés a tartószerkezetek paramétereiből adódik. A szerkezet hőkapacitását a legnagyobb részben a tartószerkezet anyaga határozza meg, mivel a tartószerkezetnek a sűrűsége és rétegvastagsága is jóval nagyobb, mint a hőszigetelésnek. A legnagyobb hőkapacitást a tömör téglá tartószerkezettel rendelkező kombinációknál állapítottam meg, ezen belül is, amikor a parafával volt hőszigetelve, mivel ennek a két terméknek (téglának és

parafának) van a legnagyobb fajhője a vizsgált anyagok közül. A másik szerkezet, mely magas hőkapacitást ért el az 1. szerkezet: a tömör tégl és közetgyapot kombinációja. A szerkezet szintén a tartószerkezet és a hőszigetelés egyedi tulajdonságai alapján érte el ezt a magas értéket, mivel a tömör téglának a meglévő magas hőkapacitásához hozzáadódott a nedves közetgyapot nagy hőkapacitása. A közetgyapot jó nedvességfelvevő képességének köszönhetően a szerkezetbe 6 m/m%-nyi nedvesség tudott bejutni. A nedvesítési idő 20 óra után ebben a szerkezetben 1,56-szoros változást eredményezett a hőkapacitásban. A számítások alapján ez volt a legmarkánsabb változás.

A nedvesítési idő és hőkapacitás függvényében háromféle jelleget különböztetnek meg: 1) A nedvesítési időtől független, 2) a nedvesítési időtől kismértékben függő és 3) a nedvesítési időre érzékeny szerkezetet. (Szodrai & Lakatos, 2017b)

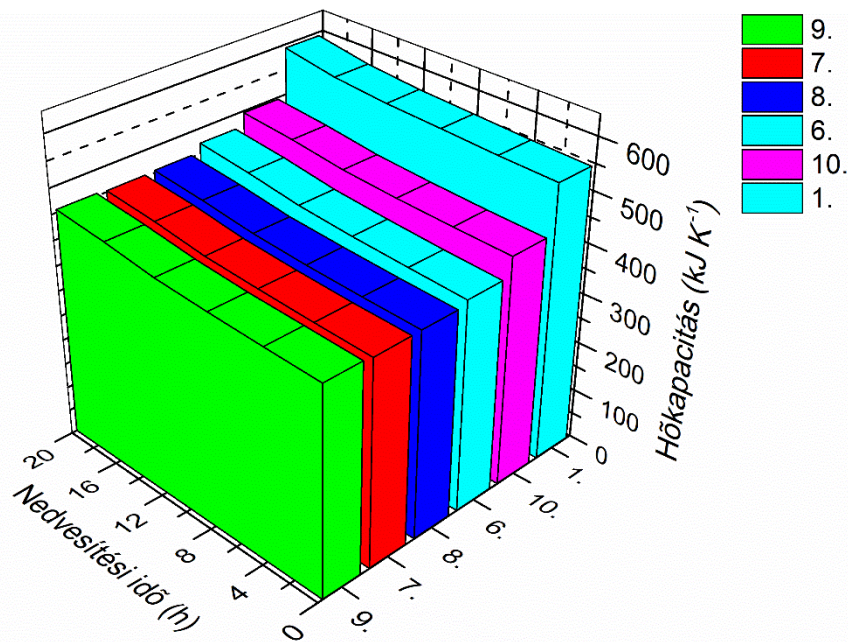
4.2.2.1. Nedvesítési időtől független hőkapacitású szerkezetek

Nedvesítési időtől független jellegű szerkezetek közé tartozik a 4-es és 5-ös szerkezet, a sárga színű XPS-sel és parafával hőszigetelt tömör tégl szerkezetek (a csak adszorpcióra hajlamos anyagok kombinációja). Továbbá (2-es és 3-as) a grafitos EPS és EPS 30 anyagok kombinációja a tömör téglával. A két polisztirol hab viszonylag nagy nedvességet (15-15 m/m%-ot) vett fel a 20 órás nedvesítési idő alatt. A polisztirol habok alacsony sűrűségéből adódóan (száraz állapotban a sűrűségük 14 - 14 kg m⁻³) a tömör téglához képest (száraz állapotban a sűrűsége 1856 kg m⁻³) nem tudta módosítani jelentősen a szerkezet hőkapacitását, amiben a tömör tégl paraméterei dominálnak.



13. diagram Nedvesítési időtől független hőkapacitású szerkezetek

4.2.2.2. A nedvesítési időre kis mértékben érzékeny szerkezetek



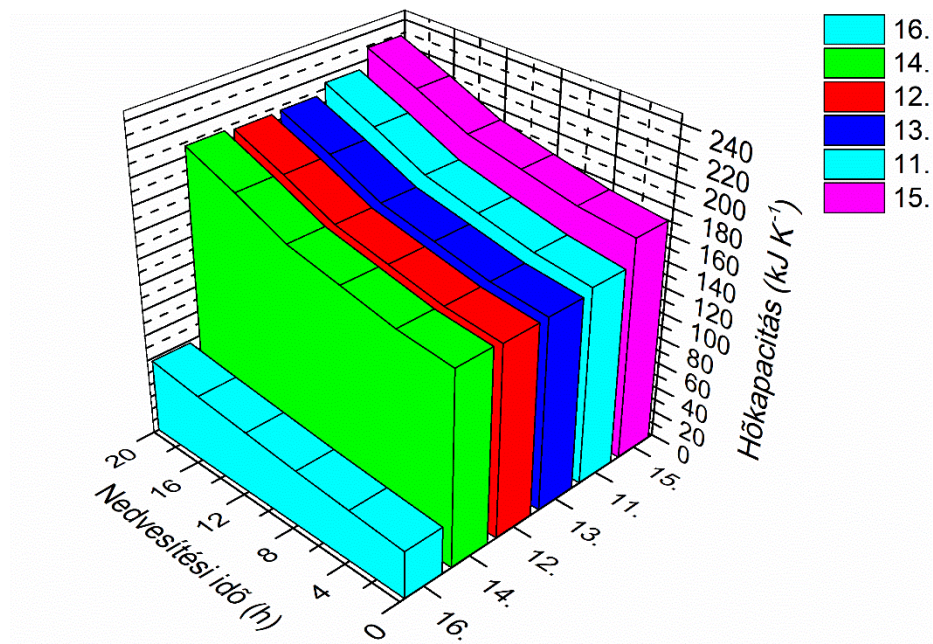
14. diagram A nedvesítési időre kis mértékben érzékeny tulajdonsággal rendelkező szerkezetek

Ezeknek a szerkezeteknek a hőkapacitása kisebb mértékben (7-13 %-ban) változott (14. diagram). Ebbe a kategóriába tartoztak a könnyűbetonnal rendelkező szerkezetek (6, 7, 8, 9 és 10) és a kőzetgyapottal hőszigetelt tömör téglá szerkezet (1). (Szodrai & Lakatos, 2017b)

4.2.2.3. A nedvesítési időre érzékeny szerkezetek

A nedvesítési időre érzékeny tulajdonsággal rendelkező szerkezetek közé tartoztak a pórusbetonnal rendelkező szerkezetek (11, 12, 13, 14, 15) és a könnyűszerkezet (16) (15. diagram). Ezen szerkezetek hőkapacitás változásai 8 % és 56 % között mozogtak 20 órás nedvesítési idő hatására. Itt a nedvesítési idő teltevel mind a tartószerkezetnek, mind a hőszigetelésnek a nedvességtartalma változott, lehetővé téve a hőkapacitás intenzív változását.

A 12-es diagramon a hőkapacitásokban az 1-től 10-es szerkezetig magas értékeket figyelhetünk meg. Ezek a magas értékek kedvezők lehetnek abban az esetben, ha a szerkezetbe valamennyi hőt be akarunk tárolni. A méréseim alapján a tömör téglával rendelkező szerkezetek (1-től 5-ig) bizonyultak hőkapacitás szempontjából a legjobbnak. Elmondható továbbá, hogy a hőszigetelésnek kis szerepe van a teljes szerkezet hőkapacitásában. (Szodrai & Lakatos, 2017b)



15. diagram A nedvesítési időre érzékeny tulajdonsággal rendelkező szerkezetek

A 4.2. fejezetben elért eredményeket a következő publikációban közöltem:

Szodrai Ferenc és Lakatos Ákos. „Effect of the Moisture in the Heat Storage Capacity of Building Structures.” Applied Mechanics and Materials 861 (2017): 320-326.

4.3. A fajlagos hőveszteség-tényező vizsgálatának eredményei

A fajlagos hőveszteség-tényező (q) értékeit mindegyik falszerkezeti kialakításra kiszámoltam a 3.6. alfejezet 17-es egyenlete alapján. A szerkezeteknél meghatároztam a fajlagos hőveszteség-tényező változását a száraz állapottól a 20 órás nedvesítési időig az A/V arány (Rendelet-hivatkozás 1, 2006) változásának függvényében. (Szodrai, et al., 2015a)

Az így kiszámolt q értéknek a nedvesítési időtől és az A/V aránytól függően felület diagramokat szerkesztettem. A 16-23-ig diagramokban ábrázoltam a 7/2006. (V. 24.) TNM Rendelet (Rendelet-hivatkozás 1, 2006) által a közel nulla energiaigényű épületekre meghatározott felső határt is. Ezeket a felső határértékeket transzparens kék színű felülettel jelöltem.

A jelölt diagramokon, amikor a felület diagram a kék színű réteg felett volt, azt jelentette, hogy a q érték meghaladta a rendelet által meghatározott felső határértéket.

A közel nulla energiaigényű épületekre vonatkozó megengedett q értékeket a következő függvényekkel határoztam meg.

$$A/V \leq 0,3 \quad q = 0,12 \text{ W m}^{-3} \text{ K}^{-1} \quad (40)$$

$$0,3 \leq A/V \leq 1,3 \quad q = 0,05143 + 0,2296 \cdot (A/V) \text{ W m}^{-3} \text{ K}^{-1} \quad (41)$$

$$A/V \geq 1,3 \quad q = 0,28 \text{ W m}^{-3} \text{ K}^{-1} \quad (42)$$

Látható az egyenletekből, hogy a q érték arányos az A/V aránnyal és független a nedvesítési időtől. (Rendelet-hivatkozás 1, 2006)

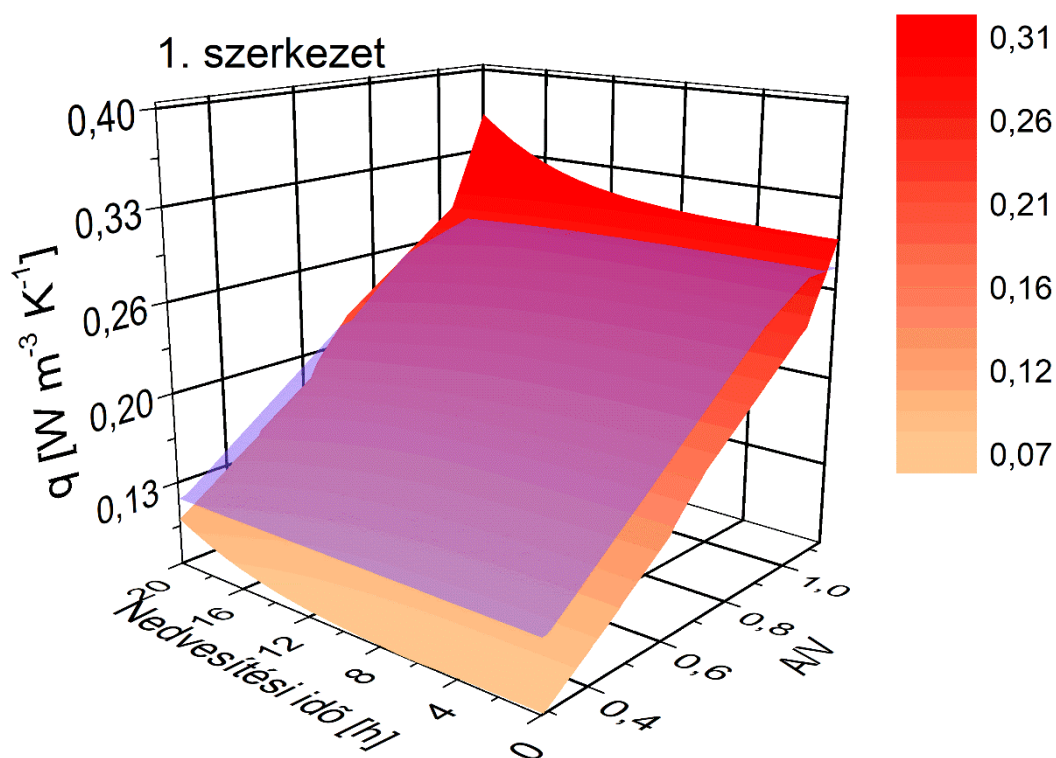
A 16-tól 23-as diagramokig a felső határ felületének és a generált q érték felületének kapcsolatait látjuk. Az eredményeket két típusba (A és B-re) soroltam a felső határoknak történő megfelelés alapján.

4.3.1.1. „A” típus

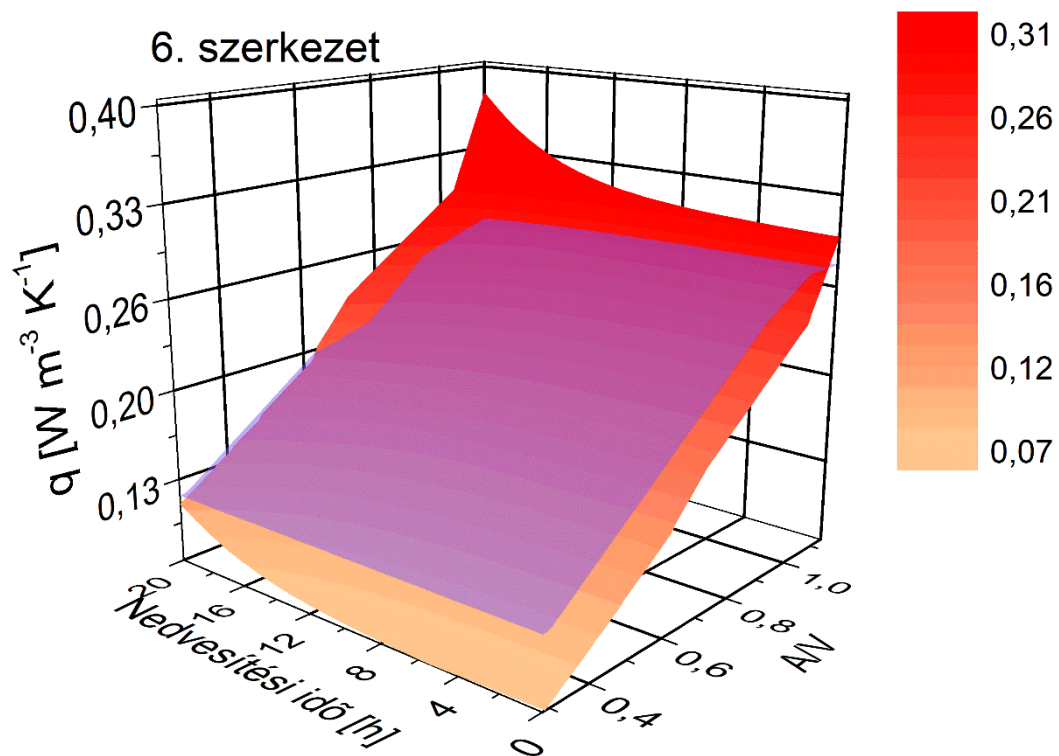
Az A típusban a generált épület 20 órás nedvesítési idő alatt bizonyos A/V arányoknál meghaladja a felső határértéket. Ez a jelenség az 1, 6, 11 és 16 szerkezeteknél jelenik meg.

Az első négy diagramon azokat a szerkezeteket láthatjuk, melyek közetgyapottal voltak szigetelve. A nagy q érték növekedés az 1, 6, 11 és 16-os szerkezetben a közetgyapot nagy nedvesítési időre való érzékenységevel magyarázható. A közetgyapot exponenciális növekedéséből adódóan látható, hogy a nedvesítés első 15 órájában a szerkezetek felületei még nem növekedtek. Majd a következő 5 órában a számolt fajlagos hőveszteség-tényező megduplázódott. A diagramokon az is látható, hogy kisebb nedvesítési idő esetében a közetgyapotnak előnyös tulajdonságai is vannak a kezdeti stagnálás miatt. Az A típusba tartozó

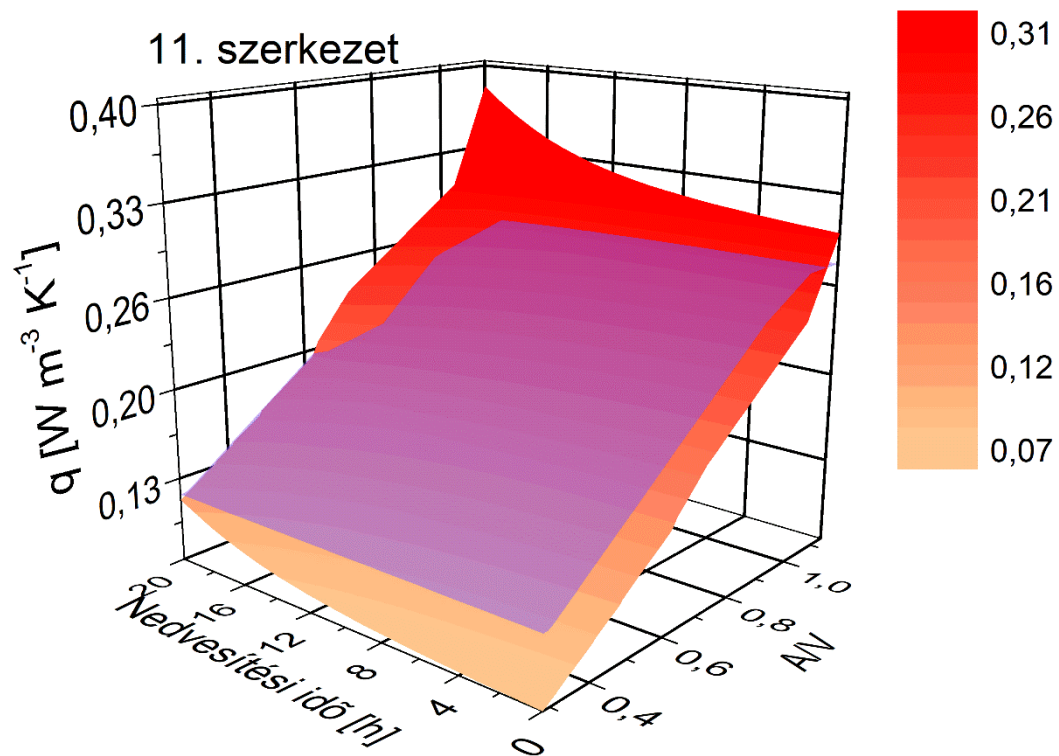
szerkezetek láthatóan közel azonos q értéket vettek fel. Ez az alkalmazott hőszigetelő anyagnak köszönhető, ami ezen esetekben megegyezett. Látható párhuzamot is vonhatunk a közetgyapot hővezetési tényezőjének és a fajlagos hőveszteség-tényezőjének nedvesítési időtől való függése között. Mindegyik esetben egy exponenciális növekedés tapasztalható. A felső határérték túllépését ennél a típusnál a 0,6-nál nagyobb A/V aránynál tapasztaltam 16 órás nedvesítés után. A szerkezetek közül a tömör téglával rendelkező 1-es szerkezet bizonyult a legellenállóbbnak a nedvesítés hatására. Itt csak a 20 órás nedvesítési idő előtti pillanatokban látható változás (16. diagram), itt haladja meg a felső határértéket (q). A nedvesítésre legérzékenyebb a 11-es szerkezet, a közetgyapot és pórusbeton kombinációja, itt már 16 óra után átlépte a felső határértékeket. 20 órás nedvesítés hatására a könnyűszerkezetnek átlagosan 1,64-szeresére változott a kezdeti q értéke. A vizsgált 16 szerkezet közül ennél volt a legnagyobb változás.



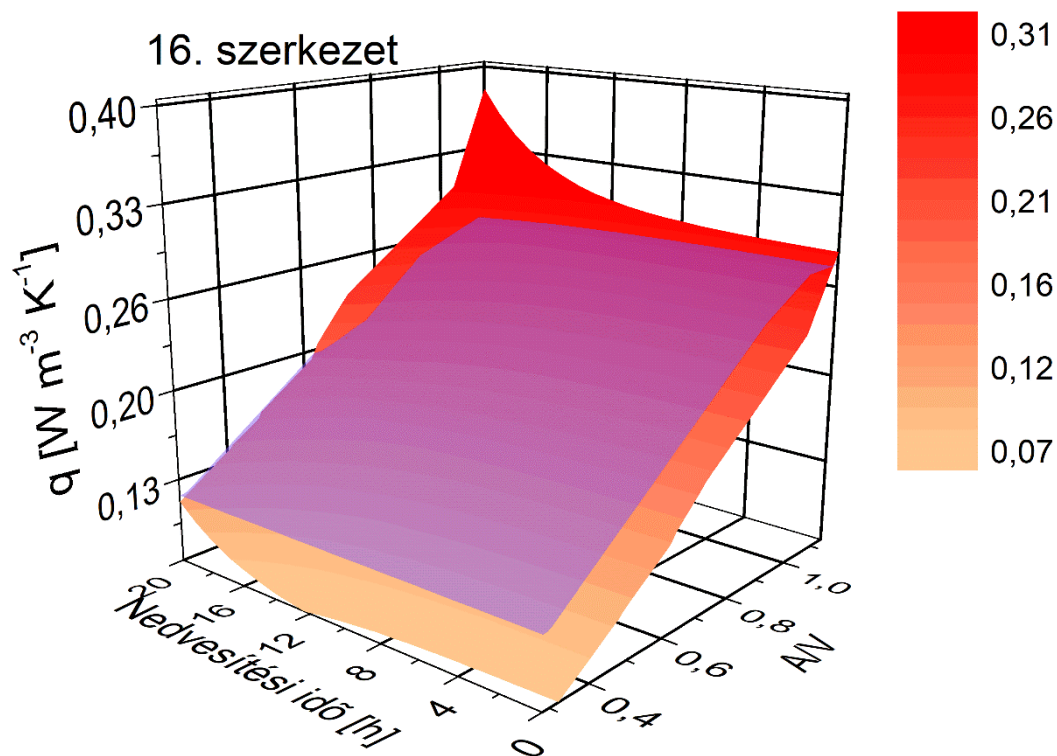
16. diagram 1. szerkezet (közetgyapot + tömör tégl) felületdiagramja



17. diagram 6. szerkezet (kőzetgyapot + könnyűbeton) felületdiagramja



18. diagram 11. szerkezet (kőzetgyapot + pórusbeton) felületdiagramja



19. diagram 16. szerkezet (könnyűszerkezet) felületdiagramja

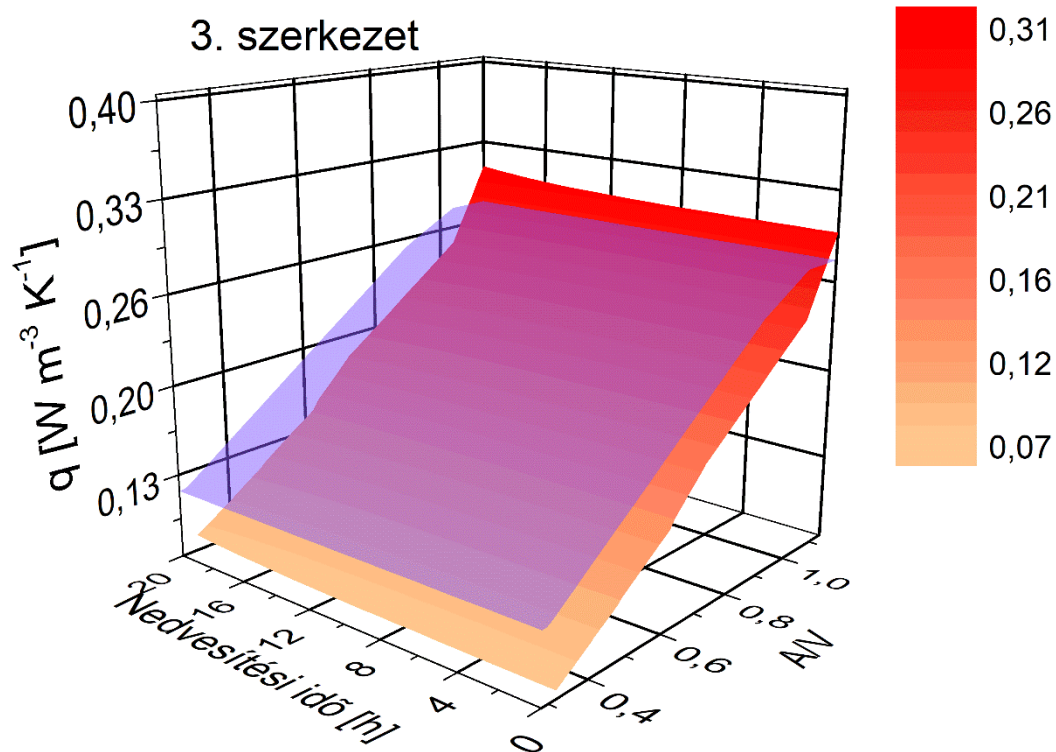
A 18. diagramon látható, hogy itt nagyjából 16 órás nedvesítési időnél lépi át a felső határértéket. Ha a szerkezet mindkét tagjának nedvességtartalma éves szinten átlagosan meghaladja a 16 órás nedvesítésnek megfelelő szintet (pórusbeton esetében 3,8 m/m%, a kőzetgyapot esetében 4,8 m/m% nedvességtartalmat), akkor a szerkezet gyártói adatlapja alapján meg fog felelni, mérési és számítási eredményeim alapján viszont nem fog megfelelni a TNM rendelet ezen előírásának. Ezt a nedvességtartalom szintet valamilyen külső hatásból adódóan érheti el, legyen az szerkezeti hiba, melyen befolyik a csapadék, vagy hosszú ideig fellépő magas átlagos nedvességtartalomból adódó nedvességfelvétel. Természetesen a 16 órán át tartó 90 % és 20 °C egy extrém nedvesítési folyamat paraméterei, de magasabb páratartalom mellett rövidebb lefolyási idő alatt is elérhető ez a nedvességtartalom. Úgy, hogy emellett az év során a falszerkezet száradhat vagy magasabb nedvességtartalmat is elérhet, tehát egy nedvességtartalom átlag körül mozog. (Szodrai, et al., 2015a)

4.3.1.2. „B” típus

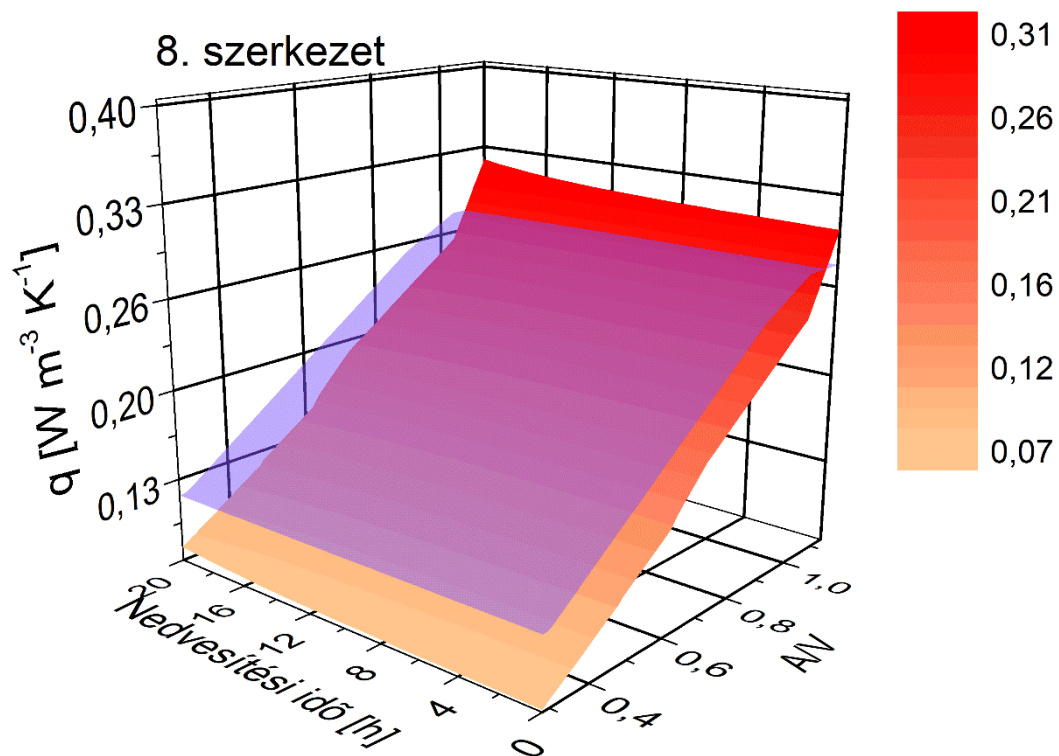
A B típuson belül két altípusba sorolnám a szerkezeteket: az egyik altípusba azok a szerkezetek tartoznak, melyek nedvesség hatására csak minimálisan változtatták q értéküket, a másik altípusba pedig azok, amelyek víztaszító tulajdonságuk miatt nem képesek változtatni a q értéket nedvesítési idő hatására. Mindkét altípusnak legfontosabb tulajdonsága, hogy csak az A/V arány növekedése miatt lépte át a követelmény felső határértékét.

A B típus első altípusába azok a szerkezetek tartoztak (3, 8, 12, 13, 14 és 15-ös), melyeknek a nedvesítési idő hatására q értékük ugyan változott, de nem haladta meg a felső határértéket.

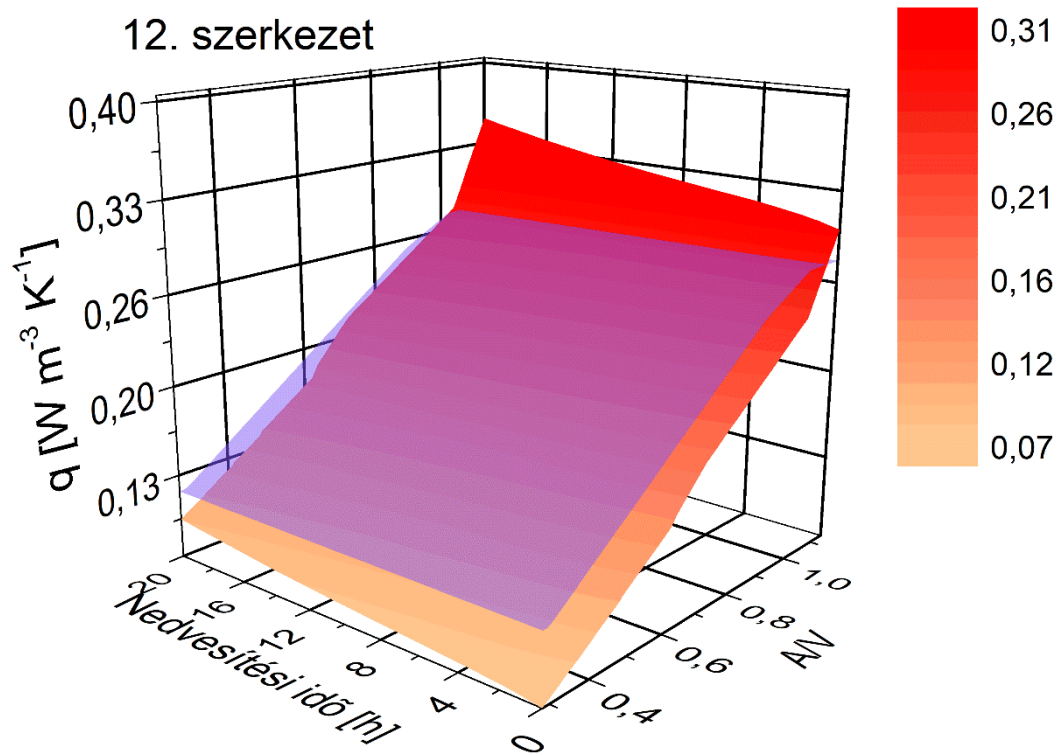
A 3-as és 8-as szerkezetben a tömör téglá és a könnyűbeton tartószerkezet fajlagos hőveszteségtényezői között láthatunk különbséget. Megemlíteném, hogy a kezdeti és a 20 órás nedvesítési időhöz tartozó q értékek csak minimálisan térnek el. Ez annak köszönhető, hogy a nedvesség hatása az EPS 30 hőszigetelési képességre kicsi. Ami a $Z=1,02$ értékben is megnyilvánul.



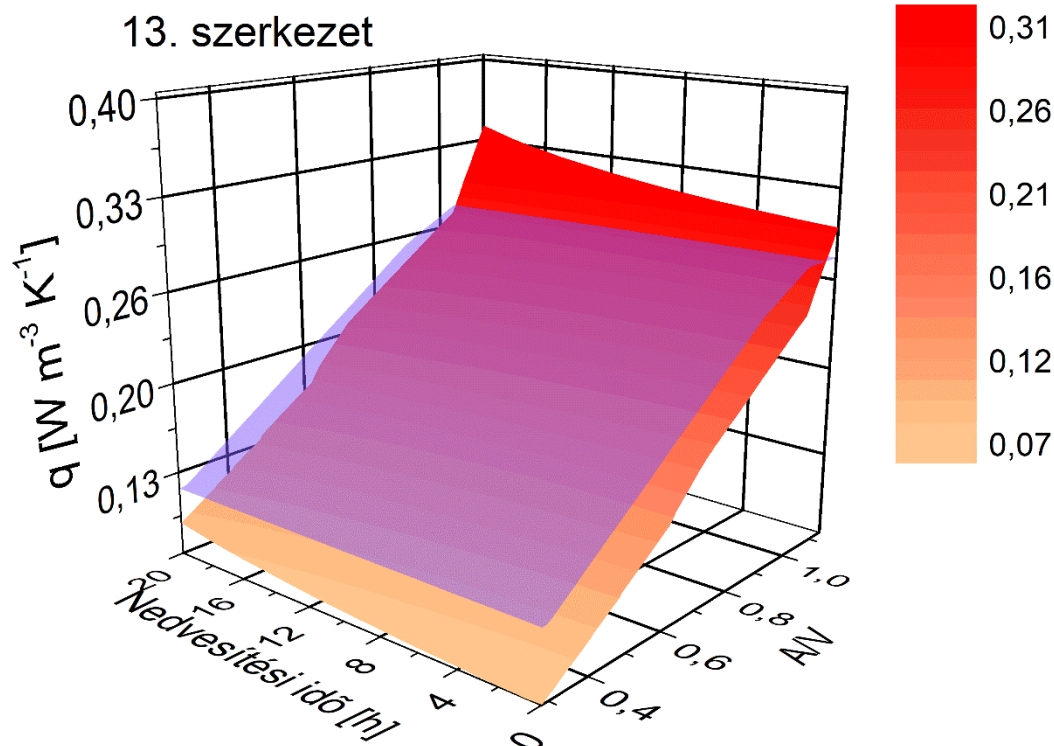
20. diagram 3. szerkezet (EPS 30 + tömör téglá) felületdiagramja



21. diagram 8. szerkezet (EPS 30 + könnyűbeton) felületdiagramja



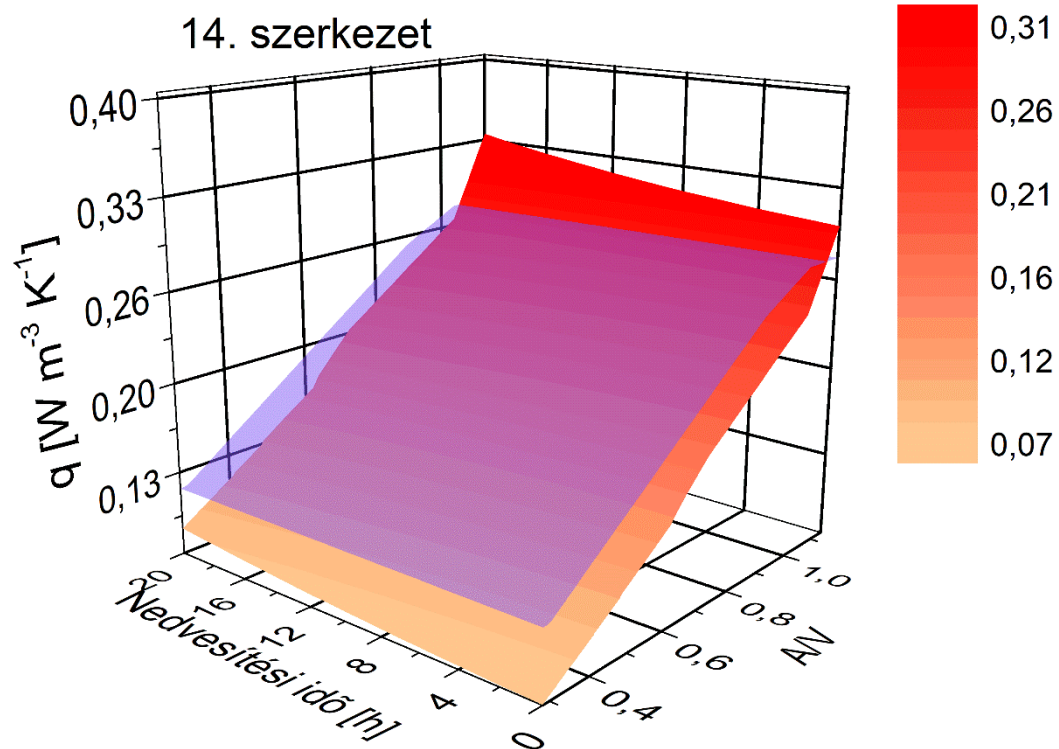
22. diagram 12. szerkezet (Grafitos EPS + pórusbeton) felületdiagramja



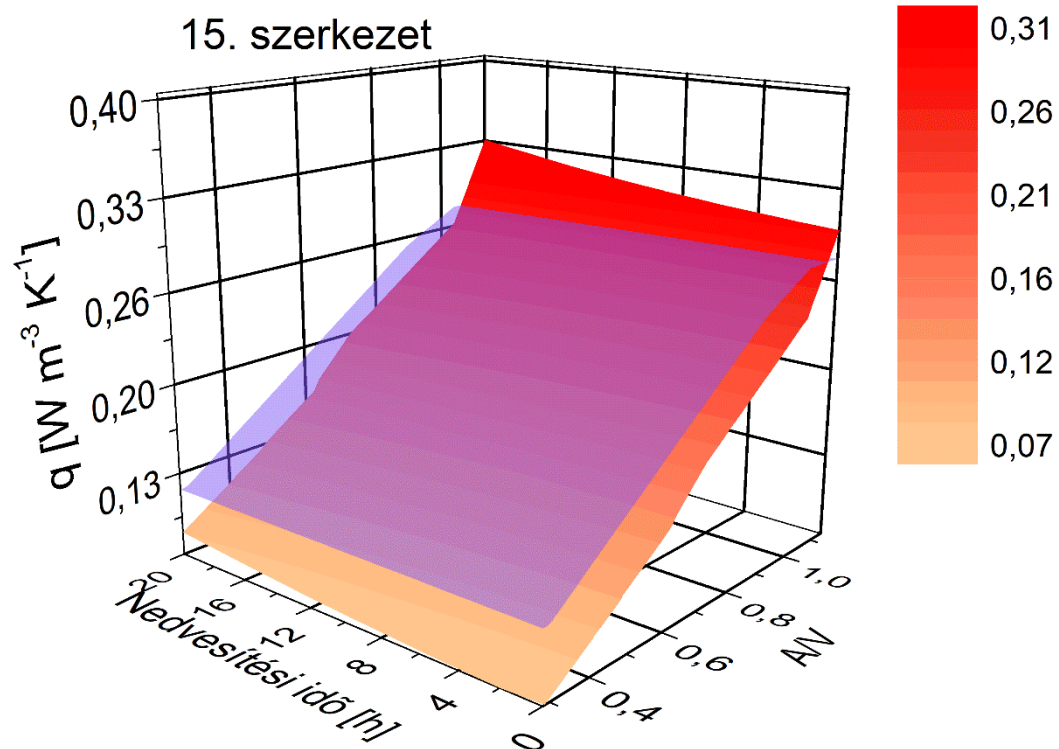
23. diagram 13. szerkezet (EPS 30 + pórusbeton) felületdiagramja

A 12 és 13. szerkezetekben az EPS habokat tudjuk összehasonlítani pórusbeton falazaton. Itt láthatjuk, hogy a grafitos EPS (12) „q”-ja jobban reagál a nedvesítési időre a kezdeti szakaszban és magasabb értéket vesz fel a 20 órás nedvesítési időtartam alatt is, mint az EPS 30 (13).

A 12-es szerkezethez tartozó két anyagnak volt a legnagyobb affinitása a hővezetési tényező változására az alcsoportban. A további 13-as, 14-es és 15-ös szerkezetek is pórusbeton falazatot tartalmaztak. Itt megfigyelhető, hogy az egyes hőszigetelő anyagok milyen mértékben tudják csökkenteni a fajlagos hőveszteség-tényezőt (q). Látható, hogy a legjobb eredményt a parafánál lehetett elérni, bár a különbségek minimálisak. A 12-es és 14-es szerkezetet összehasonlítva megmutatkozik az XPS jó vízzáró képessége. A 22. diagramon lévő felület felső részén látható a kezdeti ugrás hiánya (20. diagramhoz képest), aminek hatására egy jóval kisebb q érték alakul ki a 14. szerkezetben, mivel csak a pórusbeton hővezetése változott. (Szodrai, et al., 2015a)

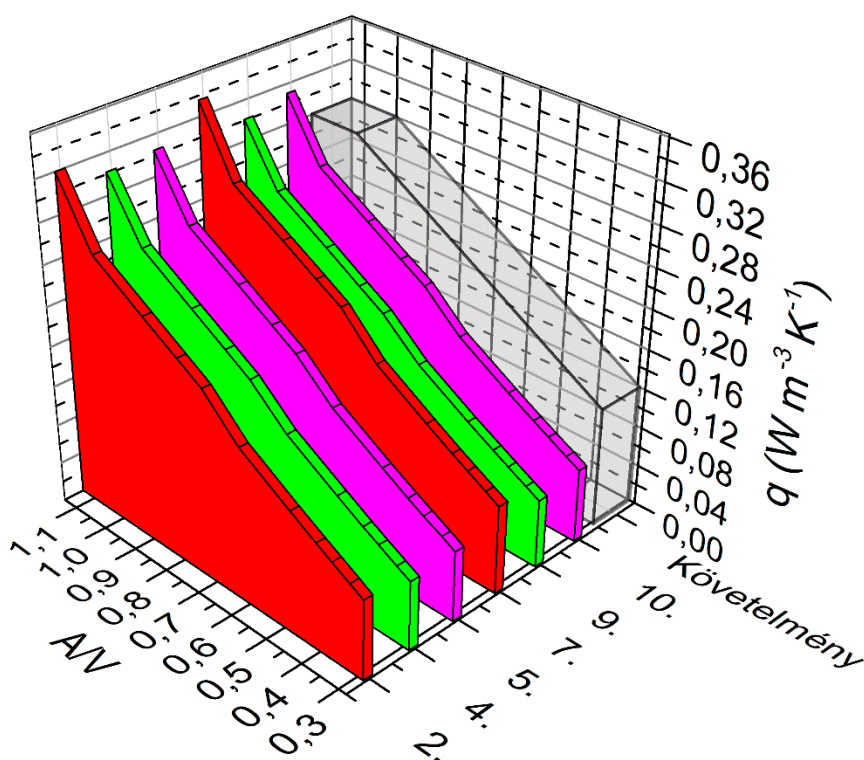


24. diagram 14. szerkezet (Sárga színű XPS + pórusbeton) felületdiagramja



25. diagram 15. szerkezet (parafa + pórusbeton) felületdiagramja

A B típus második altípusába azok a szerkezetek tartoztak, amiknek a nedvesítési idő hatására a q értéke nem változott. A q érték csak akkor haladta meg a felső határértéket, amikor az A/V egynél nagyobb lett. Ezek a 2, 4, 5, 7, 9 és 10-es szerkezetekhez tartoztak, melyeket a 23. diagramon ábrázoltam. Mivel itt nem változott a q érték a nedvességterhelés függvényében, így elég lett volna két dimenzióban ábrázolni a függvényeket. A közeli értékek miatt viszont az olvashatóság érdekében szükséges volt az egymás mellett ábrázolt görbéket szögben elforgatni. A különböző szerkezetek görbéi közötti különbségek abból adódtak, hogy a falszerkezetben mennyire pontosan lehetett összerakni a követelményre vonatkozó vastagságokat.



26. diagram A harmadik csoportba tartozó szerkezetek görbéi

Itt a legmagasabb fajlagos hőveszteség-tényező értéket a könnyűbeton és grafitos EPS (7-es szerkezet) kombinációja adta. Ez láthatóan ki is emelkedik a 26. diagram szerkezetei közül. A legalacsonyabb értékeket az XPS könnyűbeton és tömör tégl (4-es és 9-es szerkezet) kombinációja adta, ezek az értékek közel azonosak voltak. (Szodrai, et al., 2015a)

4.3.1.3. Összegzés a fajlagos hőveszteség-tényezőre vonatkozóan

Vizsgálataimban az alábbiakat állapítottam meg. A legnagyobb q érték növekedést a közetgyapottal szigetelt szerkezeteknél kaptam. Amikor ezt az anyagot alkalmaztam hőszigetelésként, a TNM rendeletben (Rendelet-hivatkozás 1, 2006) meghatározott q érték a felső határát a nedvesítési idő első 16 órájában már meghaladta.

A nedvességnek hatása van az épületek fajlagos hőveszteségére. Megállapítható, hogy a legjelentősebb változás a könnyűszerkezetes épületeknél figyelhető meg, ahol a q érték az A/V arány és a nedvesítési idő függvényében akár 64 %-kal is változhat.

Az A típusú szerkezeteknél nagy nedvességterhelés fellépése esetén tervezésnél korrekció szükséges az alkalmazott hőszigetelőanyag vastagságában. A markáns változásokat a 15. táblázatban szemléltettem, ahol a legnagyobb és a legkisebb nedvesség változásokat vetettem össze. (Szodrai, et al., 2015a)

15. táblázat Átlagos fajlagos hőveszteség-tényező változás

	Tömör tégl	Könnyűbeton	Pórusbeton
Kőzetgyapot [%]	38	48	49
Grafitos EPS [%]	12	16	30
EPS 30 [%]	6,4	9,2	25
Sárga XPS [%]	0	1,5	20
Parafa [%]	0	1,7	19
Könnyűszerkezet [%]			64

Megállapítható, hogy olyan helyeken, ahol nagy nedvesítési idő várható, ott javasolt az XPS és a parafa, valamint a grafitos EPS használata, mivel ezek nedvesítési időre, így a nedvességre ellenállóak. A grafitos EPS-nél kiemelném, hogy a kezdeti órákban ugrásszerűen nő, de 4 órás nedvesítési idő után állandósul a hővezetési tényező, ami befolyással van a szerkezet q értékére. Az EPS 30 és a kőzetgyapot hőszigetelések esetében a nedvességfelvétel nagyobb mértékű, mint a többi vizsgált hőszigetelés. További észrevételem volt, hogy nagyobb A/V aránynál magasabb értékeket kaptam és a vizsgált esetekben az A/V érték növekedéséből adódott a felső határérték átlépése. Ez azt jelenti, hogy a nagy A/V aránnyal rendelkező épületeknél, jellemzően a tömör, kocka alakú épületeknél, jobb hőátbocsátási (U) értékkel kell rendelkeznie a szerkezetnek, mint ami az előírt, hogy megfeleljen a fajlagos hőátbocsátási (q) szint felső határának.

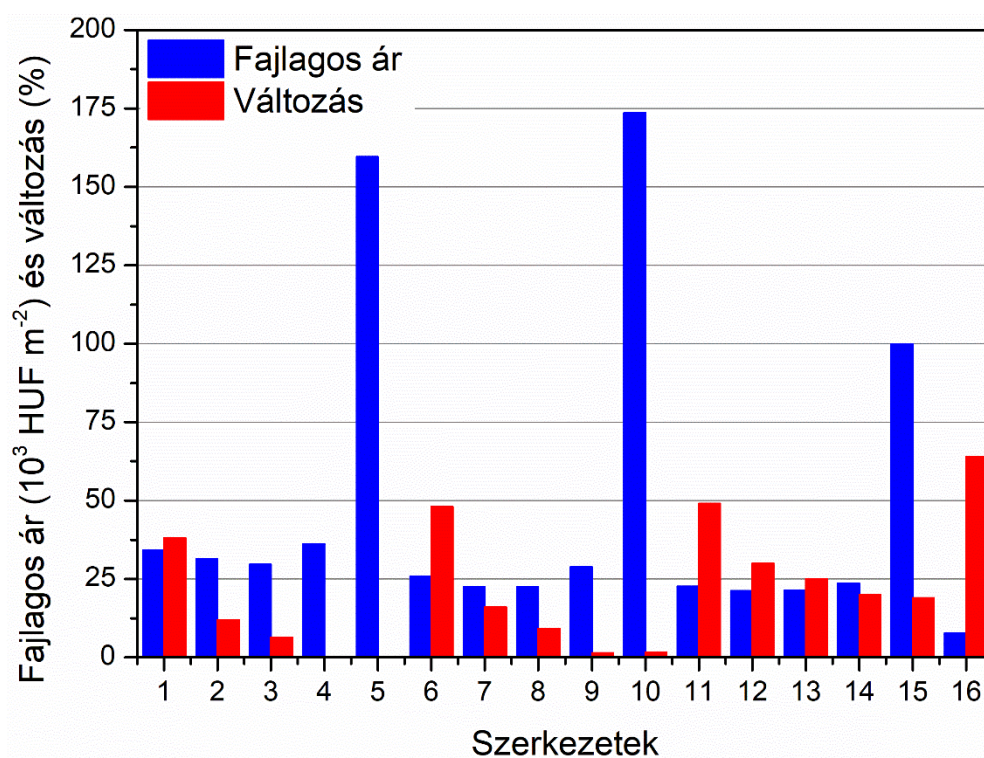
4.3.1.4. Gazdaságossági vizsgálat

Ahhoz, hogy a legjobb szerkezeteket ki tudjam választani, a bekerülési költségeket is megvizsgáltam. A 16. táblázatban minden egyes szerkezetnek kiszámoltam a fajlagos beruházási költségét. Fajlagos árként egy négyzetméterre vetített beruházási értéket adtam meg.

A 15. és 16. táblázat kombinálásával megkaptam a helyes választ arra a kérdésre, melyik szerkezet a legjobb az épület tervezésénél.

16. táblázat Szerkezetek fajlagos költségei

	Tömör tégl	Könnyűbeton	Pórusbeton
Kőzetgyapot [10^3 HUF m^{-2}]	34,2	25,8	22,6
Grafitos EPS [10^3 HUF m^{-2}]	31,4	22,6	21,3
EPS 30 [10^3 HUF m^{-2}]	29,7	22,5	21,3
Sárga XPS [10^3 HUF m^{-2}]	36,2	28,8	23,6
Parafa [10^3 HUF m^{-2}]	159,6	173,6	99,9
Könnyűszerkezet [10^3 HUF m^{-2}]			7,7



27. diagram Szerkezetek összehasonlítása

A 15-es és a 16-ös táblázatot felhasználva elkészítettem a 24-es diagramot. A szemléltetés kedvéért az y tengelyen egyszerre ábrázoltam a fajlagos árat és a %-os változást. A bekerülésnél a könnyebb összehasonlíthatóság kedvéért ezres szorzót alkalmaztam. A változás a nedvesítési idő hatására a homlokzat megnövekedett hőátbocsátásából adódó q érték változását jelöli. A diagramról megkereshetjük a fajlagos hőveszteség és gazdaságosság szempontjából a legjobb szerkezetet.

Látható, hogy az 5-ös, 10-es és 15-ös szerkezet a többi kombinációhoz képest költségesebb. A parafa hőszigetelésként történő alkalmazása nem megtérülő, annak ellenére, hogy igen jó hőszigetelőnek bizonyult. Nyugat-Európában viszont vannak esetek, amikor mégis ezt alkalmazzák. A q érték változását nézve az 1, 6, 11, 16-os szerkezetekre kiemelkedően nagy értéket kaptam. A további szerkezetek már a bekerülési költség és a hosszas nedvesítési időből adódó q értékbeli változást nézve megfelelőnek tekinthetők. Tovább szűkíteni a kiválasztást a 4.2. pontban meghatározott hőkapacitás változás figyelembe vételével lehet. Ha feltételezzük, hogy a magas hőkapacitás a kedvező (mert a nap folyamán szeretnénk a szerkezetbe minél több hőt betárolni), akkor a 2-es, 3-as és 4-es szerkezetek, a grafitos EPS, EPS 30 és sárga színű XPS-sel szigetelt tömör téglafalazat bizonyulnak a legjobb választásnak. A három szerkezet közül az EPS 30-cal hőszigetelt tömör téglafalazatnak volt a legalacsonyabb fajlagos költsége és q érték változása. Hosszabb (20 óra) nedvesítési idő esetén a grafitos EPS-sel szigetelt 2-es kombináció kerül előnybe, mivel ez a szerkezet 8 óra után tartja a q értéket, a 3-as szerkezet viszont kis meredekséggel további növekedést mutat a telítődéséig, ami magasabb változáshoz vezethet. (Szodrai, et al., 2015a)

A 4.3. fejezetben elért eredményeket a következő publikációban közöltem:

Szodrai Ferenc, Ákos Lakatos és Ferenc Kalmár. „Analysis of the change of the specific heat loss coefficient of buildings resulted by the variation of the geometry and the moisture load.” ENERGY 115, 1. szám (2015): 820-829.

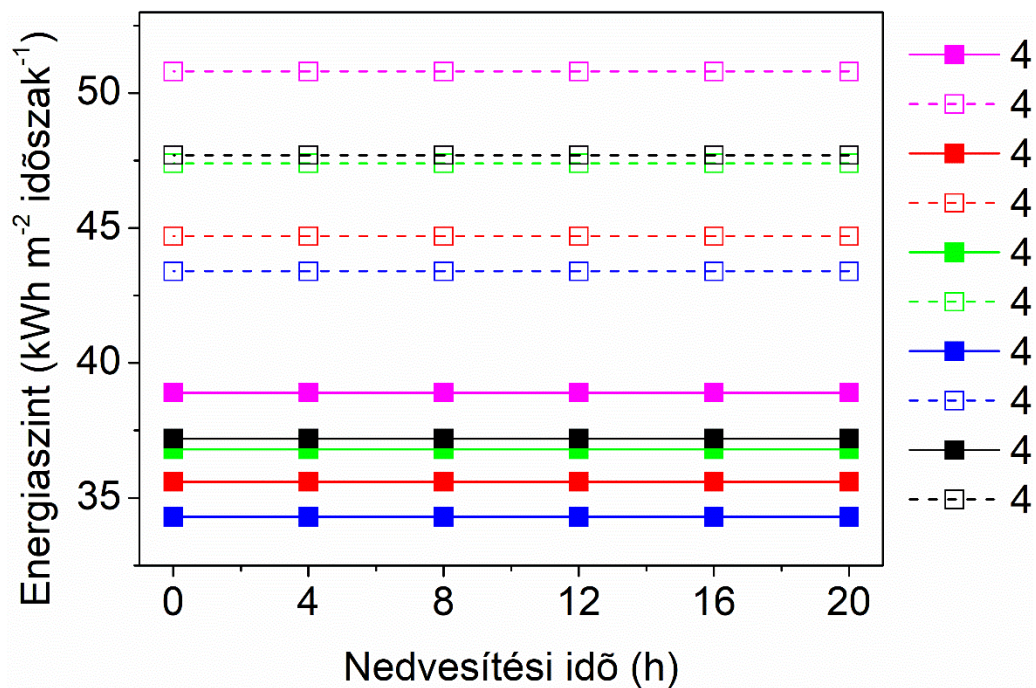
4.4. Különböző környezeti klímák hatásának szimulációs programmal vizsgált eredményei

Az 3.5.2. fejezetben tárgyalt 16 szerkezetből összerakott és nedvességgel terhelt épületekből kiválasztottam a 3.7.2. pontban részletezett épületet. Ezt az épületet gondolatban öt különböző főváros területére (öt különböző klímaregióra) helyeztem el. Az itt felsorolt variációk mindegyikére kiszámoltam a fajlagos éves primer energiaigényt és az átmeneti időszakokra a fűtési energiaigényt, valamint a transzmissziós veszteségeket (röviden energiaszinteket). Az átmeneti időszaknak március, április, május, szeptember, október és november hónapokat vettem. A vizsgálatom azért ezekre az időszakokra esett, mert akkor felléphetnek fűtési igények és a relatív páratartalom is magas.

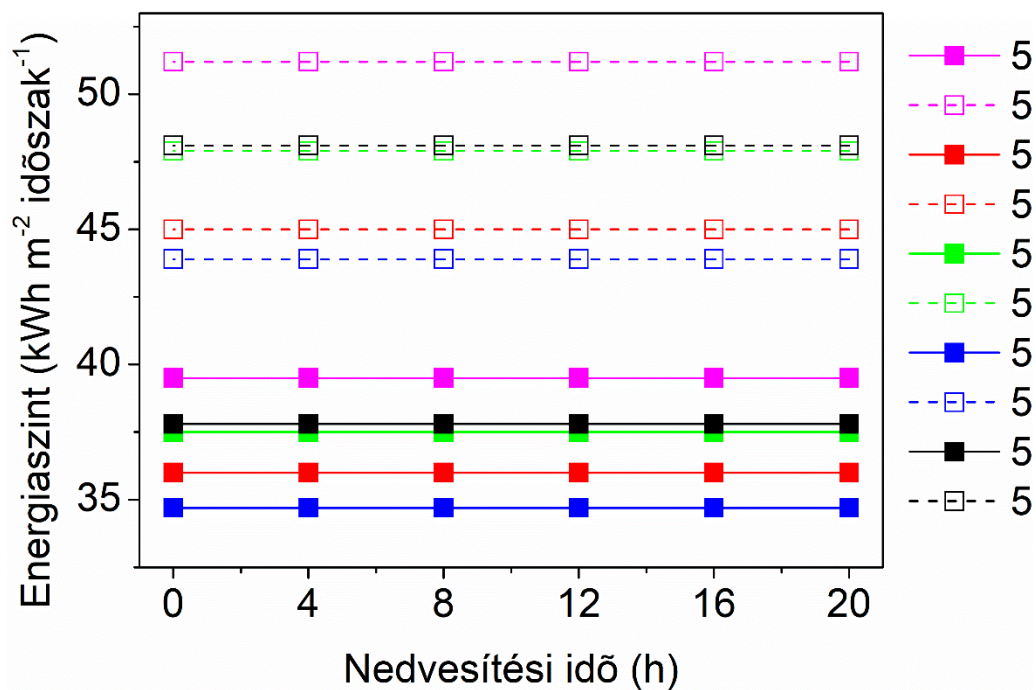
Három csoportba soroltam a szerkezeteket. A csoportosítás szempontja a nedvesítési időre való érzékenység volt. A csoportosítást azért tudtam végrehajtani, mert bizonyos függvények azonos trendet követtek. A külső paraméterek miatt viszont kíváncsi voltam, hogy mekkora különbségek vannak a változásokban. A 25-40-es diagramokon egyenként látható, hogy adott szerkezeteknél milyen mértékben változik a transzmissziós energiavesztés és a fűtési energiaigény az öt vizsgált országban a 16 szerkezetnél. A diagramon a színek az országokat jelölik: a lila Ausztriát; a piros Horvátországot, a zöld Magyarországot, a kék Romániát, a fekete Szlovákiát, a transzmissziós veszteségeket folytonos vonallal és fűtési energiaigényeket szaggatott vonal jelöltem.

4.4.1. Első csoport

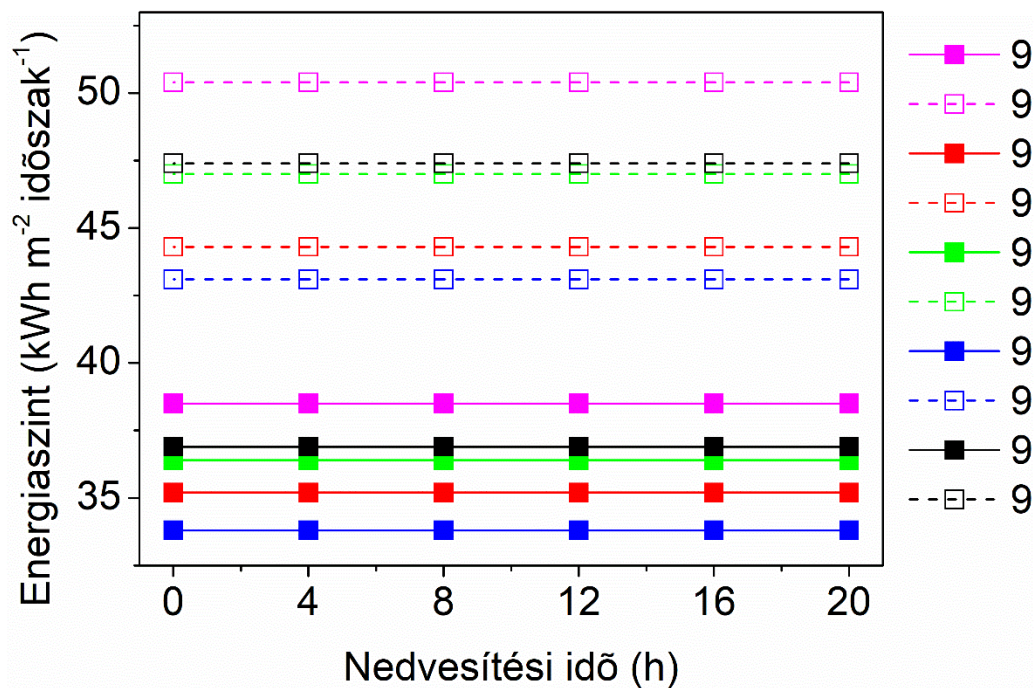
Az első csoporthoz tartozó függvénynél a nedvesítési idő mértékében nem történik jelentős változás. A 4, 5, 9, és 10. szerkezeteknél jelentős különbség nem tapasztalható az energia szintekben. A minimális különbségek abból adódnak, hogy a szigetelések vastagságát nem lehet milliméter pontosan megválasztani, gazdaságilag nem indokolt ilyen szintű pontosság a szigetelés vastagságoknál. Az említett négy szerkezet közül a 9-es jelű, sárga XPS-sel hőszigetelt könnyűbeton falazat mutatta a legkisebb energiaszinteket. Ez azt jelenti, hogy számításaim alapján a vizsgált falszerkezetek közül a 9-es jelű szerkezet esetén érhető el a legalacsonyabb transzmissziós veszteség és fűtési energiaigény. Ezen értékek közel állandók maradtak a nedvesítési idő hatására. A legnagyobb értékeket a parafával hőszigetelt falszerkezetek adták (5-ös és 10-es szerkezet). A 9-es szerkezethez képest azonban az 5-ös és a 10-es szerkezet kezdetben csupán $0,94 \text{ kWh m}^{-2} \text{ időszak}^{-1}$ érték különbséget mutatott. Megfigyelhető, hogy a csoportban csak a 10. szerkezet mutatott változást, de ez az eltérés is elhanyagolhatónak vehető.



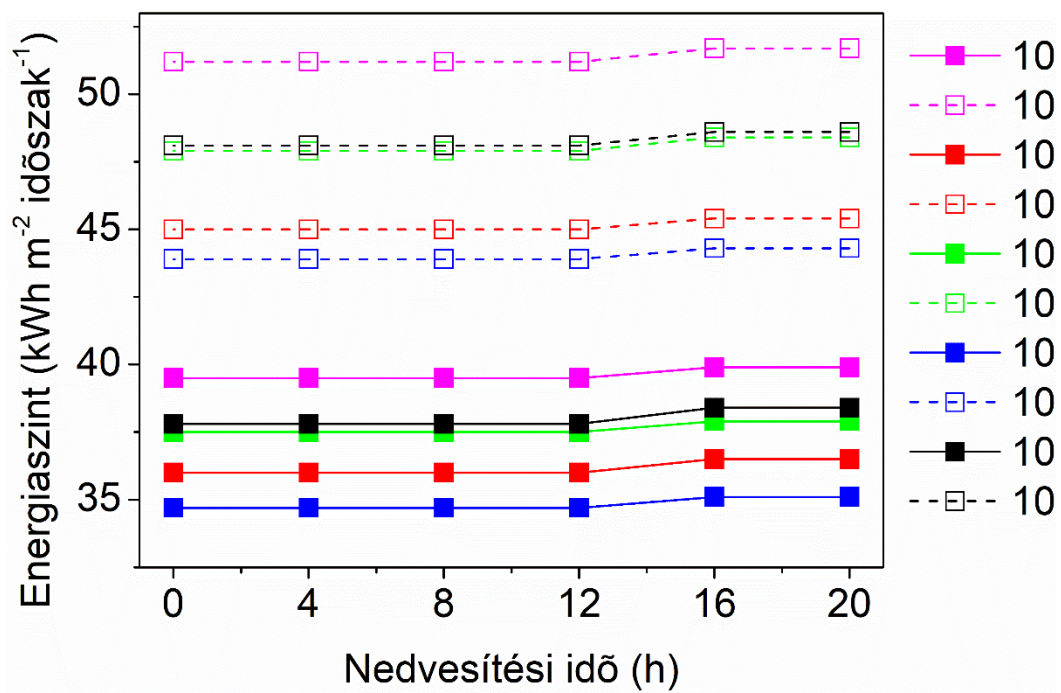
28. diagram 4-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek



29. diagram 5-ös szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek



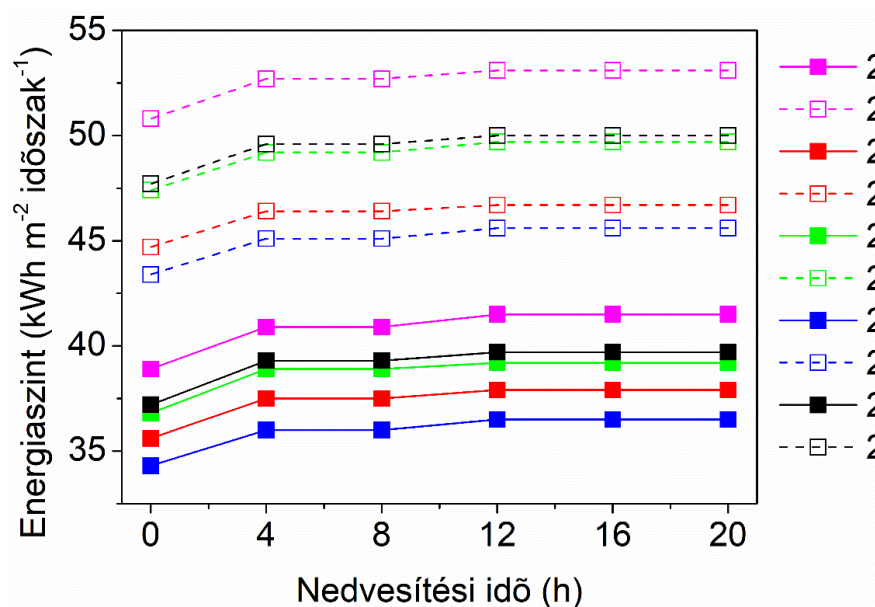
30. diagram 9-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek



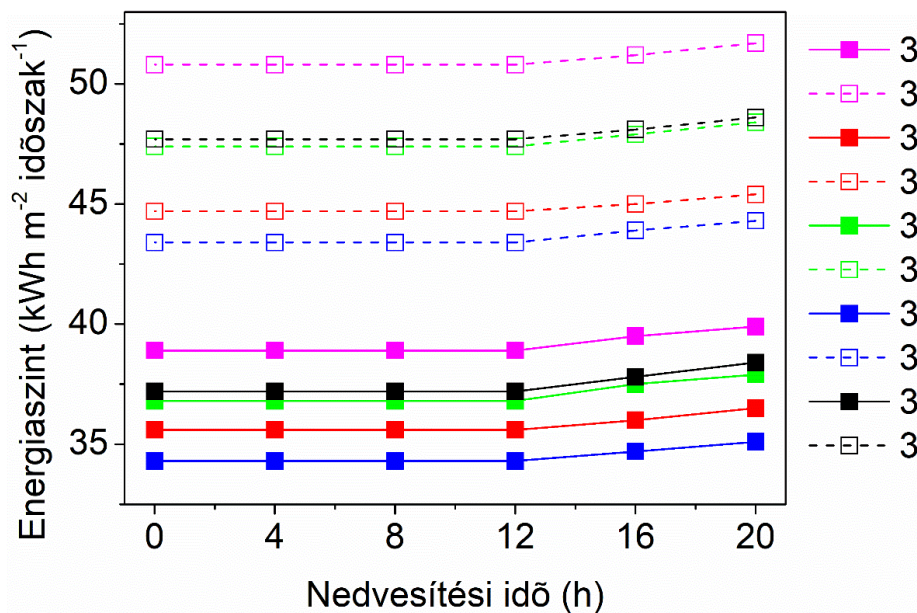
31. diagram 10-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek

4.4.2. Második csoport

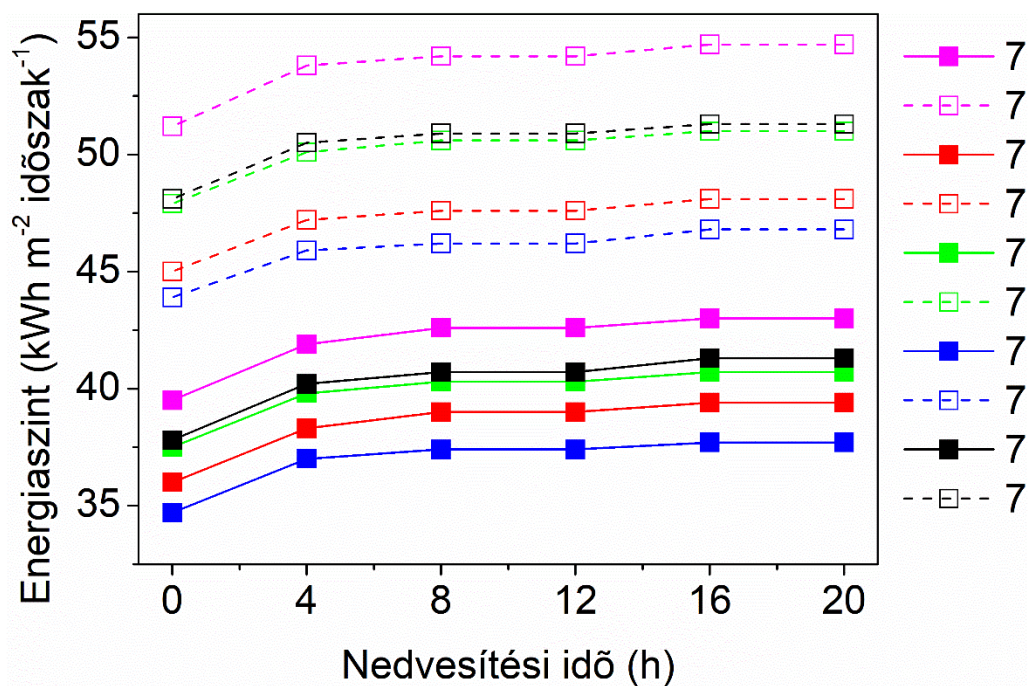
A második csoportba tartozó szerkezeteknél lapos, kis meredekségű tendencia állapítható meg a diagramokról. Ezeknél a szerkezeteknél (2, 3, 7, 8, 13, 14, 15) a négyzetméterre vetített változás kevesebb, mint $10 \text{ kWh m}^{-2} \text{ időszak}^{-1}$ volt.



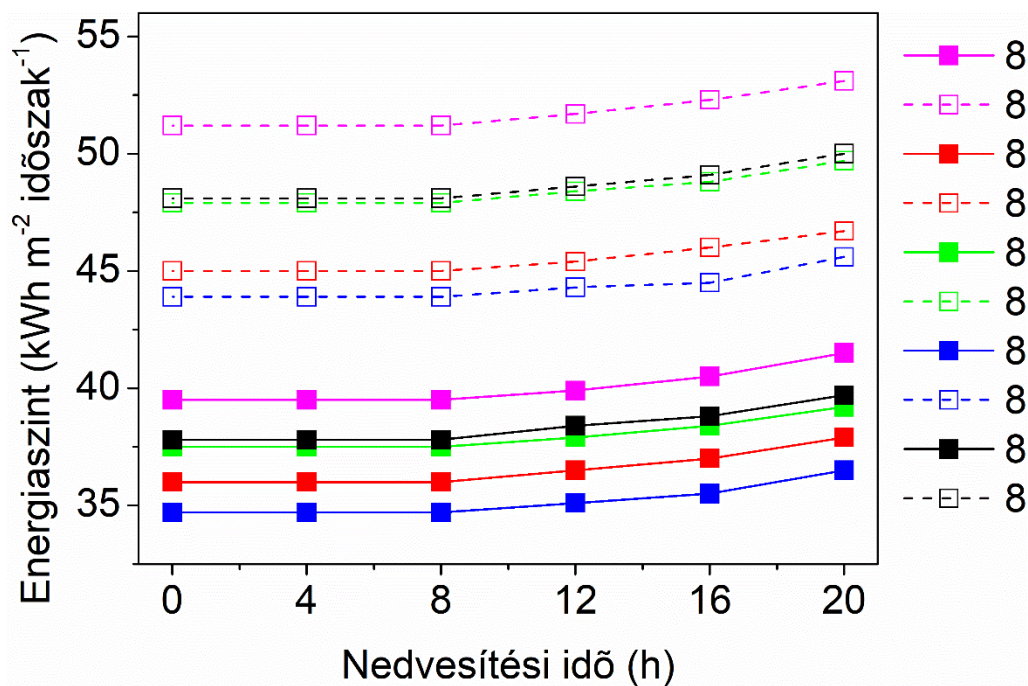
32. diagram 2-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek



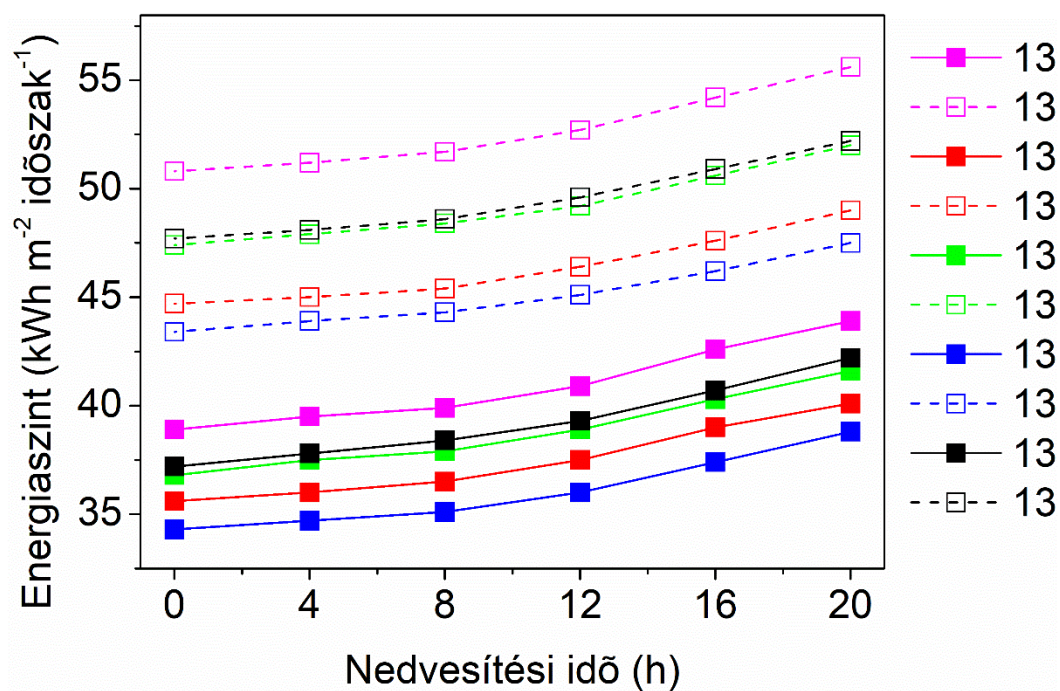
33. diagram 3-as szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek



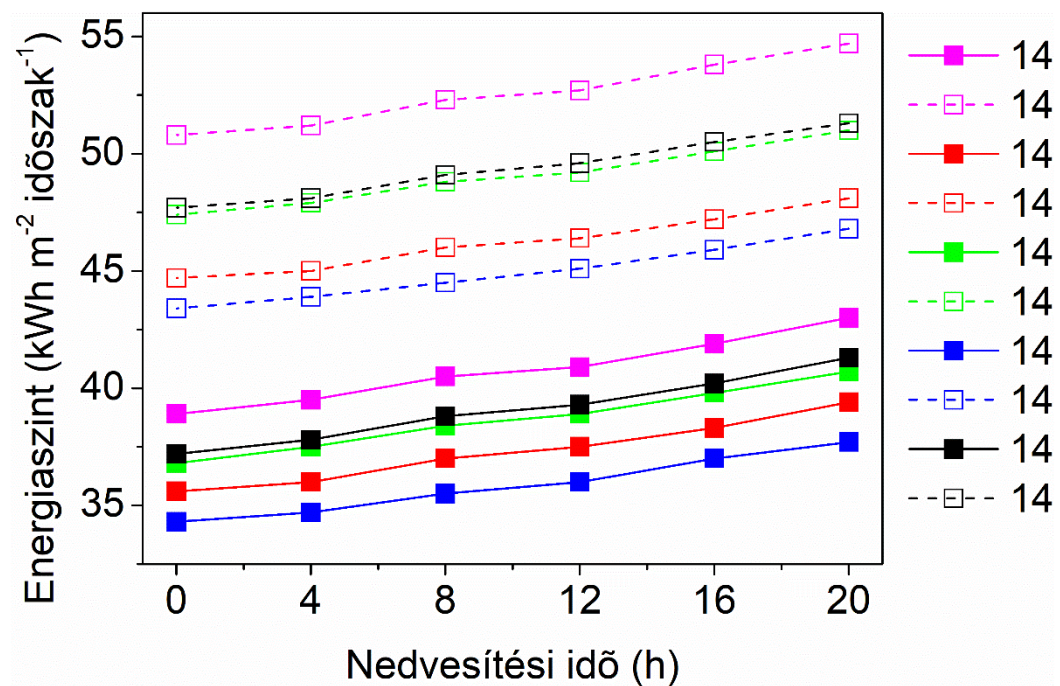
34. diagram 7-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek



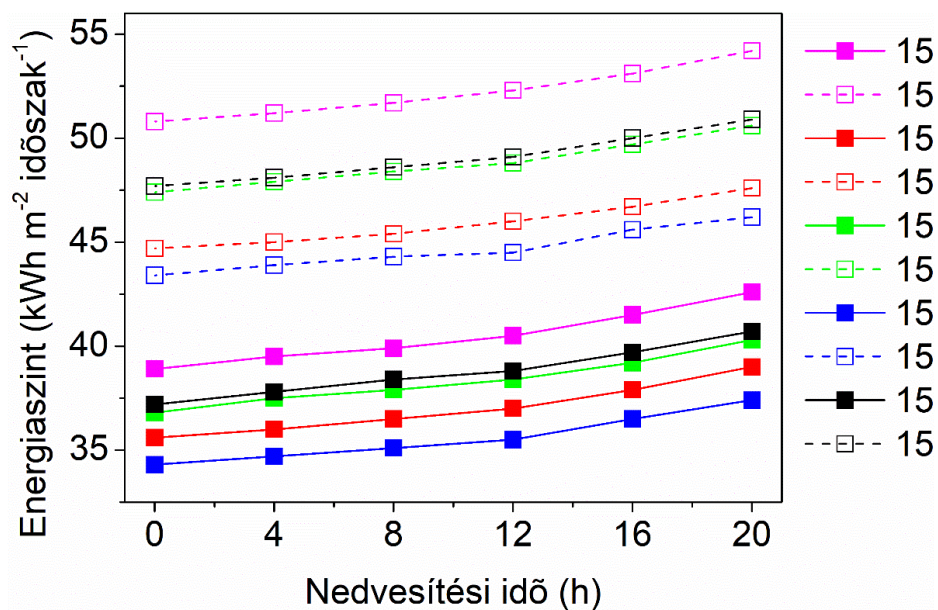
35. diagram 8-as szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek



36. diagram 13-as szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek



37. diagram 14-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek



38. diagram 15-ös szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek

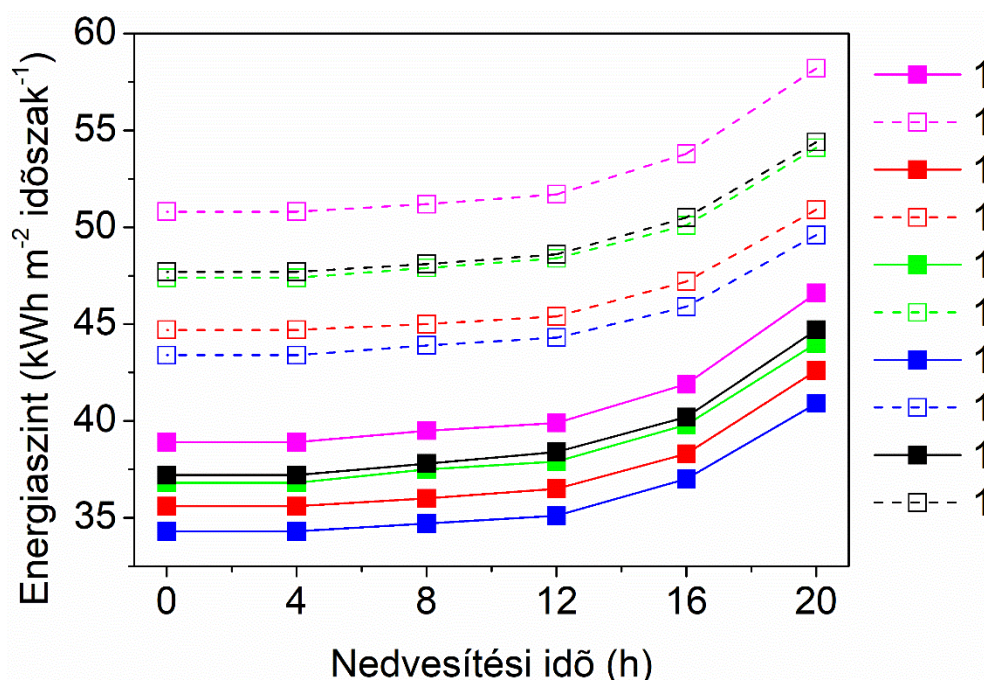
A 2. és 7. szerkezeteknél látható a nedvesítés negyedik órájában egy ugrás. Ez a növekedés az anyag nyílt pórusos szerkezetéből, illetve a grafit jó kezdeti nedvességfelvevő tulajdonságából adódott. Itt a vizsgált anyag a kezdeti időszakban nedvességgel telítődött, majd a további nedvesítési idő teltével csak minimális mértékben vett fel nedvességet, ami az energiaszintek stagnálását eredményezte. Látható a 2. és 7. szerkezet diagramján, hogy a grafitos EPS ezen nedvességfelvevő jellege meghatározza a szerkezet karakterisztikáját.

Az EPS 30 lassú, egyenletes nedvességfelvételéből adódóan a falszerkezet transzmissziós veszteségei is mérsékelt ütemben növekedtek a nedvesítési idő függvényében. Ezek a növekedési tendenciák a kék színnel jelölt 3., 8. és 13. szerkezet görbéin láthatók. A 13. szerkezet változása volt a második csoportban a legintenzívebb. Ez a pórusbeton tartószerkezet nagy nedvességfelvevő kapacitásának köszönhető.

A 14. és 15. szerkezeten látható a pórusbeton tartószerkezet által ténylegesen létrehozott energiaszint változása. Ez a két görbéről azért állapítható meg, mivel a hőszigetelő anyagok a nedvesítési idő hatására nem változtatták meg a paramétereiket. Emiatt a transzmissziós veszteségeiket és fűtési energiaigényüket tekintve az értékeknek közel azonosaknak kell lenniük. A szerkezetekhez tartozó eredmények közötti különbségek a két fal minimális hőátbocsátási tényezőbeli különbségeiből adódott. (Parafa hőszigeteléssel pontosabban megközelíthető a TNM rendelet (Rendelet-hivatkozás 1, 2006) követelmény értéke.)

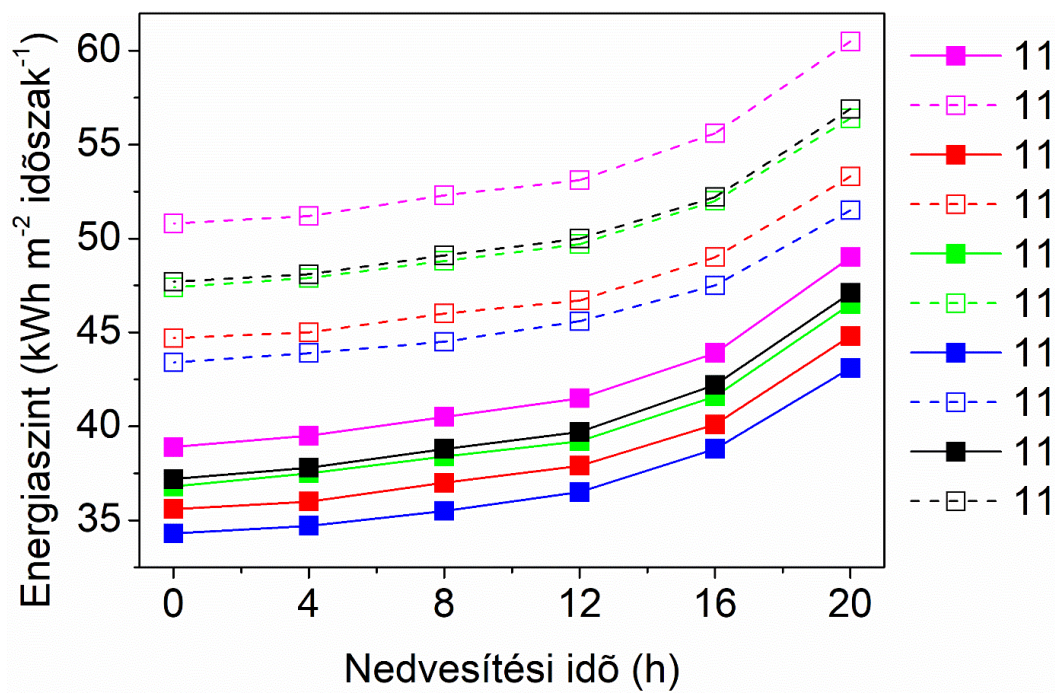
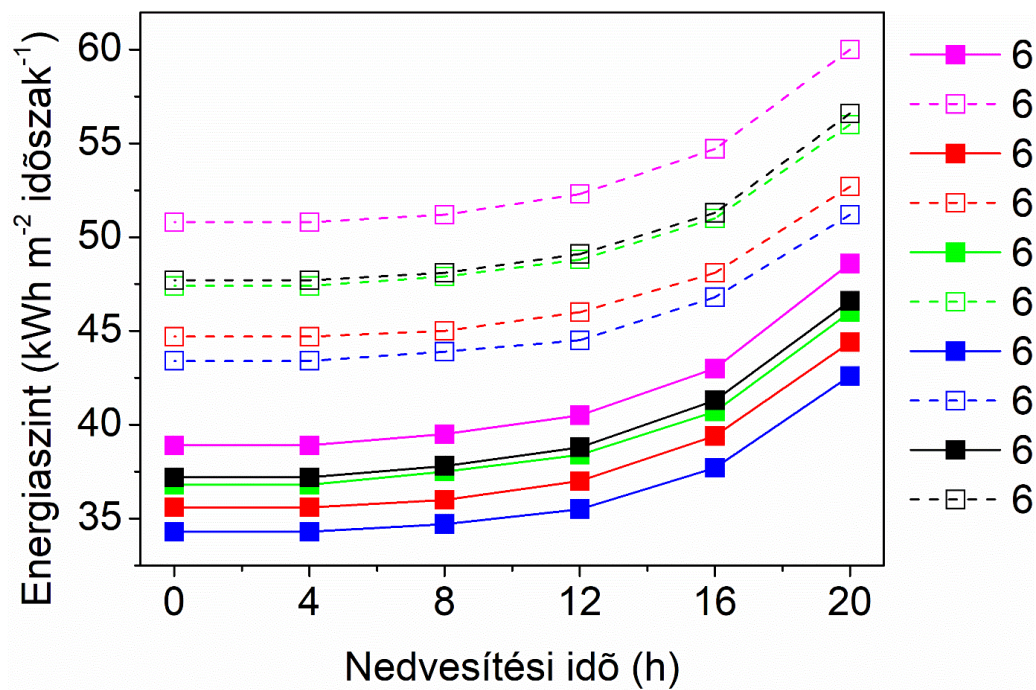
4.4.3. Harmadik csoport

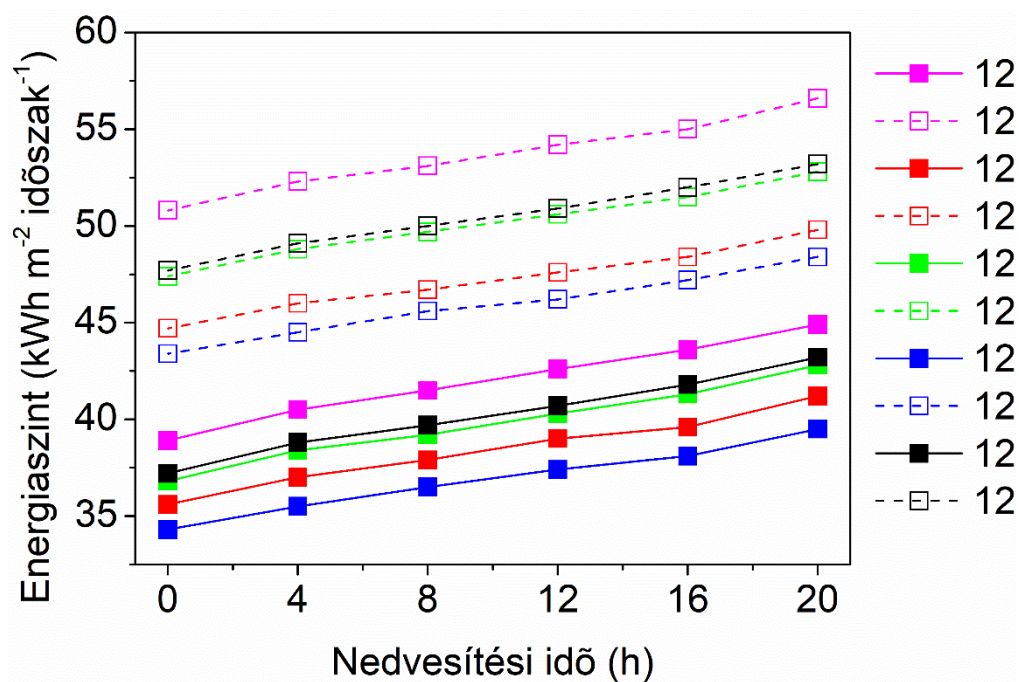
A harmadik csoportba azon szerkezeteket soroltam, melyek négyzetméterre vetített időszakos transzmissziós vesztesége és fűtési energiaigénye nagyobb, mint $10 \text{ kWh m}^{-2} \text{ időszak}^{-1}$ volt.



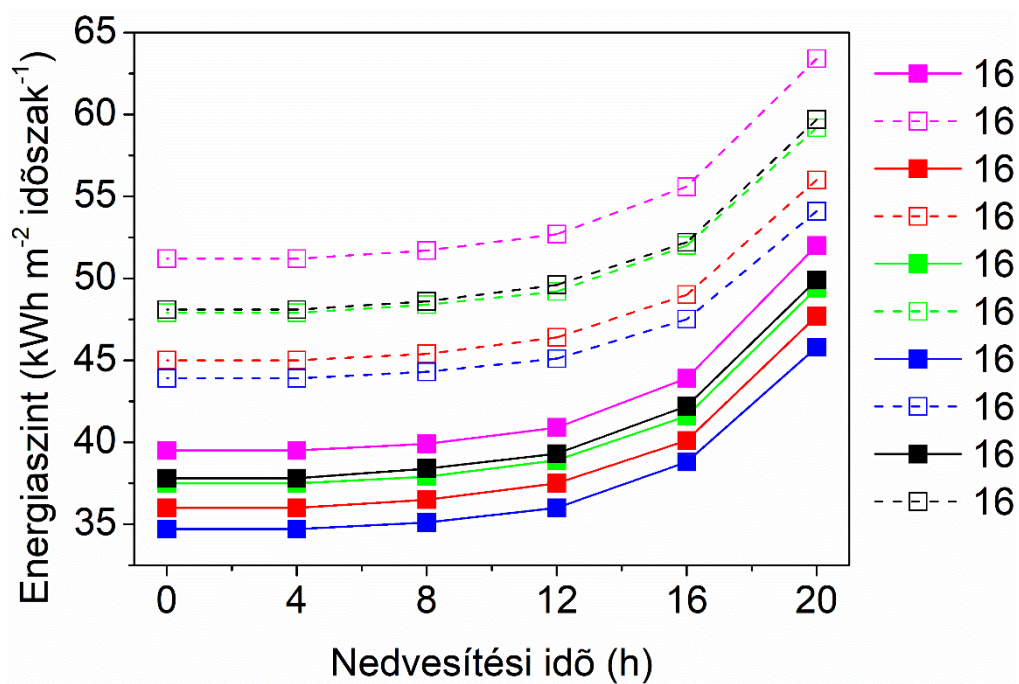
39. diagram 1-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek

Ezek az 1, 6, 11, 12 és 16-os szerkezetek voltak. A 12-es szerkezet kivételével mindegyik kombináció közetgyapot hőszigetelést tartalmazott. Ahogyan azt már korábban említettem, a szálas szerkezet miatt a közetgyapotba könnyen behatol a nedvesség, ennek köszönhetően jelentősen növekszik az anyag hővezetési tényezője is. Az 1, 6, 11 és 16. szerkezetek diagramján a kezdeti lineáris szakasz után a görbék exponenciális jellege egyértelműen megfigyelhető. A fűtési primer energiaigény és a transzmissziós görbék összehasonlításából látható, hogy a további járulékos veszteségekből (a légcseréből, valamint a födém és a padló hőveszteségéből) adódóan a fűtési energiaigény exponenciális jellege mérséklődik. Ez azt jelenti, hogy a transzmissziós veszteségek jelen esetben 50 %-ban játszanak szerepet a fűtési energiaigény meghatározásában. Így, ha egy épület primer energiaigényét akarjuk csökkenteni, láthatjuk, hogy elsősorban a határolószerkezetet kell jól kiválasztani, de meg kell jegyeznem, hogy ez nem elégséges. A még pontosabb tervezéshez a légtömörséget, a fűtési- és hűtési rendszert is figyelembe kell venni.





42. diagram 12-es szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek



43. diagram 16-os szerkezet átmeneti időszakra vonatkozó energiaszintek

A legnagyobb változás az energiaszintekben a 16-os szerkezetnél figyelhető meg, ami abból adódik, hogy az alkalmazott hőszigetelés és a tartószerkezet a nedvesség hatására exponenciálisan változtatja a hővezetési képességet.

A harmadik csoportban lévő 12. szerkezet görbe alakja eltért a többi szerkezettől, ez a szerkezet a grafitos EPS és pórusbeton (piros színnel jelölt) kombináció volt. Ennek a szerkezetnek a markáns hőveszteség növekedése a pórusbeton pórusos és a grafitos EPS nyílcellás szerkezetéből adódik. Egymás nedvességfelvevő képességeit erősítve jött létre a hőveszteség növekedés. (Szodrai & Lakatos, 2015b; Szodrai & Lakatos, 2016)

4.4.4. Éves primer energiaigény

Az összehasonlítás nem tér ki a 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet alapján történő épületenergetikai besorolásra. Mivel a CASAnova 3.3 szimulációs programmal csak a fűtési rendszer primer energiaigény számítását végeztem el, a számítás nem tartalmazza a további épületgépészeti rendszerek primer energiaigény számításait. Továbbá a Németországban fejlesztett program a német primer energiaátalakítási tényezőket tartalmazza, emiatt például a magyarországi 1-es, földgázra vonatkozó primer energiaátalakítás tényező helyett a program 1,1-es tényezővel számol, ami 10 %-os hibát jelenthet. Nem számolva azzal, hogy egy adott falszerkezetű épület primer energiaigénye már attól is meg tud változni, hogy képzeletben egy másik átlaghőmérsékletű régióba helyezzük át. (Szodrai & Lakatos, 2015b; Szodrai & Lakatos, 2016)

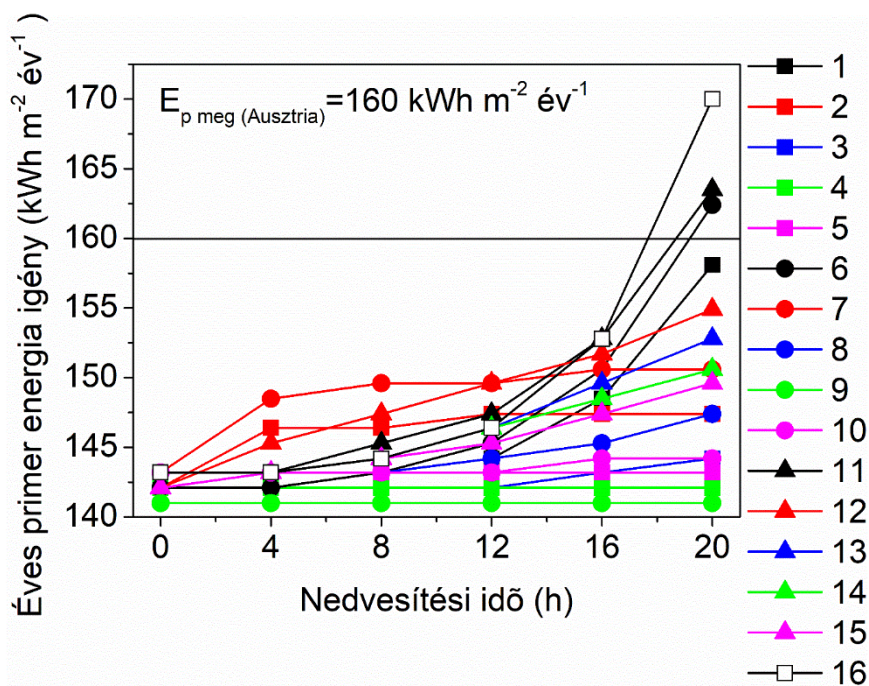
17. táblázat A vizsgált országok primerenergia követelményei közel nulla energiaigényű lakóépületekre (Maldonado, 2016)

	Családi házak E_p [kWh m ⁻² év ⁻¹]	Társasházak E_p [kWh m ⁻² év ⁻¹]
Ausztria	160	
Horvátország kontinentális klímán	40	80
Horvátország partmenti klímán	30	50
Magyarország	100	
Románia	217	135
Szlovákia	54	32

A vizsgált öt országban a közel nulla energiaigényű lakóépületekre a 17. táblázatban láthatjuk a megengedett értékeket. Magyarországon és Ausztriában a lakóépületekre egyetlen értékkel határozzák meg a maximális primer energiafelhasználást, míg Romániában, Szlovákiában és Horvátországban külön-külön értéket adnak meg családi- és társasházra. Horvátország, mivel

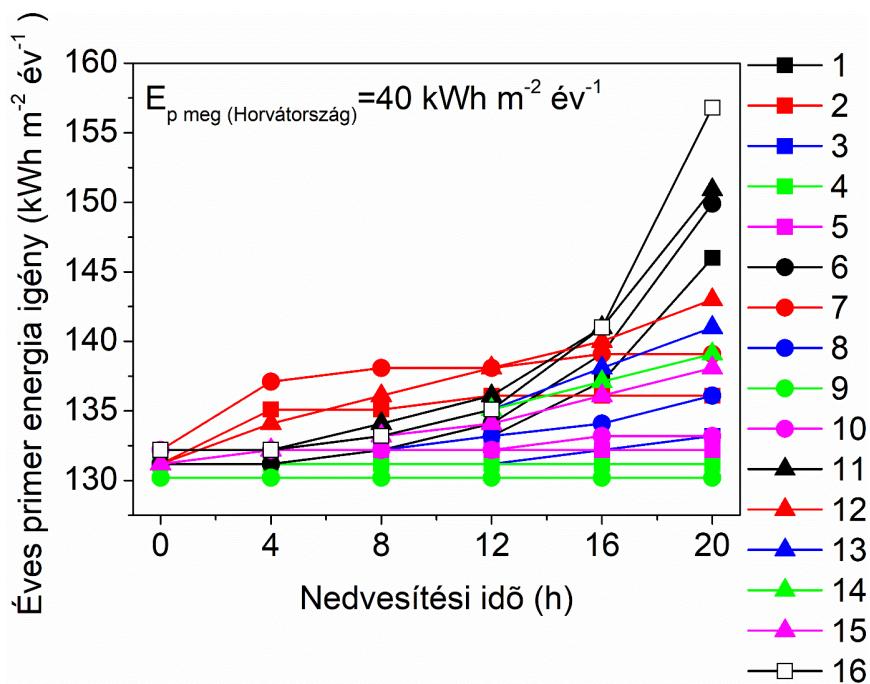
két klímaregióval rendelkezik, a közel nulla energiaigényhez külön megadja parti- és kontinentális klímára is a követelmény értékeit. (Maldonado, 2016)

Az egyes régiókban alkalmazott 16 szerkezet nedvesítése által befolyásolt primer energiaigény változás érdekében létrehoztam a 41-45. diagramokat, amiken jelöltem az egyes régiókhoz tartozó megengedett primer energiaigényeket.

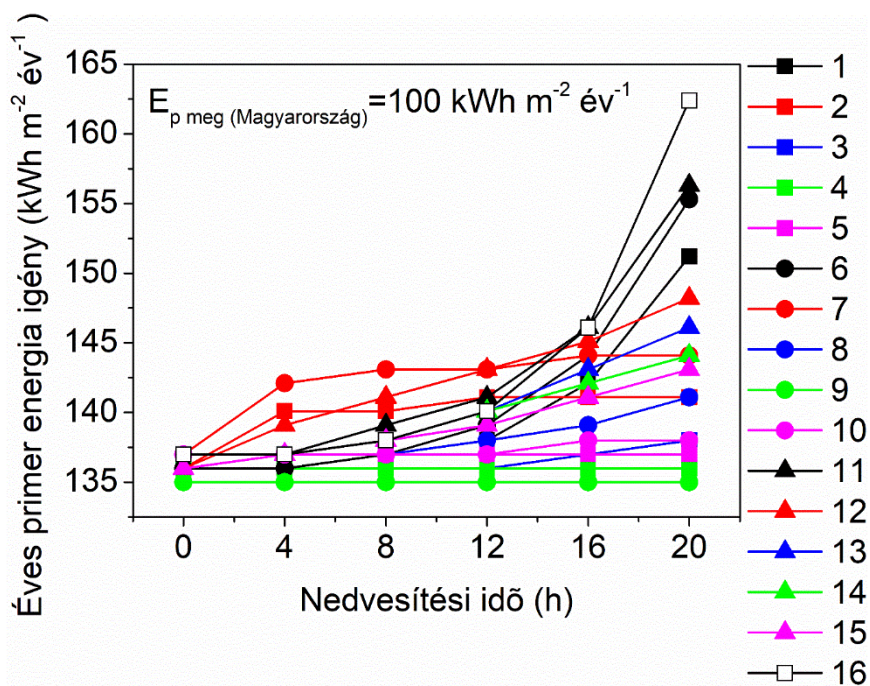


44. diagram Ausztriai éves primer energiaigény változás

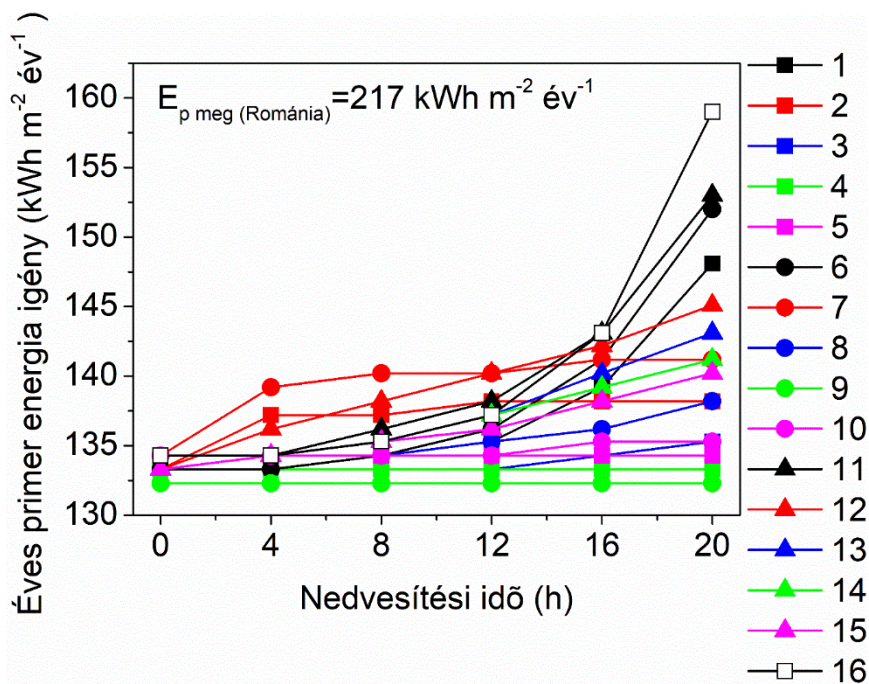
44—48. diagramokon feltüntetve a 17. táblázat értékeit, megállapítható, hogy a Németországban fejlesztett szoftver csak tájékoztató jellegű adatokat ad. A német paraméterek alapján csak a romániai és ausztriai épületek felelnek meg a saját országuk előírásainak, mivel a romániai követelmény olyan magas családi házakra, hogy a legextrémebb 20 órás nedvesítési idővel rendelkező szerkezeteknél is megfelel a primerenergia követelménynek úgy, hogy a szoftver a német primer energiaátalakító tényezőket alkalmazta. Az ausztriai épületeknél a követelményérték a 44. diagram alapján a megfelelés határán volt, így az ausztriai régióra szerkezetenként a nedvesítési idő függvényében a 44. diagramon ábrázoltam a primer energia változást. Látható, hogy itt a fekete színnel jelzett tehát közetgyapot szigeteléssel rendelkező épületek haladták meg a primerenergia követelményt a 18 órás nedvesítés után.



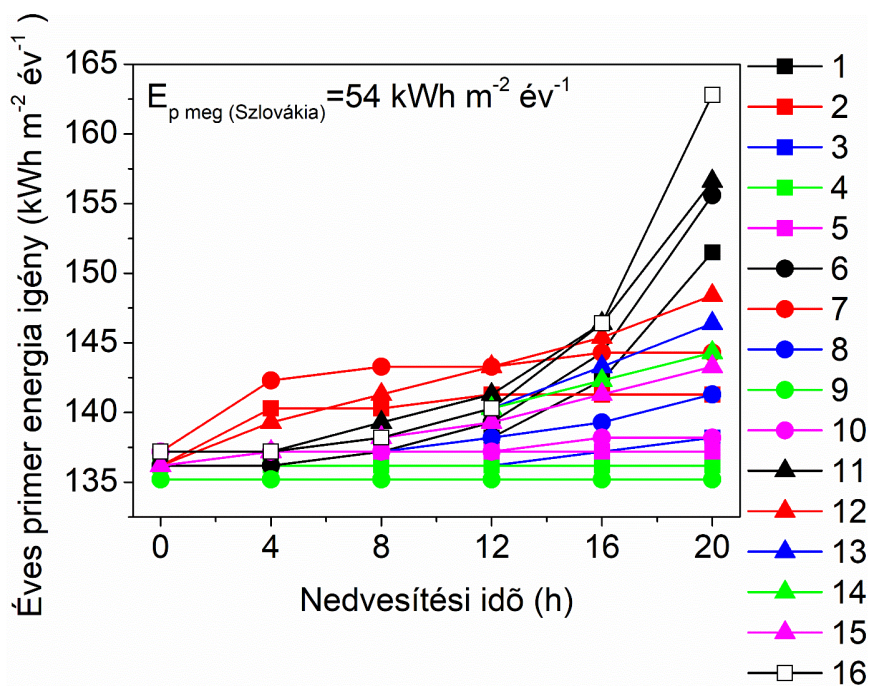
45. diagram Horvátországi éves primer energiaigény változás



46. diagram Magyarországi éves primer energiaigény változás



47. diagram Romániai éves primer energiaigény változás



48. diagram Szlovákiai éves primer energiaigény változás

Látható a diagramokon is, hogy a primer energiaigény akár $10 \text{ kWh m}^{-2} \text{ év}^{-1}$ -vel is változhat a kedvezőtlenebb klíma miatt, ami az adott rendeleti érték túllépését is jelentheti. (Vizsgálatomban ilyen ausztriai példánál fordult elő, de a gyakorlatban más épületgeometriánál előfordulhat.) Leolvashatjuk, hogy az ausztriai övezetben lépnek fel a legmagasabb energiaigények, melyek arra vezetnek, hogy a vizsgált városokhoz tartozó zónák közül az

ausztriai klíma a leghidegebb. A magyarországi és szlovákiai régióra kapott eredmények nagyon közeli értékeket vettek fel. Ebből látható, hogy a két régiót közel azonosan kezeli a szimulációs szoftver. A többi régió primer energiaigényeinél jobban látható különbségeket fedezhetünk fel. A vizsgált régiók közül Zágráb klímája bizonyult a legenyhébbnek, itt tapasztaltam a legkevesebb energiaveszteséget. Meg kell jegyezni, hogy az előző, 4.4.1, 4.4.2 és 4.4.3-as fejezetekben található diagramok transzmissziós veszteség értékei nem ezt mutatják! Azokban a diagramokban a romániai értékek az alacsonyabbak, tehát a Románia éghajlata átmeneti időszakban jóval enyhébb, mint a Horvátorszáé. (Szodrai & Lakatos, 2015b; Szodrai & Lakatos, 2016)

A 4.4. fejezetben elért eredményeket a következő publikációkban közöltem:

Szodrai Ferenc és Lakatos Ákos. „Különböző éghajlati viszonyoknak kitett épületek fűtési energiafelhasználásának csökkentése hőszigeteléssel.” *Energiagazdálkodás* 57, 3-4. szám (2016): 26-29.

Szodrai Ferenc és Lakatos Ákos. „Simulations of the Changes of the Heating Energy Demand and Transmission Losses of Buildings in Central European Climate: Combination of Experiments and Simulations.” *International Review of Applied Sciences and Engineering* 6, 2. szám (2015): 129-139.

4.5. A levegőmozgás hatása a falszerkezeten keresztüli hőáramra

4.5.1. A hőáram mérés eredménye

A 3.8. fejezetben előzetesen leírtam a hőáram (Q) meghatározására vonatkozó módszereket. A következő lépésben bemutatom a hőáram mérésből, a hasonlósági elméletből és a szabvány szerinti számításból a felületi hőátbocsátási tényezőre (h) kapott eredményeket. Az esetek nevének hosszúsága miatt a 18-as táblázatban látható rövidítéseket alkalmaztam.

18. táblázat Mérési elrendezések rövidítései

Név	Jel
Szigetelt fal szabadáramlásnál	SZ
Balról megfűjt szigetelt fal	BSZ
Jobbról megfűjt szigetelt fal	JSZ
Alulról megfűjt szigetelt fal	ASZ
Szigeteletlen fal szabadáramlásnál	N
Balról megfűjt szigeteletlen fal	BN
Jobbról megfűjt szigeteletlen fal	JN
Alulról megfűjt szigeteletlen fal	AN

19. táblázat Mért értékek

Jel	φ [W m ⁻²]	Fal			Levegő		
		ΔT_w [°C]	$T_{meleg\ w}$ [°C]	$T_{hideg\ w}$ [°C]	ΔT_a [°C]	$T_{meleg\ a}$ [°C]	$T_{hideg\ a}$ [°C]
SZ	27,50	32,98	21,61	-11,37	41,44	24,43	-17,01
BSZ	30,54	34,57	20,82	-13,75	40,89	24,52	-16,37
JSZ	29,44	34,60	20,95	-13,65	40,64	24,51	-16,13
ASZ	30,99	34,65	20,90	-13,75	41,03	24,56	-16,47
Átlag	30,32	34,60	20,89	-13,72	40,85	24,53	-16,32
N	51,73	27,13	19,13	-8,00	39,93	23,92	-16,00
BN	58,39	30,84	18,61	-12,23	41,41	24,94	-16,47
JN	57,84	30,24	18,69	-11,54	40,59	24,62	-15,97
AN	58,61	31,00	18,39	-12,62	41,47	24,91	-16,56
Átlag	58,28	30,69	18,56	-12,13	41,16	24,82	-16,33

A mérések során a hőfluxust (ϕ), valamint a levegő és a fal felületi hőmérsékleteit (T) rögzítettem. Továbbá kiszámoltam a hideg és a meleg oldali hőmérséklet különbségeket. A 19. táblázatban ezek az értékek láthatók a levegő különböző falmenti áramlásánál, hőszigetelt és szigetetlen állapotban.

A 2., 3., 4. és a 7., 8., 9. sorokban egy érdekességet vettem észre. Azokban az esetekben, ahol kényszeráramot alkalmaztam, nem látható releváns különbség sem a hőfluxusban (ϕ), sem a hőmérsékletekben. Így elmondható, hogy a (1 m s^{-1} -os) légmozgás irányának nincs hatása a vizsgált felületre. A 20. táblázatban látható, hogy a számolt hőellenállás felére csökkent, mikor az 1 cm vastag aerogél hőszigetelés jelen volt a falszerkezeten.

A 20-as táblázatban láthatjuk a (22)-es és (25)-ös egyenletekből számolt értékeket. Itt meg kell jegyeznem, hogy a kényszeráram esetében mind szigetetlen, mind hőszigetelt falnál egy együttes átlagként is tudjuk kezelni az értékeket.

20. táblázat Számolt hőellenállások

Jel	Hővezetési ellenállás [$\text{m}^2 \text{ K W}^{-1}$]				Hőátadási tényező [$\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$]	
	Fal (R_w)	Levegő (R_a)	Teljes felületi (R_{sT})	Külső felületi (R_{es})	Belső (h_{is})	Külső (h_{es})
SZ	1,20	1,51	0,31	0,15	6,5	6,5
BSZ	1,13	1,34	0,21	0,05	6,5	18,77
JSZ	1,18	1,38	0,21	0,05	6,5	19,46
ASZ	1,12	1,32	0,21	0,05	6,5	19,13
Átlag	1,14	1,35	0,21	0,05	6,5	19,12
N	0,52	0,77	0,25	0,12	8,08	8,08
BN	0,53	0,71	0,18	0,06	8,08	17,44
JN	0,52	0,7	0,18	0,06	8,08	18,09
AN	0,53	0,71	0,18	0,05	8,08	18,23
Átlag	0,53	0,71	0,18	0,06	8,08	17,92

Ha kezdetben nincs légmozgás, a (25)-ös egyenletet felhasználva a h_{is} -t állandónak tekintjük (szigetelt esetben $6,5$ és szigetetlen esetben $8,08 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$), a h_{es} érték számolható lesz, ami tartalmazni fogja a hideg oldali h_c és h_r tényezőket. Ennek köszönhetően a külső hőátadási

tényező 19 és 18-as értéket vesz föl szigetelt és szigeteletlen esetben. (Szodrai & Lakatos, 2017c)

4.5.2. A felületi hőátadási tényező hasonlósági elmélet alapján elvégzett számításainak eredményei

A (33)-tól (37)-ig bemutatott egyenleteket felhasználva kiszámolható a hőátadás (h) konvektív része (h_{c1}) szabad- és kényszerített áramlásra. A vizsgálataimban csak a hidegoldalt elemzem, mivel a meleg oldalon nem volt kényszerített légmozgás.

21. táblázat Adatok a hasonlósági elv általi számításhoz

Jel	h_{c1} [W m ⁻² K ⁻¹]	Nu [-]	ΔT [K]	$T_{\text{átlag}}$ [K]	Pr [-]	ν [10 ⁻⁵ m ² s ⁻¹]	λ [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Re [-]	Gr [-]
SZ	3,1	160	5,6	259	0,714	1,26	0,0233	-	1,66·10 ⁹
BSZ	3,54	183,1	2,6	258,1	0,714	1,26	0,0232	95147	-
JSZ	3,54	183,1	2,5	258,3	0,714	1,26	0,0232	95193	-
ASZ	3,54	183,1	2,7	258	0,714	1,26	0,0232	95133	-
Átlag	3,54	183,1	2,6	258,1	0,714	1,26	0,0232	95158	-
N	3,52	180	8	261,1	0,713	1,25	0,0234	-	2,37·10 ⁹
BN	3,55	183,2	4,2	258,8	0,714	1,26	0,0233	95339	-
JN	3,56	183,4	4,4	259,4	0,714	1,26	0,0233	95501	-
AN	3,55	183,2	3,9	258,6	0,714	1,26	0,0232	95275	-
Átlag	3,55	183,3	4,2	258,9	0,714	1,26	0,0233	95371	-

Számításaim közben a következő értékeket vettem állandónak: gravitációs gyorsulás 9,81 m s⁻², jellemző geometria méret 1,2 m, C konstans szabadáramlásnál 0,14, kényszeráramlásnál 0,5 és $n=1/3$.

A 21. táblázatból látható, hogy a hőátadási tényező szabadáramlásban szigetelt fal esetén 3,1 W m⁻² K⁻¹, szigeteletlen fal esetén 3,52 W m⁻² K⁻¹, azonban kényszeráramnál nagyjából változatlan értéken (3,54 - 3,56 W m⁻² K⁻¹) maradt. A hasonlósági elven történő számítás alapján tehát jelentős, kb. 0,5 W m⁻² K⁻¹-nyi eltérés jelezhető előre, ha a fal szigeteletlen. (Szodrai & Lakatos, 2017c)

4.5.3. Hőátadási tényező MSZ EN ISO 6946:2008 szabvány szerinti számítása

A 3.8.4.1. fejezetben említett MSZ EN ISO 6946:2008 (Szabványszám 13, 2008) szabvány szerinti módszert és a (32)-(37) egyenleteket felhasználva kiszámoltam a h_{r0} , h_r , h_{c2} és h_{c3} tényezőket. A kiszámolt értékeket a 22. táblázatban rögzítettem. A táblázatban jelöltem a tényező kiszámítására vonatkozó egyenletek számát is. (Szodrai & Lakatos, 2017c)

22. táblázat MSZ EN ISO 6946:2008-általi számítási eredmények

Egyenlet	(34)	(35)		(37)	(32)
Jel	h_r [W m ⁻² K ⁻¹]	h_{r0} [W m ⁻² K ⁻¹]	T_m [K]	h_{c2} [W m ⁻² K ⁻¹]	h_{c3} [W m ⁻² K ⁻¹]
SZ	3,54	3,94	259	2,96	4
BSZ	3,51	3,9	258,1	15,27	8
JSZ	3,52	3,91	258,3	15,94	8
ASZ	3,51	3,9	258	15,62	8
Átlag	3,51	3,9	258,1	15,61	8
N	3,64	4,04	261,1	4,45	4
BN	3,54	3,93	258,8	13,91	8
JN	3,56	3,96	259,4	14,53	8
AN	3,53	3,92	258,6	14,7	8
Átlag	3,54	3,94	258,9	14,38	8

A 4.5. fejezetben elért eredményeket a következő publikációban közöltem:

Szodrai Ferenc és Lakatos Ákos. „Effect of the air motion on the heat transport behavior of wall structures.” International Review of Applied Sciences and Engineering8, 1 (2017):67-73

5. Összefoglalás

A nedvesség hosszú időn át, többnyire az esős napokon és az utána következő időszakokban fejti ki a hatását, amit egy épületnél a fajlagos hőveszteség-tényezőben, a hőtároló képességben vagy akár az éves energiafelhasználásban lehet kimutatni. Az épületre a szél is hatással van, az év során folyamatosan hűtő-fűtő hatást fejt ki rá. Dolgozatomban a felsorolt jelenségek természetét és különböző hatásait vizsgáltam meg.

Az építőanyagok vizsgálata több okból is fontos. Egyrészt a régebbi, akár 20-30 éves irodalmakban szereplő adatok elavultnak tekinthetők, másrészt az MSZ-140-2 (Szabványszám 1, 1991) szabványt, melyet épületek hőtechnikai méretezésénél használtak tervezők, és összefoglalta az összes (akkori) hőszigetelő és építőanyag hőtechnikai és épületfizikai paramétereit, 2012-ben visszavonták. A technológiai fejlődésnek köszönhetően az anyagok gyártástechnológiája kiszélesedett, illetve új anyagok kerültek piacra.

Feladatomban volt a Debreceni Egyetem Műszaki Karának Épületgépészeti és Létesítménymérnöki tanszéken végzett méréseket, kutatásokat tovább fejleszem, kiterjesztem új anyagokra és a mérési eredményeimet számítások és számítógépes szimulációk bemeneti paramétereként használjam fel.

A vizsgálataim fő célkitűzései:

- különböző, napjainkban alkalmazott és az iparban fontos hőszigetelő- és építőanyagok hőtechnikai vizsgálata: hővezetési tényező mérése teljesen száraz állapotban és nedvesítés után, a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Épületfizikai laboratóriumában. A mérések végrehajtása után a kapott eredményeket a hazai és nemzetközi szakirodalmi értékekkel összehasonlítani.
- a hazai és nemzetközi szakirodalomban fellelhető és rendkívül ellentmondásos, kettő az anyagra jellemző és a nedvességfelvételhez kapcsolódó tényezőt megvizsgálni és értelmezni a telítődés előtti szakaszra: a vízfelvételi együtthatót (A_w), és a hővezetési tényező nedvességre való érzékenységet (Z).
- a vakolat nedvességfelvevő hatását megvizsgálni.
- ezt követően a vizsgált anyagokból képzeletbeli szerkezetek létrehozása, és azok egyedi hőtechnikai tulajdonságainak vizsgálata (pl.: a hőkapacitás változása). A megalkotott szerkezetekből különféle méretű (geometriájú) hipotetikus épületek kialakítása, és elemzése aszerint, hogy miként hat az épület fajlagos hőveszteség-tényezőjére a nedvesítési idő.

- a vizsgált épületek egyikének energetikai paramétereinek változását öt különféle klímaregióban (Bécs, Budapest, Bukarest, Pozsony, Zágráb) épületenergetikai szimulációk segítségével meghatározni.
- a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Épületfizikai laboratóriumában megvizsgálni több irányú légáramnak a falszerkezeten keresztüli hőtranszportot módosító hatását hőszigetelt és hőszigetelés nélküli állapotban. Az eredményeket összehasonlítani a hazai és nemzetközi szakirodalomban található következtetésekkel és a szabványban rögzített számítási módszer által kapott eredménnyel.

Méréseket végeztem a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Épületfizikai laboratóriumában, és megállapítottam, különféle gyakran használt építő- és hőszigetelő anyagnak miként változik a hővezetési tényezője nedvesítési után. Összefüggéseket adtam meg a hővezetési tényezők időbeli változására. Meghatároztam ezen anyagok vízfelvételi együtthatóit és a hővezetési tényezők nedvességre való érzékenységet a telítődés előtti szakaszukra.

A vízfelvételi együttható

A vízfelvételi együttható (A_w)-t tömör anyagokra nem határozható meg, mivel csak azok adszorpció útján vették fel a nedvességet. Így a 6. táblázatban az értékeiket nem tüntettem fel. A vizsgált minták közül a legnagyobb abszorpciós vízfelvételt a pórusbetonra állapítottam meg. A pórusos szerkezetből adódóan jó nedvességfelvevő tulajdonsággal bír, könnyen el tudja raktározni az anyag belsejébe a nedvességet. A hőszigetelések közül a kőzetgyapot rendelkezett a legmagasabb vízfelvételi együtthatóval (A_w), ami szálas szerkezetének köszönhetően.

6. táblázat A minták vízfelvételi együtthatói

	Vízfelvételi együttható (A_w) [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0,5}$]	Vízfelvételi együttható átlagos hibája (ΔA_w) [$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-0,5}$]	Regresszió (R^2) [-]
EPS 30	$1,15 \cdot 10^{-4}$	$1,25 \cdot 10^{-5}$	0,94
Grafitos EPS	$1,31 \cdot 10^{-4}$	$4,73 \cdot 10^{-5}$	0,76
Gipszkarton	$2,68 \cdot 10^{-4}$	$2,21 \cdot 10^{-5}$	0,97
Könnyűbeton	$7,77 \cdot 10^{-4}$	$5,24 \cdot 10^{-5}$	0,98
Kőzetgyapot	$3,03 \cdot 10^{-4}$	$1,38 \cdot 10^{-5}$	0,98
Pórusbeton	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$1,31 \cdot 10^{-4}$	0,99

Vakolat gátló hatása

A vizsgálataim alapján kiderült, hogy az EPS 30, a grafitos EPS és a kőzetgyapot víz abszorpciójára hajlamos, ezért típusonként két-két mintát vakolattal láttam el. A mintáknak egyik oldalát vakolattal kezeltem a többi oldalát pedig hermetikusan lezártam, ebből adódóan csak egyik oldalon lett mérve a nedvességfelvétel. A kezeletlen mintákhoz képest jóval kisebb nedvességtartalmakat kaptam. Ez abból adódik, hogy hat helyett csak egy felületen történik a nedvességfelvétel, illetve a száraz tömegbe a kezelt felületnél a vakolat tömegét is beleszámítottam, így egy homogén és egy heterogén mintához tartozó érték összehasonlításáról beszélek. A vakolat a ráillesztett hőszigetelésnél jóval nagyobb (tájékoztató jellegű) vízfelvételi együtthatóval rendelkezik. Ami arra vezetne egy homogén mintánál, hogy a nedvességtartalom is nagyobb lenne. A vizsgált esetben azonban a nagyobb vízfelvételhez tartozó vakolt minta nedvességtartalma alacsonyabb, a vakolatlan mintához képest. Méréseim alapján arra következtetek, hogy a nedvesség feltehetően a vakolatban tárolódott el és a hőszigetelésbe viszonylag kevés víz juthatott be, amit célom is volt kimutatni.

Az eredmény alapján tehát elmondható, hogy a vakolat nedvességvédelmi feladatát abszorpciós elven látja el. Tehát a nagy kapilláris vízfelvevő képességéből adódóan magába tárolja a nedvességet, viszont azt nem engedi tovább a szerkezet belsejébe.

A hővezetési tényező és a nedvesítési idő kapcsolata

A parafa, a tömör téglá és a sárga XPS hővezetési tényezője nem mutatott jelentős eltérést a nedvesítési idő (t) függvényében, így ezeknek a mért értékeit átlagoltam és ezt időben állandónak tekintettem. A gipszkarton és a könnyűbeton hővezetési tényezője lineáris kapcsolatot mutatott a nedvesítési idővel. Az EPS 30, a grafitos EPS, a kőzetgyaptra és a pórusbeton esetén exponenciális függvénnyel írtam le a hővezetési tényező változását a nedvesítési idő függvényében.

Hővezetési tényező nedvességre való érzékenysége

A nedvességfelvételre való érzékenységet a Fekete-féle épületfizika kézikönyvben (Fekete, 1985) és Künzl tanulmányában (Künzel, 1995) található (8)-as képlet segítségével továbbá a 2.4.4. fejezet 2. diagramjának értelmezése alapján határoztam meg. A nedves és száraz hővezetési tényezők hányadosára és a hozzá tartozó nedvességtartalmakból adódott pontokra a száraz állapotból induló egyenest illesztettem, melynek meredeksége volt a Z érték.

12. táblázat Hővezetési tényező nedvességre való érzékenysége (Fekete, 1985;
Fraunhofer IPB, 2013)

Anyag neve	Fekete I. (Z) [(m/m%) ⁻¹]	WUFI (Z) [(m/m%) ⁻¹]	Méréseim alapján (Z) [(m/m%) ⁻¹]	Regresszió (R ²) [-]
EPS 30	2	0,05	1,02 ± 0,11	0,99
Gipszkarton	12,5	-	8,36 ± 1,26	0,99
Grafitos EPS	2	-	2,8 ± 0,29	0,99
Könnyűbeton	12	3	27,87 ± 2,16	0,99
Kőzetgyapot	2	-	nem értelmezhető	-
Parafa	1	-		
Pórusbeton	12	4		
Sárga XPS	2	0,1		
Tömör tégl	20	8		

A 12. táblázatból látható, hogy a kilenc vizsgált építőipari termékből csak négy anyagra lehetett meghatározni a hővezetési tényező nedvességre való érzékenységet (a Z értéket). Ennek oka az anyagok változatosságából ered. Egyik esetben az anyagok vízzárása miatt nem jutott be nedvesség, ami fokozni tudta volna a hővezetési tényezőt. Ezen anyagok voltak a parafa, a sárga színű XPS és a tömör tégl. Másik esetben azoknak az anyagoknak, amik magas vízfelvételi együtthatóval rendelkeztek, exponenciális függvény szerint nőtt a hővezetési tényezőjük. Az exponenciális növekedésből adódóan nem adható meg az anyagokra a Z érték. Vizsgálataim során a kőzetgyapot és a pórusbeton tartozott ebbe a kategóriába. A méréseim alapján a könnyűbetonra kaptam a legnagyobb értéket, ami nagyságrenddel nagyobb lett a többi értékhez képest.

Látható, hogy a Fekete-féle épületfizika kézikönyvben (Fekete, 1985) általánosan egy típusként megemlített műanyag habok és a szálal kőzetgyapot Z értékei megegyeztek. Mért eredményeim közül a legnagyobb különbség az irodalmi adatokhoz képest a könnyűbetonnál adódott. Ennek oka a könnyűbeton minta elkészítéséből eredhet. Feltehetően más technológiát és összetételt alkalmaztak a minták elkészítésénél, mint amit a közel 30 éve készült felsorolt irodalmak mutattak be. Kutatásaim szükségességét és létjogosultságát is tovább erősíti a tény, hogy a meglévő adatbázisok már elavultnak tekinthetők, frissebb értékek szükségesek. Továbbá meg kell állapítani, melyek azok az anyagok melyek esetében a hővezetési tényező nedvességre való érzékenysége nem értelmezhető.

A fajlagos hőkapacitás és a nedvesítési idő kapcsolata

A vizsgált mintáimból képzeletben 16 épített szerkezet kombinációival számoltam. A szerkezetben teherhordóként tömör téglát, pórusbetont és könnyűbetont alkalmaztam. A teherhordó építőanyagokat kőzetgyapot, grafitos EPS, EPS 30, sárga színű XPS és parafa hőszigetelésekkel kombináltam. Ezen kombinációk felhasználásával 15 nehézszerkezetet, továbbá a gipszkarton és a kőzetgyapot felhasználásával egy könnyűszerkezetet hoztam létre. A vizsgált minták száraz állapotából és 4, 8, 12, 16, 20 órás nedvesítése után meghatározott nedvességtartalmakból kiszámoltam a hőkapacitást a szerkezetekre.

Megjegyzendő, hogy a tömör, zárt cellás anyagokat (parafa, sárga színű XPS és tömör téglát), ahol csak adszorpció útján történt nedvességfelvétel, a számításaimban nedvesítési időtől független anyagként kezelem.

A nedvesítési idő és hőkapacitás függvényében a szerkezetekre vonatkozóan háromféle jelleget különböztetek meg:

1. a nedvesítési időtől független;
2. a nedvesítési időtől kismértékben függő;
3. a nedvesítési időre érzékeny.

23. táblázat Szerkezetek hőkapacitásának érzékenysége a nedvesítési időre

	Tömör tégl	Könnyűbeton	Pórusbeton
Kőzetgyapot	kis mértékben érzékeny		érzékeny
Grafitos EPS	nedvesítéstől független		
EPS 30			
Sárga XPS			
Parafa			
Könnyűszerkezet			

Fajlagos hőveszteség-tényező, nedvességterhelés és az épület méretének összefüggése

A nedvesség további tényezőket is befolyásol a belső környezet minőségénél, például a közepes sugárzási hőmérsékletet, a fal hővezetését vagy a levegő minőségét. A magas nedvességtartalom hatására az előbb említett jelenségek meg fognak változni. A nedvesség az épületszerkezetek mechanikai és hőtechnikai állagromlásának egyaránt fő okozója. 16 különféle épületszerkezetből összerakott, változó A/V arányú épület nedvesség terhelésével foglalkoztam. Az épület geometriáját (A/V arányát) és szerkezeteit változtatva, több mint 300

darab közel nulla energiaigényű épületnek megfelelő szerkezetet vizsgáltam meg gazdaságossági szempontból, a fajlagos hőveszteség-tényező változás függvényében.

Az eredményeket két típusba (A és B) soroltam a felső határnak történő megfelelés alapján. Az A típusban a generált épület 20 órás nedvesítési idő alatt bizonyos A/V arányoknál meghaladja a felső határértéket. A B típuson belül két altípust állapítok meg, az egyik (B1) altípusba, azok a szerkezetek tartoznak, melyek nedvesség hatására csak minimálisan változtatták a q értéküket. A másik (B2) altípusba pedig, azok amelyek víztaszító tulajdonságok miatt nem képesek változtatni a q értéküket a nedvesítési idő hatására. Mindkét altípusnak a legfontosabb tulajdonsága, hogy a q értékük csak az A/V arány növekedése miatt lépte át a felső határértéket.

24. táblázat Fajlagos hőveszteség érzékenysége a nedvesítési időre

	Tömör tégl	Könnyűbeton	Pórusbeton
Kőzetgyapot	A		
Grafitos EPS	B2		
EPS 30	B1		
Sárga XPS	B2		
Parafa			
Könnyűszerkezet			A

Különböző környezeti klímák hatásának vizsgálata szimulációs programmal

Az 3.5.2. fejezetben tárgyalt 16 szerkezetből összerakott és nedvességgel terhelt épületekből kiválasztottam a 3.7.2-es pontban részletezett épületet. Ezt az épületet gondolatban öt különböző főváros (Bécs, Bukarest, Budapest, Pozsony és Zágráb) területére (öt különböző klímarégióra) helyeztem el. Az itt felsorolt variációk mindegyikére kiszámoltam a fajlagos éves primer energiaigényt és az átmeneti időszakokra a fűtési energiaigényt valamint a transzmissziós veszteségeket. Az átmeneti időszaknak március, április, május, szeptember, október és november hónapokat vettem. A vizsgálatom azért ezekre az időszakokra esett, mert itt felléphetnek fűtési igények és a relatív páratartalom is magas.

Három csoportba soroltam a szerkezeteket. A csoportosítás szempontja a nedvesítési időre való érzékenység volt. Az első csoporthoz tartozó függvényénél a nedvesítési idő mértékében nem történik jelentős változást. A második csoportba tartozó szerkezeteknél lapos, kis meredekségű tendencia állapítható meg a diagramokról. Ezeknél a szerkezeteknél a négyzetméterre vetített időszakos változás kevesebb, mint $10 \text{ kWh m}^{-2} \text{ időszak}^{-1}$ volt. A harmadik csoportba azon

szerkezeteket soroltam, melyek négyzetméterre vetített időszakos transzmissziós vesztesége és fűtési energiaigénye nagyobb, mint $10 \text{ kWh m}^{-2} \text{ időszak}^{-1}$ volt.

25. táblázat Fűtési energiaigény, transzmissziós veszteség érzékenysége a nedvesítési időre

	Tömör tégl	Könnyűbeton	Pórusbeton
Kőzetgyapot	3. csoport		
Grafitos EPS	2. csoport		
EPS 30			
Sárga XPS	1. csoport		
Parafa			
Könnyűszerkezet			2. cs.

A levegő mozgásának hatása a vizsgált falszerkezet hőáramára

A Debreceni Egyetem Műszaki Kar Épületfizikai laboratóriumában megmértem a hőellenállást egy hőszigetelt és egy szigetetlen falszerkezetre, kényszerített- és szabadáramlások esetén. A vizsgálataimban áttekintettem a jelenlegi konvektív felületi hőátadási tényezők lehetséges számítási módjait, és az abból kapott eredményeket összehasonlítottam a mért értékeimmel. Az összehasonlításnál kitértem a hasonlóságokra és a különbségekre. A vizsgálataimban a kamra zártsága miatt a szoláris nyereségektől el lehetett tekinteni.

26. táblázat Hőátadási tényezők

Egyenlet	(26)	(37)	(32)
Jel	h_{c1}	h_{c2}	h_{c3}
	$[\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}]$	$[\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}]$	$[\text{W m}^{-2} \text{ K}^{-1}]$
SZ	3,10	2,96	4
BSZ	3,54	15,27	8
JSZ	3,54	15,94	8
ASZ	3,54	15,62	8
Átlag	3,54	15,61	8
N	3,52	4,45	4
BN	3,55	13,91	8
JN	3,56	14,53	8
AN	3,55	14,7	8
Átlag	3,55	14,38	8

A 26. táblázatban összegyűjtöttem a méréseimből (h_{c1}) és a hasonlósági számításokból származó (h_{c2}), valamint a szabvány által leírt (h_{c3}) hőátadási tényezőket hőszigetelt és hőszigetelés nélküli állapotban. Látható, hogy a légmozgás iránya nem mérvadó, csak a légáram sebessége befolyásolja a hőátadást. A hőátadási tényezőket egymással összehasonlítva nagy eltérések tapasztalhatók. A szigetelt fal esetében szabadáramlásnál 25 % volt az eltérés a mért és a számolt eredmények között. Szigetetlen esetben ez az érték tovább csökkent 20 %-ra. A kényszeráramnál viszont nagyságrendnyi különbségek láthatók a mért és a számolt eredmények között. A mért eredmények vették fel a legmagasabb értékeket. A hasonlósági elméleti és a mért értékek között több mint négyszeres eltérést tapasztaltam, míg a szabvány feleakkora értéket ad meg a légsebesség függvényében, mint amit mértem.

5.1. Új kutatási eredmények

- 1) Méréseket végeztem a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Épületfizikai laboratóriumában, és megállapítottam, különféle gyakran használt építő- és hőszigetelő anyagnak miként változik a nedvességfelvétele nedvesítési idő után. Meghatároztam ezen anyagok vízfelvételi együtthatóit a telítődés előtti szakaszukra, 20 °C hőmérsékleten és 90 % relatív páratartalom mellett.

Tézis 1a.: Mérések alapján megállapítottam az egyes anyagok vízfelvételi tényezőjét, az A_w értéket. A sárga színű XPS-re, parafára és tömör téglára megállapítottam, hogy nem értelmezhető az A_w érték. EPS 30-ra $1,15 \pm 0,125 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-0,5}$, grafitos EPS-re $1,31 \pm 0,473 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-0,5}$, gipszkartonra $2,68 \pm 0,221 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-0,5}$, könnyűbetonra $7,77 \pm 0,524 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-0,5}$, kőzetgyapotra $3,03 \pm 0,138 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-0,5}$, pórusbetonra $1,23 \pm 0,131 \cdot 10^{-4} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-0,5}$ A_w értéket kaptam.

Tézis 1.b.: Megállapítottam, hogy a nemesvakolat és a nemesvakolat perlitvakolattal kombinálva csökkenti az EPS 30, grafitos EPS és kőzetgyapot vízfelvételét a 20 órás nedvesítési időnél. A minták nedvességfelvételét megmérve megállapítottam, hogy a nem felületkezelt mintákhoz képest a felületkezelt mintáknak kisebb a nedvességtartalma és nagyobb a tájékoztató jellegű vízfelvételi együtthatója. Az eredmény alapján tehát elmondható, hogy a vakolat nedvességvédelmi feladatát abszorpciós elven látja el. Tehát a nagy kapilláris vízfelvevő képességéből adódóan magába tárolja a nedvességet, viszont azt nem engedi tovább a szerkezet belsejébe.

- 2) Méréseket végeztem a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Épületfizikai laboratóriumában, és megállapítottam, különféle gyakran használt építő- és hőszigetelő anyagnak miként változik a hővezetési tényezője nedvesítési idő után. Összefüggéseket adtam meg a hővezetési tényezők időbeli változására.

Tézis 2.: Az anyagok hővezetési tényezőjének változására a nedvesítési időbeli függés szempontjából három tendenciát vettem észre: időben állandó, lineárisan, illetve exponenciálisan változó összefüggéseket.

27. táblázat Anyagok nedvesítési időbeli függése

Anyag neve	Nedvesítési időbeli függése
Parafa	állandó
Sárga XPS	
Tömör téglá	
Gipszkarton	lineárisan változó
Könnyűbeton	
EPS 30	exponenciálisan változó
Grafitos EPS	
Kőzetgyapot	
Pórusbeton	

- 3) Méréseket végeztem a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Épületfizikai laboratóriumában, és megállapítottam, különféle gyakran használt építő- és hőszigetelő anyag a hővezetési tényezőjének nedvességre való érzékenységet a telítődés előtti szakaszra.

Tézis 3.: Megállapítottam a $\lambda_n = \lambda_{sz} \cdot \left(1 + \frac{\omega Z}{100}\right)$ egyenlet alapján az egyes anyagok hővezetési tényezőjének nedvességre vonatkozó érzékenységet, a Z értékeket, 20 °C-on 90 %-os relatív páratartalom mellett. EPS 30-ra $1,02 \pm 0,11$, gipszkartonra $8,36 \pm 1,26$ grafitos EPS-re $2,8 \pm 0,29$ és könnyűbetonra $27,87 \pm 2,16$ Z értéket kaptam. A kőzetgyapotra, parafára, pórusbetonra, sárga színű XPS-re és tömör téglára megállapítottam, hogy nem értelmezhető a Z érték. Megállapítottam, hogy a műanyag habokat egymástól külön kell kezelni. Eredményeimet összehasonlítottam a magyarországi, illetve nemzetközi irodalomban fellelhető értékekkel és ezek között jelentős eltérést tapasztaltam.

- 4) Az általam vizsgált különféle, gyakran használt hőszigetelő- és építőanyagokból létrehoztam 16 falszerkezet kombinációt és elemeztem, miként változik a hőkapacitásuk a nedvesítési idő hatására.

Tézis 4.: A nedvesítési idő és a hőkapacitás változásának függvényében három trendet különböztetek meg: nedvesítési időtől független, nedvesítési időtől kismértékben függő és nedvesítési időre érzékeny tulajdonsággal rendelkező szerkezetet.

- 5) 16 különféle épületszerkezetből összerakott, változó A/V arányú épület nedvesség terhelésével foglalkoztam. Az épület geometriáját (A/V arányát) és szerkezeteit változtatva, több mint 300 darab közel nulla energiaigényű épületet vizsgáltam meg gazdaságossági szempontból, a fajlagos hőveszteség-tényező változás függvényében.

Tézis 5.: Összehasonlítva a szerkezeteket felépítő anyagokat megmutattam, hogy a hőszigetelésnek van a jelentősebb szerepe az épület hőmérlegében. A pozitív hőtechnikai tulajdonságok mellett gazdaságossági szempontokat is figyelembe véve megállapítottam, hogy melyik kombinációk lehetnek a kiválasztásban előnyben részesítendő szerkezetek. A szerkezetek közül az EPS 30-cal hőszigetelt tömör téglafalszerkezetnek volt a legalacsonyabb fajlagos költsége és q érték változása. Hosszabb (20 óra) nedvesítési idő esetén pedig a grafitos EPS-sel szigetelt tömör téglafalszerkezet kombináció kerül előnybe.

- 6) A mérési eredményeket bemeneti paraméterként felhasználva a CASAnova 3.3 szimulációs szoftver segítségével megállapítottam, hogy jelentős nedvesítési idő mellett mely anyagokból épített szerkezetek viselkednek épületenergetikai szempontból a legkedvezőbben különféle klímaregiókban. Energetikai szimulációkat futattam le öt különböző klímaregióban (Bécs, Bukarest, Budapest, Pozsony és Zágráb), ugyanazokkal a paraméterekkel rendelkező épületre vonatkozóan.

Tézis 6: A szimulációs eredmények alapján megállapítottam, hogy jelentős nedvesítési idő mellett a polisztirol habok bizonyulnak hatékony hőszigetelő anyagoknak a kőzetgyapottal szemben, mivel ezek hővezetési tényezője kevésbé függ a nedvességtartalomtól, így energetikai szempontból is kedvezőbbek lettek. A kőzetgyapot alkalmazása kisebb nedvesítési időnél szintén alacsony energiaigényeket adott, viszont hosszabb nedvesítési időnél energetikai szempontból kiemelkedően nagy veszteségeket okozott. A klimatikus hatásokat is figyelembe véve megjegyzendő, hogy a legnagyobb fűtési primer energiaigényt a bécsi eredményeknél tapasztaltam. A budapesti és pozsonyi régiók klímaértékei nagyon közeli értékeket vettek fel, amit bukaresti klímaregiókban számított értékek követnek. A vizsgált régiók közül Zágráb klímája bizonyult a legenyhébbnek.

- 7) A Debreceni Egyetem Műszaki Kar Épületfizikai laboratóriumában megmértem a hőellenállást egy hőszigetelt és egy szigetetlen falszerkezetre, kényszerített- és szabadáramlások esetén. A vizsgálataimban áttekintettem a jelenlegi konvektív felületi hőátadási tényezők lehetséges számítási módjait, majd összehasonlítottam a mérési eredményeimmel. Az összehasonlításnál kitértem a hasonlóságokra és a különbségekre. A vizsgálataimban a kamra zártsága miatt a szoláris nyereségektől el lehetett tekinteni.

Tézis 7.: Kimutattam, hogy a levegő irányának nincs hatása a hőátadási tényezőre, mivel a felülettel párhuzamos légsebességek a mértékadók. Bemutattam, hogy mind a szabvány szerint, mind a hasonlósági elmélet alapján történő számításoknál kisebb értékek jöttek ki, mint a mérésekből. A kisebb értékek nagyfokú eltérést okozhatnak az előzetes tervezésnél. Kiemelendő, hogy a szabvány szerinti számítási módszer nem tesz különbséget abban, hogy a falazat el van-e látva vagy nincs ellátva hőszigeteléssel, csak a légsebességet veszi figyelembe. A hasonlósági elmélet alapján történő számítások csak csekély mértékben veszik figyelembe a hőszigetelés hatását. Megmutattam, hogy a hőszigetelésnek van hatása a hőátadási tényezőre.

5.2. Summary

Moisture affects buildings over a long period of time, mostly on rainy and over the following days, the effects can be shown on the heat storage and the energy consumption. The wind also has a constant heating or cooling effect on the buildings heat transport. In my dissertation, I studied the mentioned phenomena.

The investigation of building materials is important for several reasons. On the one hand, the 20-30-year-old literatures are outdated. On the other hand, the standard MSZ-140-2 which engineers used in thermal performance design, and summed up every building material and building physics parameters, was withdrawn in 2012. Thanks to the technological development, insulation production became widespread and new materials were introduced. My work was to develop the University of Debrecen Faculty of Engineering Department of Building Services and Building Engineering measurements and researches and to measure new materials which will serve as input parameters in computer simulations.

The aim of my research was to:

- examine of the thermal properties of several nowadays commonly used insulations and building materials by measuring their thermal conductivity after wetting. I did these measurements in the Building Physics Laboratory of Faculty of Engineering, University of Debrecen, where I had chance to measure the thermal conductivity several of insulation and building materials. I developed a new equation and examined the connection of the thermal conductivity and the moisture. I clarified the contradiction about the two most important thermal properties of the materials for the saturation period: the water absorption coefficient (A_w) and the moisture-related thermal conductivity supplement (Z).
- investigate how can the plaster preserve the insulations from the moisture.
- make structures from the materials that I examined and to observe their unique properties. From the structures, I made buildings of different shape (and geometry) and presented how the moisture affects them.
- study the energetic parameters of one of my previously examined building in five different climate regions with building energetic simulations.
- study the effect of the airflow on an insulated and uninsulated wall in the University of Debrecen Faculty with Engineering Building Physics Laboratory.

5.3. Köszönetnyilvánítás

Szeretném köszönetem kifejezni témavezetőmnek, Dr. Lakatos Ákos egyetemi docensnek, akinek témavezetőként, kollégaként meghatározó volt a kutatásomhoz és oktatói tevékenységemhez való hozzáállása. A doktori disszertációm témájának kialakításával és az általa képviselt szemlélettel nagyban segítette a tudományos életben való elindulásomat. Köszönöm a közös munkát, folyamatos útmutatásait és szakmai irányítását, valamint a disszertációm és a hozzá kapcsolódó kutatói munkámhoz tartozó cikkek megírásában nyújtott támogatását, türelmét.

Köszönettel tartozom Dr. Kalmár Ferencnek, tanszékvezetőmnek, aki lehetőséget biztosított kutatásaim és oktatói pályám elkezdéséhez. Biztosította a kutatásomhoz szükséges feltételeket, lehetővé téve a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Épületfizikai laboratóriumának használatát a méréseim elvégzéséhez.

Köszönettel tartozom Prof. Dr. Zöld Andrásnak tanácsaiért, a dolgozatom elkészítésében nyújtott segítségéért.

Továbbá köszönetemet fejezem ki családomnak és Lolának, akik biztosították számomra a háttérrel, hogy sikeres doktori tanulmányokat folytassak.

A kutatásokat a TÁMOP-4.2.2.A-11/1/KONV-2012-0041 számú projekt támogatta. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

Köszönettel tartozom a Wienerberger Téglaiipari zRt.-nek az általuk legyártott tömör téglamintáért.

Köszönet illeti a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Épületgépészeti Alapítványát is, amely támogatta egy KERN típusú mérleg beszerzését, ami nélkül nem tudtam volna sikeres méréseket végezni.

6. Hivatkozások

6.1. Szakirodalmi hivatkozások

- Ádám, L., Belia, G. & Csatári, D., 1971. *Románia*. Budapest: Panoráma.
- Ang, C. N. & Wang, Y. C., 2004. The effect of water movement on specific heat of gypsum plasterboard in heat transfer analysis under natural fire exposure. *Construction and Building Materials*, 18(7), p. 505–515.
- Azree, O. M., 2011. Effective thermal conductivity of foamcrete of different densities. *Concrete research letters*, 2(1), pp. 181-189.
- Azree, O. M., Hanizam, A. & Ahmad, F. R., 2012. Determination of lightweight foamed concretethermal properties integrating various additives. *Elixir Cement & Con. Com.*, 48. kötet, pp. 9286-9291.
- Babu, D. S., Babu, K. G. & Tiong-Huan, 2006. Effect Of Polystyrene Aggregate Size On Strength And Moisture Migration Characteristics Of Lightweight. *Concrete Cement & Concrete Composites*, 28(6), pp. 520-527.
- Björk, F. & Enochsson, T., 2009. Properties of thermal insulation materials during extreme environment changes. *Construction and Building Materials*, 23(6), p. 2189–2195.
- Cagon, H., Aubert, J. E., Coutand, M. & Magniont, C., 2014. Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80. kötet, p. 208–217.
- Cammerer, W. F., 1963. *Die kapillare Flüssigkeitsbewegung in porösen*. Körpern: ismeretlen szerző
- Chávez-Galán, J., Almanza, R. & Cuevas, N. R., 2014. Convective heat transfer coefficients: experimental estimation and its impact on thermal building design for walls made of different Mexican building materials.. *Concreto Y Cemento. Investigación Y Desarrollo*, 5(2), pp. 26-38.
- Clemens, J., 2000. *Entwicklung eines einfachen Modells zur Abschätzung der sommerlichen Überwärmung in Gebäuden*. Siegen: Universität Siegen.
- Clemens, J., Benkert, S. & Heidt, F. D., 2001. CASAnova – An educational software for energy and heating demand, solar heat gains and overheating risks in buildings. *Proceedings "The City – A Solar Power Station"*. Bonn, ixth European Conference on Energy in Architecture and Urban Planning.
- Crank, J., 1975. *The Mathematics of Diffusion*. ISBN 0 19 8533446 szerk. Oxford University Press.
- Davies, M., Martin, C., Watson, M. & Ni Riain, C., 2005. The development of an accurate tool to determine convective heat transfer coefficients in real buildings. *Energy and Buildings*, 37. kötet, pp. 141-145.
- Dodog, Z. & Halász, G., 2016. Az épülethatároló szerkezetek hőátadási tényezőinek elemzése. *Magyar Épületgépészet*, 10. kötet.
- Duskov, M., 1997. Materials research on EPS20 and EPS15 under representative conditions in pavement structures. *Geotext. Geomembr.*, 15. kötet, pp. 147-181.
- Fekete, I., 1985. *Épületfizika kézikönyv*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó.
- Fraunhofer IPB, 2013. *WUFI Plus*, Fraunhofer Institute for Building Physics.
- Galliano, R. és társai, 2016. Performance evaluation of aerogel-based and perlite-based prototyped insulations for internal thermal retrofitting: HMT model validation by monitoring at demo scale. *Energy and Buildings*, 126. kötet, pp. 275-286.

- Gertis, K. & Kiessl, K., 1980. *Feuchtetransport in Baustoffen, Forschungsberichte aus dem Fachbereich Bauwesen*.
- Ghazi, W. K. és társai, 2015. High Performance Aerogel Containing Plaster for Historic Buildings with Structured Façades. *Energy Procedia*, 78. kötet, pp. 949-954.
- Gnip, I., Keršulis, V. & Vėjelis, S., 2006. Isotherms of Water Vapor Sorption by Light Inorganic and Polymer Heat-insulating Materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 79(1), pp. 40-47.
- Gnip, I. Y., Kersulis, V., Vėjelis, S. & Vaitkus, S., 2006. Water absorption of expanded polystyrene boards. *Polymer Testing*, 25. kötet, pp. 635-641.
- Gróf, G., 2013. Hatékonyabb hőszigetelés a hővezetési tényező bizonytalanságának csökkentésével. *Energiagazdálkodás*, 6. kötet, pp. 4-7.
- Hall, M. & Allinson, D., 2009. Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials. *Applied Thermal Engineering*, 29(4), p. 740–747.
- Horváthné, P. J., 1998. *Építészeti hőszigetelő anyagok*. Budapest: ÉTK : MÉASZ.
- Hua, G. & Fuad, B., 2015. Dynamic effect of thermal bridges on the energy performance of a low-rise residential building. *Energy and Buildings* 105, p. 106–118.
- Jelle, B. P., 2011. Traditional. state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties. requirements and possibilities. *Energy and Buildings*, 43. kötet, pp. 2549-2563.
- Kalmár, F., 2002. *Energy analysis of building thermal insulation*. Dresden, 11th Conference for Building Physics.
- Kalmár, F., 2003. *Épületfizika*. Debrecen: Debreceni Egyetem Műszaki Főiskolai Kar.
- Karamanos, A., Hadiarakou, S. & Papadopoulos, A. M., 2008. The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone wool. *Energ. Build.*, 40. kötet, pp. 1402-1411.
- Karoglou, M., Moropoulou, A., Maroulis, Z. B. & Krokida, M. K., 2005. Water sorption isotherms of some building materials. *Drying Technology*, 23. kötet, pp. 289-303.
- Khalifa, A. J. N., 2001. Natural convective heat transfer coefficient: a review I. Isolated vertical and horizontal surfaces. *Energy Conversion and Management*, 42. kötet, pp. 491-504.
- Kittel, C., 1985. *Bevezetés a szilárdtestfizikába*.
- Koči, J., Maděra, J. & Čern, R., 2014. Generation of a critical weather year for hygrothermal simulations using partial weather data sets. *Building and Environment*, 76. kötet, pp. 54-61.
- Koci, V. és társai, 2017. Effect of Moisture Content on Thermal Properties of Porous Building Materials. *Int J Thermophys*, 38(28).
- Koru, M., 2016. Determination of Thermal Conductivity of Closed-Cell Insulation Materials That Depend on Temperature and Density Arabian. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 41(4337).
- Kutilek, M., 1992. *Dampness porous material*. Czech Republic Prague: SNTL.
- Künzel, H. M., 1986. *Bestimmt der volumen- oder der massebezogene Feuchtegehalt die Wärmeleitfähigkeit von Baustoffen*. Bauphysik 8 Nr.2, S.33-39 ISSN: 0171-5445
- Künzel, H. M., 1995. *Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components: One- and Two-dimensional Calculation Using Simple Parameters*. 3816741037, 9783816741039 szerk. Verlag: Fraunhofer IRB.
- Lakatos, Á., 2011. Method for the determination of sorption isotherms of materials demonstrated through soil samples. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 2(2), pp. 117-121.
- Lakatos, Á., 2013a. *Funkcionális rendszerek és működésük*. Terc Kiadó Kft.

- Lakatos, Á., 2013b. Mérések a Debreceni Egyetem Műszaki Kar Hőtechnikai Laboratóriumában.. *Magyar Épületgépészet*, 62(4), pp. 11-13.
- Lakatos, Á., 2014a. Comparison of the thermal properties of different insulating materials. *Advanced Materials Research*, 899. kötet, pp. 381-386.
- Lakatos, Á., 2014b. Measurements of Thermal Properties of Different Building Materials. *Materials Advanced Materials Research*, 1016. kötet, pp. 733-737.
- Lakatos, Á., 2015a. *Measurement of the heat transfer decrement of different wall structures*. Budapest, ismeretlen szerző, pp. 29-34.
- Lakatos, Á., 2015b. Moisture induced changes in the building physics parameters of insulation materials. *Science and Technology for the Built Environment*, 21(9), pp. 1-13.
- Lakatos, Á., 2016. Nanotechnológiás hőszigetelőanyagok vizsgálata tömör téglafalazaton. *Energiagazdálkodás*, 48(3-4).
- Lakatos, Á., 2017. Comprehensive thermal transmittance investigations carried out on opaque aerogel insulation blanket. *Materials and Structures*, 50(2).
- Lakatos, Á., Csáky, I. & Kalmár, F., 2015. Thermal conductivity measurements with different methods: a procedure for the estimation of the retardation time. *Materials and Structures*, 48(5), pp. 1343-1353.
- Lakatos, Á. & Kalmár, F., 2013a. Analysis of water sorption and thermal conductivity of expanded polystyrene insulation materials. *Building Services Engineering Research and Technology*, 34. kötet, pp. 407-416.
- Lakatos, Á. & Kalmár, F., 2013b. Investigation Of Thickness And Density Dependence Of Thermal Conductivity Of Expanded Polystyrene Insulation Materials. *Materials and Structures*, 46. kötet, pp. 1101-1105.
- Lakatos, Á. & Kalmár, F., 2014. Examination of the change of the overall heat transfer coefficients of building structures in function of water content. *Building Services Engineering Research & Technology*, 35. kötet, pp. 507-515.
- Liuzzi, S., Hall, M. R., Stefanizzi, P. & Casey, S. P., 2013. Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK.. *Building and Environment*, 61(37), pp. 82-92.
- Maldonado, E., 2016. *Implementing the Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) – Featuring Country Reports*. Lisbon: ISBN 978-972-8646-32-5.
- Marco, G., Gregor, P. H. & Anthony, R. F., 2016. Modelling and Calibration of a High-Mass Historic Building. *Energy and Buildings*, 116(15), pp. 434-448.
- Mar, J., Litovsky, E. & Kleiman, J., 2008. Modeling and database development of conductive and apparent thermal conductivity of moist insulation materials. *J. Build. Phys.*, 32(1), pp. 9-31.
- Martynenko, O. & Khramtso, P., 2005. *Free-Convective Heat Transfer*. The Netherlands
- Molnár, V., 2006. *Építőanyagok I.*. Győr: Széchenyi István Egyetem.
- Morales, M. P., Juárez, M. C., Muñoz, P. & Gómez, J. A., 2011. Study of the geometry of a voided clay brick using non-rectangular perforations to optimise its thermal properties. *Energy and Buildings*, 43(9), p. 2494-2498.
- Mrlik, F., 1985. *Building materials and construction moisture problems*,. SR, Alfa Bratislava.
- Mukhopadhyaya, P., Goudreau, P., Kumaran, K. & Normandin, N., 2002. Effect of Surface Temperature on Water Absorption Coefficient of Building Materials. *Journal of Building Physics*, 26(2).

- Obyn, S. & Moeseke, G., 2015. Variability and impact of internal surfaces convective heat transfer coefficients in the thermal evaluation of office buildings. *Applied Thermal Engineering*, 87. kötet, pp. 258-272.
- Ohlsson, A. K., Östin, R., Grundberg, S. & Olofsson, T., 2016. Dynamic model for measurement of convective heat transfer coefficient at external building surfaces. *Journal of Building Engineering*, 7. kötet, pp. 239-245.
- Paolo, M. C., Cristina, B., Delia D'Agostino, D. & Ilaria, Z., 2015. Cost-optimal design for nearly zero energy office buildings located in warm climates. *Energy* 91, pp. 967-982.
- Péczely, G., 1979. *Éghajlattan*. ISBN:0259001187580 szerk. Budapest: Nemzeti Tankönyvkiadó.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J. & Pout, C., 2008. A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), pp. 394-398.
- Richards, R. F., Burch, D. M. & Thomas, W. C., 1992. Water vapour sorption measurements of common building materials. *ASHRAE Transactions*, 98(2), p. 475.
- Sareh, N. és társai, 2016. Estimating building energy consumption using extreme learning machine method. *Energy* 97, pp. 506-516.
- Sayadi, A. A., Tapia, J. V., Neitzert, T. R. & Clifton, G. C., 2016. Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 112. kötet, pp. 716-724.
- Schnieders, J. & Heidt, F. D., 1997. *Die Programme CASA, RESA und ÖKORAT. Heidt, F.D. (Hrsg.): Bestandsaufnahmen zur Niedrigenergie- und Solararchitektur (NESA). Fortschritt-Berichte des VDI, Reihe 4 (Bauingenieurwesen)*. 139 szerk. Düsseldorf: VDI-Verlag.
- Sicakova, A., Draganovska, M. & Kovac, M., 2017. Water absorption coefficient as a performance characteristic of building mixes containing fine particles of selected recycled materials. *Procedia Engineering*, 180. kötet, pp. 1256-1265.
- Sierra-Pérez, J., Boschmonart-Rives, J., Dias, A. C. & Gabarrell, X., 2016. Environmental implications of the use of agglomerated cork as thermal insulation in buildings. *Journal of Cleaner Production*, 126(10), pp. 97-107.
- Skramlik, J., Fuciman, O. & Novotny, M., 2009. Changes in thermal conductivity of building materials. <http://www.rusnauka.com/15 NPN 2009/Stroitelstvo/47239.doc.htm>.
- Stahl, T., Brunner, S., Zimmermann, M. & Ghazi Wakili, K., 2012. Thermo-hygic properties of a newly developed aerogel based insulation rendering for both exterior and interior application. *Energy and Buildings*, 44. kötet, pp. 114-117.
- Szodrai, F. & Lakatos, Á., 2014a. Építőanyagok nedvességfelvételének vizsgálata. *Magyar épületgépészet*, 63(1-2), pp. 33-36.
- Szodrai, F. & Lakatos, Á., 2014b. Measurements of the thermal conductivities of some commonly used insulating materials after wetting. *Environmental Engineering and Management Journal*, 13(11), pp. 2881-2886.
- Szodrai, F. & Lakatos, Á., 2015b. Simulations of the Changes of the Heating Energy Demand and Transmission Losses of Buildings in Central European Climate: Combination of Experiments and Simulations. *International Review Of Applied Sciences And Engineering*, 6(2), pp. 129-139.
- Szodrai, F. & Lakatos, Á., 2016. Különböző éghajlati viszonyoknak kitett épületek fűtési energiafelhasználásának csökkentése hőszigeteléssel. *Energiagazdálkodás*, 57(3-4), pp. 26-29.

Szodrai, F. & Lakatos, Á., 2017a. Effect of wetting time in the sorption and in the thermal conductivity of the most commonly used structural materials. *Building Services Engineering Research and Technology*, 37(7), pp. 1-10.

Szodrai, F. & Lakatos, Á., 2017b. Effect of the Moisture in the Heat Storage Capacity of Building Structures. *Applied Mechanics and Materials*, 861. kötet, pp. 320-326.

Szodrai, F. & Lakatos, Á., 2017c. Effect of the air motion on the heat transport behavior of wall structures. *International Review of Applied Sciences and Engineering*.

Szodrai, F., Lakatos, Á. & Kalmár, F., 2015a. Analysis of the change of the specific heat loss coefficient of buildings resulted by the variation of the geometry and the moisture load. *ENERGY*, 115(1), pp. 820-829.

Tang, A. M., Cui, Y. J. & Le, T. T., 2008. A study on the thermal conductivity of compacted bentonites. *Appl. Clay Sci.*, 41. kötet, pp. 181-189.

Tilesch, P., 2016. *Fotovoltaikus erőmű dömping a hazai rendszerben?*. Magyar Energetikai és Közműszabályozási Hivatal.

Véjélis, S. & Vaitkus, S., 2006. Investigation of Water Absorption by Expanded Polystyrene Slabs. *Materials Science*, 20(2), p. 134 – 137.

Zhang, H., Hu, D., Wang, R. & Zhang, Y., 2014. Urban energy saving and carbon reduction potential of new-types of building materials by recycling coal mining wastes. *Environmental Engineering and Management Journal*, 13(1), pp. 135-144.

Zhun, J. Y. és társai, 2015. Control strategies for integration of thermal energy storage into buildings: State-of-the-art review. *Energy and Buildings* 106, p. 203–215.

6.2. Internetes hivatkozások

Internetes hivatkozás 1, 2017. [Online]
 Elérhető: <http://www.austria.info/hu/jo-tudni/termeszeti-adottsagok/ausztia-eghajlata>
 [Hozzáférés dátuma: 26 06 2017].

Internetes hivatkozás 2, 2017. [Online]
 Elérhető: <http://www.horvatorszaginfo.hu/horvatorszag/idojaras>
 [Hozzáférés dátuma: 26 06 2017].

Internetes hivatkozás 3, 2017. [Online]
 Elérhető: http://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/
 [Hozzáférés dátuma: 26 06 2017].

Internetes hivatkozás 4, 2017. [Online]
 Elérhető: <http://slovakia.travel/hu/eghajlat>
 [Hozzáférés dátuma: 26 06 2017].

Internetes hivatkozás 5, 2007. *CASAnova University of Siegen, Germany*. [Online]
 Elérhető: <http://nesa1.uni-siegen.de/wwwextern/idea/toolbox/casanova.htm>
 [Hozzáférés dátuma: 23 november 2014].

Internetes hivatkozás 6, 2007. *CASAnova University of Siegen, Germany*. [Online]
 Elérhető: http://nesa1.uni-siegen.de/index.htm?/softlab/casanova_e.htm
 [Hozzáférés dátuma: 2 március 2015].

Internetes hivatkozás 7, 2007. *CASAnova University of Siegen, Germany*. [Online]
 Elérhető: http://nesa1.uni-siegen.de/index.htm?/softlab/casanova_e.htm
 [Hozzáférés dátuma: 2 március 2015].

6.3. Szabvány hivatkozások

Szabványszám 1, 1991. MSZ-04-140-2 *Hőtechnikai méretezés Szabvány.*

Szabványszám 2, 2008. MSZ EN ISO 10456:2008 *Építési anyagok és termékek. Hő- és nedvességtechnikai tulajdonságok. Táblázatos tervezési értékek, eljárások a minősítési és a tervezési hőtechnikai értékek meghatározására.*

Szabványszám 3, 2013. MSZ EN ISO 12571:2013 *Építési anyagok és termékek hő- és nedvességtechnikai viselkedése. A higroszkopikus szorpciós tulajdonságok meghatározása.*

Szabványszám 4, 2001. MSZ EN 12664:2001 *Építési anyagok és termékek hőtechnikai viselkedése. A hővezetési ellenállás meghatározása segédfűtőlapos és hőárammérős eljárással. Közepes és kis hővezetési ellenállású száraz és nedves termékek.*

Szabványszám 5, 2001. MSZ EN 12667:2001 *Építési anyagok és termékek hőtechnikai viselkedése. A hővezetési ellenállás meghatározása segédfűtőlapos és hőárammérős eljárással. Nagy és közepes hővezetési ellenállású termékek.*

Szabványszám 6, 2007. DIN 12 880:2007-05 *Electrical laboratory devices - Heating ovens and incubators.*

Szabványszám 7, 1991. ASTM C518 *Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus.*

Szabványszám 8, 1998. MSZ ISO 8301:1998 *Hőszigetelés. A hővezetési ellenállás és a kapcsolódó tulajdonságok meghatározása állandósult állapotban. Hőárammérő készülék.*

Szabványszám 9, 2000. MSZ EN ISO 8990:2000 *Hőszigetelés. Hőátbocsátási tulajdonságok meghatározása állandósult állapotban. Kalibrált kamra és segédkamra (ISO 8990:1994).*

Szabványszám 10, 2008. MSZ EN ISO 10211:2008 *Hőhidak az épületszerkezetekben. Hőáramok és felületi hőmérsékletek. Részletes számítások.*

Szabványszám 11, 1981. DIN 4108-1 *Wärmeschutz im Hochbau Hőszigetelés épületeken; mennyiségek és mértékegységek.*

Szabványszám 12, 2003. DIN EN 832:2003-06 *Berechnung des Heizenergiebedarfs. Deutsches Institut für Normung e.V.*

Szabványszám 13, 2008. MSZ EN ISO 6946:2008 *Épületszerkezetek és épületelemek. Hővezetési ellenállás és hőátbocsátás. Számítási módszer (ISO 6946:2007).*

6.4. Rendelet-hivatkozások

Rendelet-hivatkozás 1, 2006. 7/2006. (V. 24.) TNM *rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról.*

Rendelet-hivatkozás 2, 2011. 28/2011. (IX. 6.) BM *rendelet az Országos Tűzvédelmi Szabályzatról.*

7. Alkalmazott jelölések jegyzéke

β - a levegő és a vizsgált felület átlaghőmérséklet érték reciproka [K^{-1}]

Λ - a részecske közepes szabad úthossza két ütközés között [m]

ν - a viszkozitás [$m^2 s^{-1}$]

φ - az átlagos hőfluxusa a falnak [$W m^{-2}$]

λ - hővezetési tényező [$W m^{-1} K^{-1}$]

β - a levegő és a vizsgált felület átlaghőmérséklet érték reciproka [K^{-1}]

ΔT - hőmérséklet különbség [K]

Δx - minta vastagsága [m]

ε_h - a hasznosítási tényező [-]

ε - félgömb emissziós tényezőtől [-]

ρ - az anyag testsűrűsége [$kg m^{-3}$]

σ - Stefan Boltzmann állandó

χ - a rendelet vonatkozásában a hőhidak hatását kifejező korrekciós tényező [-]

Ψ - a padló vonalmenti hőátbocsátási értéke [$W m^{-1} K^{-1}$]

ω - a nedvességtartalom [m/m%]

A_j - felület [m^2]

A, B és C n állandók [-]

A_1 - a függvény együttható [$W m^{-1} K^{-1} h^{-1}$]

A_w - vízfelvételi együttható [$kg m^{-2} s^{-0,5}$]

C - hőkapacitás [$kJ kg^{-1} K^{-1}$],

C_v - az egységnyi térfogatra eső fajhő [$J K^{-1} m^{-3}$]

c_j - a j réteg anyagának fajhője adott nedvesítési időnél [$kJ kg^{-1} K^{-1}$]

d_j - a j réteg vastagsága adott nedvesítési időnél [m]

E_p – fajlagos primer energiaigény [$kW h m^{-2} év^{-1}$]

E_{tr} – fajlagos transzmissziós veszteség [$kW h m^{-2} időszak^{-1}$]

g - a gravitációs állandó [$m s^{-2}$]

$g_{\ddot{u}}$ - az üvegezés összesített sugárzásátbocsátó képessége [-]

Gr - Grasshof szám [-]

h_c - konvektív hőátadási tényező [$W m^{-2} K^{-1}$]

l - hossz [m]

m - tömeg [kg]

N - kalibrációs érték

Nu - Nusselt szám [-]

p - nyomás [Pa]

Pr - Prandtl szám [-]

q - fajlagos hőveszteség-tényező [$\text{W m}^{-3} \text{K}^{-1}$]

Q - hőáram [W]

q_f – fajlagos fűtési energiaigény [$\text{kW h m}^{-2} \text{időszak}^{-1}$]

q_t - termikus energiaáram [W m^{-2}]

Q_{SD} - direkt sugárzási nyereség fűtési időnyre vonatkoztatva [kW h év^{-1}]

Q_{TOT} - sugárzási energiahozam a fűtési időnyre [kW h év^{-1}]

R - Hővezetési ellenállás [$\text{m}^2 \text{K W}^{-1}$]

R^2 - lineáris regresszió [-]

t - az anyag 20°C és 90%-os relatív nedvességtartalomnak kitett ideje (nedvesítési idő) [h]

T - hőmérséklet [K]; [°C]

t_1 - a függvény exponenciális együtthatója [h]

u - sebesség [m s^{-1}]

U - az adott épület részének a hőátbocsátási értéke [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]

U - pedig a feszültségérték szintje a jelátalakítón [V]

V - fűtött épülettérfogat [m^3]

Z - az adott anyag hővezetésének a nedvességre való érzékenységet fejezi ki [$(\text{m/m}\%)^{-1}$]



Nyilvántartási szám: DEENK/264/2017.PL
Tárgy: PhD Publikációs Lista

Jelölt: Szodrai Ferenc
Neptun kód: L1Z3SB
Doktori Iskola: Földtudományok Doktori Iskola
MTMT azonosító: 10044581

A PhD értekezés alapjául szolgáló közlemények

Magyar nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (2)

1. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á.: Különböző éghajlati viszonyoknak kitett épületek fűtési energiafelhasználásának csökkentése hőszigeteléssel.
Energiagazdálkodás. 57 (3-4), 26-29, 2016. ISSN: 0021-0757.
2. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á.: Építőanyagok nedvességfelvételének vizsgálata.
Magy. épülgép. 63 (1-2), 33-36, 2014. ISSN: 1215-9913.

Idegen nyelvű tudományos közlemények hazai folyóiratban (2)

3. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á.: Effect of the air motion on the heat transport behaviour of wall structures.
Int. Rev. Appl. Sci. Eng. 8 (1), 67-73, 2017. ISSN: 2062-0810.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/1848.2017.8.1.10>
4. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á.: Simulations of the Changes of the Heating Energy Demand and Transmission Losses of Buildings in Central European Climate: Combination of Experiments and Simulations.
Int. Rev. Appl. Sci. Eng. 6 (2), 129-139, 2015. ISSN: 2062-0810.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/1848.2015.6.2.6>

Idegen nyelvű tudományos közlemények külföldi folyóiratban (4)

5. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á.: Effect of the Moisture in the Heat Storage Capacity of Building Structures.
Appl. Mech. Mater. 861, 320-326, 2017. ISSN: 1660-9336.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.861.320>
6. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á.: Effect of wetting time in the sorption and in the thermal conductivity of the most commonly used structural materials.
Building Serv. Eng. Res. Technol. 38 (4), 475-489, 2017. ISSN: 0143-6244.
IF: 0.67 (2016)



7. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á., Kalmár, F.: Analysis of the change of the specific heat loss coefficient of buildings resulted by the variation of the geometry and the moisture load.
Energy. 115 (1), 820-829, 2016. ISSN: 0360-5442.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.073>
IF: 4.52
8. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á.: Measurements of the thermal conductivities of some commonly used insulating materials after wetting.
Environ. Eng. Manag. J. 13 (11), 2881-2886, 2014. ISSN: 1582-9596.
IF: 1.065

További közlemények

Magyar nyelvű közlemények hazai folyóiratban (3)

9. Kostyák, A., **Szodrai, F.**: Szélcsatornaépítés a gyakorlatban = Wind tunnel making in practise.
IJEMS. 2 (1), 19-24, 2017. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2017.1.4>.
10. Molnár, I., **Szodrai, F.**: Intelligens napelemes rendszer vizsgálata = Analysis of smart photovoltaic systems.
IJEMS. 1 (2), 67-75, 2016. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2016.2.9>.
11. Kostyák, A., **Szodrai, F.**: Létesítmény szélenergia hasznosításának lehetőségei = Wind energy harnessing options at buildings.
IJEMS. 1 (2), 51-58, 2016. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2016.2.7>.

Magyar nyelvű konferencia közlemények (2)

12. Kostyák, A., **Szodrai, F.**: Az alföldi szélenergia-potenciál vizsgálata = Investigation of Wind Energy Potential in the Great Hungarian Plain.
In: A XXI. Fiatal Műszakiak Tudományos Ülésszaka előadásai = Proceedings of the XXIth National Scientific Conference of Young Engineers. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 233-236, 2016, (Műszaki tudományos közlemények, ISSN 2393-1280 ; 5.)
13. Kostyák, A., **Szodrai, F.**: Szélenergetikai vizsgálatok adott turbínatípusok mellett.
In: Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban 2016. Szerk.: Bodzás Sándor, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 253-260, 2016. ISBN: 9789637064333



Idegen nyelvű konferencia közlemények (1)

14. Lakatos, Á., **Szodrai, F.**: Comparison of the Thermal Properties of Different Insulating Materials.
In: 8th International Conference Buildings and Environment 2013. International Conference Proceedings. Ed.: Katarína Minarovicová, Jozef Hraska, STU, Bratislava, 448-453, 2013.
ISBN: 9788022740708

A közlő folyóiratok összesített impakt faktora: 6,255

**A közlő folyóiratok összesített impakt faktora (az értekezés alapjául szolgáló közleményekre):
6,255**

A DEENK a Jelölt által az iDEa Tudóstérbe feltöltött adatok bibliográfiai és tudománymetriai ellenőrzését a tudományos adatbázisok és a Journal Citation Reports Impact Factor lista alapján elvégezte.

Debrecen, 2017.08.29.





Registry number:
Subject:

DEENK/264/2017.PL
PhD Publikációs Lista

Candidate: Ferenc Szodrai

Neptun ID: L1Z3SB

Doctoral School: Doctoral School of Earth Sciences

MTMT ID: 10044581

List of publications related to the dissertation

Hungarian scientific articles in Hungarian journals (2)

1. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á.: Különböző éghajlati viszonyoknak kitett épületek fűtési energiateljesítményének csökkentése hőszigeteléssel.
Energiagazdálkodás. 57 (3-4), 26-29, 2016. ISSN: 0021-0757.
2. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á.: Építőanyagok nedvességfelvételének vizsgálata.
Magy. épülgép. 63 (1-2), 33-36, 2014. ISSN: 1215-9913.

Foreign language scientific articles in Hungarian journals (2)

3. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á.: Effect of the air motion on the heat transport behaviour of wall structures.
Int. Rev. Appl. Sci. Eng. 8 (1), 67-73, 2017. ISSN: 2062-0810.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/1848.2017.8.1.10>
4. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á.: Simulations of the Changes of the Heating Energy Demand and Transmission Losses of Buildings in Central European Climate: Combination of Experiments and Simulations.
Int. Rev. Appl. Sci. Eng. 6 (2), 129-139, 2015. ISSN: 2062-0810.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1556/1848.2015.6.2.6>

Foreign language scientific articles in international journals (4)

5. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á.: Effect of the Moisture in the Heat Storage Capacity of Building Structures.
Appl. Mech. Mater. 861, 320-326, 2017. ISSN: 1660-9336.
DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.861.320>
6. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á.: Effect of wetting time in the sorption and in the thermal conductivity of the most commonly used structural materials.
Building Serv. Eng. Res. Technol. 38 (4), 475-489, 2017. ISSN: 0143-6244.
IF: 0.67 (2016)



7. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á., Kalmár, F.: Analysis of the change of the specific heat loss coefficient of buildings resulted by the variation of the geometry and the moisture load.
Energy. 115 (1), 820-829, 2016. ISSN: 0360-5442.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2016.09.073>
IF: 4.52
8. **Szodrai, F.**, Lakatos, Á.: Measurements of the thermal conductivities of some commonly used insulating materials after wetting.
Environ. Eng. Manag. J. 13 (11), 2881-2886, 2014. ISSN: 1582-9596.
IF: 1.065

List of other publications

Hungarian scientific articles in Hungarian journals (3)

9. Kostyák, A., **Szodrai, F.**: Szélcsatornaépítés a gyakorlatban = Wind tunnel making in practise.
IJEMS. 2 (1), 19-24, 2017. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2017.1.4>.
10. Molnár, I., **Szodrai, F.**: Intelligens napelemes rendszer vizsgálata = Analysis of smart photovoltaic systems.
IJEMS. 1 (2), 67-75, 2016. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2016.2.9>.
11. Kostyák, A., **Szodrai, F.**: Létesítmény szélergia hasznosításának lehetőségei = Wind energy harnessing options at buildings.
IJEMS. 1 (2), 51-58, 2016. EISSN: 2498-700X.
DOI: <http://dx.doi.org/10.21791/IJEMS.2016.2.7>.

Hungarian conference proceedings (2)

12. Kostyák, A., **Szodrai, F.**: Az alföldi szélergia-potenciál vizsgálata = Investigation of Wind Energy Potential in the Great Hungarian Plain.
In: A XXI. Fiatal Műszaki Tudományos Ülésszaka előadásai = Proceedings of the XXIth National Scientific Conference of Young Engineers. Szerk.: Bitay Enikő, Erdélyi Múzeum-Egyesület, Kolozsvár, 233-236, 2016, (Műszaki tudományos közlemények, ISSN 2393-1280 ; 5.)
13. Kostyák, A., **Szodrai, F.**: Szélergetikai vizsgálatok adott turbinatípusok mellett.
In: Műszaki tudomány az Észak-Kelet Magyarországi régióban 2016. Szerk.: Bodzás Sándor, Debreceni Akadémiai Bizottság Műszaki Szakbizottsága, Debrecen, 253-260, 2016. ISBN: 9789637064333



Foreign language conference proceedings (1)

14. Lakatos, Á., **Szodrai, F.**: Comparison of the Thermal Properties of Different Insulating Materials.
In: 8th International Conference Buildings and Environment 2013. International Conference Proceedings. Ed.: Katarína Minarovicová, Jozef Hraska, STU, Bratislava, 448-453, 2013.
ISBN: 9788022740708

Total IF of journals (all publications): 6,255

Total IF of journals (publications related to the dissertation): 6,255

The Candidate's publication data submitted to the iDEa Tudóstér have been validated by DEENK on the basis of Web of Science, Scopus and Journal Citation Report (Impact Factor) databases.

29 August, 2017

