



BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM
ÉPÍTŐMÉRNÖKI KAR, MAGASÉPÍTÉSI TANSZÉK
MAGASÉPÍTŐ ÉS REKONSTRUKCIÓ SZAKIRÁNY

Talajjal érintkező szerkezetek tranziens numerikus hőtechnikai modellezése

(Nyilvántartási szám: MSc-A-004-13/14/1)

Nagy Balázs

CDHCL2

Konzulens:

Dr. Csanaky Judit Emília

adjunktus

BME Magasépítési Tanszék

Társ-konzulensek:

Dr. Tóth Elek DLA

ny. egyetemi docens

BME Magasépítési Tanszék

Dr. Tompai Zoltán

adjunktus

BME Geotechnikai Tanszék

Budapest, 2013. December 20.

ELŐSZÓ

Legyen szó épületenergetikai tanúsításról, épületgépészeti méretezésről vagy az épület-szerkezetek állagvédelméről, az egyes épülethatároló szerkezetek hőveszteségeinek ismerete elengedhetetlenül szükséges, és a további számítások alapját jelenti. Jelenleg azonban az egyszerű számítási módszerek állnak nyerésre a pontosabb, ám összetettebb épületfizikai ismereteket megkövetelő megoldásokkal szemben. Ugyanakkor nem várhatjuk el, hogy egy épületenergetikai tanúsítás akár hetekig tartson a bonyolult számítások és szimulációk miatt. Szükség van olyan közelítő módszerekre, melyekkel a számítási eredmények még kellő pontosságúak maradnak, és a felhasználó sem tölt több időt az elvégzésükkel, mintha a jelenlegi egyszerű módszerekkel végeznék azokat.

A megoldást véleményem szerint az jelentheti, hogy a kutatók a valóságos állapotokat minél inkább megközelítő modellek szimulációját, laborméréseit a felhasználók helyett elvégzik, és olyan szintűre egyszerűsítik az eljárásokat közelítő módszerek kidolgozásával, hogy a számítási eljárások (az eredmények pontosságának csökkenését minél jobban elkerülve) bárki számára emészthetőek és könnyedén felhasználhatóak legyenek. A közelítő, egyszerűsített számítás tehát a valóságos állapotok feldolgozása és leírása legyen egyszerűsített nyelvezeten, mintsem egy leegyszerűsített, emberek által meghatározott állapot valóságosnak nyilvánítása.

2013. novemberi TDK kutatásomban és jelen MSc diplomamunkában ilyen módszerek kidolgozását végeztem el hazai talajok hővezetési tényezőjének meghatározásához és a talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségeinek számításához. A dolgozatomban a jelenlegi számítási eljárásokat és a saját módszereimet is bemutatom, eredményeiket összehasonlítom.

Hiszek abban, hogy az általunk önkényesen felvett értékek és a valós jelenségek leírására alkalmatlan modellek alkalmazása helyett a valóság megismerése, modellezése, majd közelítése bár a kutatónak nehezebben járható út, de az egyszeri hosszadalmas munka megtérülő befektetéssel jár majd a hétköznapi számítások pontossága esetén.

TARTALOMJEGYZÉK

Előszó	1
Tartalomjegyzék.....	2
Ábrajegyzék.....	6
Táblázatjegyzék.....	9
Jelölések jegyzéke	11
1. Absztrakt.....	14
2. Summary	15
3. Bevezetés.....	16
3.1. A hőtechnikai számításokról, modellezésről	16
3.2. Iránymutatások.....	17
3.3. Célkitűzések	19
4. Szakirodalmi áttekintés, alapismeretek.....	20
4.1. Hőhidak és a vonalmenti hőátbocsátási tényező.....	20
4.2. A hővezetés differenciálegyenlete	20
4.2.1. A tranziens hővezetés differenciálegyenletének levezetése	21
4.2.2. A stacioner hővezetés differenciálegyenlete	22
4.2.3. Peremfeltételek	23
4.3. A háromdimenziós hővezetési feladat megoldása véges differenciámódszerrel	24
4.3.1. Tranziens eset	24
4.3.2. Stacioner eset, a felső relaxációs módszer alkalmazása.....	28
4.4. Talajok hőtechnikai tulajdonságai	29
4.4.1. Hővezetési tényező meghatározása	30
4.4.1.1. De Vries módszer	30
4.4.1.2. Módosított Johansen módszer.....	31
4.4.1.3. Endrizzi módszer	33
4.4.1.4. Laborméréssel.....	34
4.4.2. Fajlagos hőkapacitás meghatározása	34
4.4.2.1. De Vries módszer	34
4.4.2.2. Farouki módszer.....	34
4.4.2.3. Sikora & Kossowski módszer.....	35
4.5. A talajjal érintkező szerkezetek hőtechnikai számítási eljárásainak bemutatása	35
4.5.1. Numerikus módszerek.....	36
4.5.2. Analitikus módszerek.....	36

4.5.3. Fél-analitikus módszerek	37
4.6. A hazánkban alkalmazott számítási módszerek bemutatása	38
4.6.1. Az MSZ-04-140 szabványok módszerei.....	38
4.6.1.1. MSZ-04-140/3 – 1978	39
4.6.1.2. MSZ-04-140/3 – 1987	39
4.6.1.3. MSZ-04-140/2 – 1991	41
4.6.2. Az MSZ EN 832 számítási módszere	42
4.6.3. A 7/2006. TNM rendelet táblázatos módszere	43
4.6.3.1. A 40/2012. BM Rendelet a módosításról	45
4.6.3.2. A 1246/2013. Korm. határozat a módosításról	45
4.6.4. Az MSZ EN ISO 13370:2008 Szabvány számítási módszerei.....	46
4.6.4.1. Talajon fekvő földszinti padlók hővesztesége	46
4.6.4.2. Fűtött pince hővesztesége	48
4.6.4.3. Hőszigetelt sáv figyelembevétele	49
4.6.5. Szimulációs módszerek	51
4.6.5.1. Véges differenciamódszer (VDM)	52
4.6.5.2. Végeselemmódszer (VEM)	53
4.6.6. Véges térfogat módszer (VTM)	54
4.6.7. Peremelem módszer (PEM)	54
4.7. Numerikus számítások hibái	55
4.8. Vonalmenti hőátbocsátási tényező számítása	55
4.9. A jelenleg hazánkban elterjedt számítási módszerek hiányosságai.....	56
4.10. A modellezés és a valóság kapcsolata	57
4.11. Magyarország éghajlata	58
4.11.1. Éves átlagos napi középhőmérséklet	59
4.11.2. Szélsebesség	60
4.12. Talajfizikai jellemzők meghatározása	61
4.12.1. Talajok fázisos összetétele, jellemzői.....	61
4.12.1.1. Fázisos összetétel jellemzői.....	61
4.12.1.2. Víztartalom.....	62
4.12.1.3. Térfogatsűrűség.....	62
4.12.1.4. Hézagterfogat	62
4.12.1.5. Telítettségi fok	63
4.12.2. Szemeloszlási görbe meghatározása	63
4.12.3. Talajok azonosítása	64
4.12.4. Talajok textúrája	64
5. Hazai talajok épületfizikai jellemzőinek vizsgálata	66
5.1. Talajminták és származási helyük	66

5.2. A talajminták talajfizikai jellemzői	67
5.3. A talajmintákat alkotó frakciók meghatározása	68
5.4. A talajminták azonosítása	70
5.5. A talajminták textúrája	73
5.6. Talajminták hővezetési tényezői	74
5.7. Homokos agyagos iszap minták hővezetési tényezőjének számítási lehetőségei.....	78
5.8. Talajminták térfogati hőkapacitása.....	81
6. Talajjal érintkező szerkezetek tranziens numerikus hőtechnikai modellezése	85
6.1. Tranziens hőtechnikai szimuláció bemutatása	85
6.1.1. Modellalkotás	85
6.1.2. Anyagjellemzők megadása	86
6.1.3. Peremfeltételek definiálása	87
6.1.4. Hálógenerálás	89
6.1.5. Számítás és Eredmények.....	90
6.2. Vizsgált modellek és paramétereik.....	91
6.3. Vizsgálatok eredményei	93
7. Új számítási lehetőség talajjal érintkező szerkezetek modellezésére.....	95
7.1. A számítási eljárás módszertana	95
7.1.1. Tranziens végeselem módszer alkalmazása.....	96
7.1.2. Geometriai modell létrehozása	97
7.1.3. Anyagtulajdonságok kiválasztása	99
7.1.4. Külső hőmérsékletfüggvény megalkotása, peremfeltételek	101
7.1.4.1. Külső oldali peremfeltételek.....	101
7.1.4.2. Belső oldali peremfeltételek.....	102
7.1.4.3. Talajhőmérséklet	103
7.1.5. A végeselemes háló.....	103
7.1.6. A szimulációk futtatása és eredményei	104
7.1.7. A vonalmenti hőátbocsátási tényezők számítása	106
7.1.8. A vonalmenti hőátbocsátási tényezők összefüggése	108
7.1.9. Korrekciós tényezők szükségessége	110
7.1.10. Korrekciós tényezők számítása	111
7.1.10.1. Külső hőmérsékleti korrekció.....	113
7.1.10.2. Talaj-összetételi korrekció.....	114
7.1.10.3. Külső hőmérséklet és talaj-összetételi korrekció	115
7.1.10.4. Padló szerkezet felépítése miatti korrekció	115
7.1.10.5. Padlóhossz változás miatti korrekció.....	116
7.1.10.6. További korrekciós tényezők lehetőségei	117

7.1.11. Vonalmenti hőátbocsátási tényező korrigált értékének számítása .	117
7.1.12. Belső kerület hosszának korrekciója.....	118
7.1.12.1. Pozitív sarok.....	119
7.1.12.2. Negatív sarok.....	121
7.2. A számítás menete	122
7.2.1. Pincefal jellemző hőátbocsátási tényezőjének számítása	122
7.2.2. Talajjal érintkező szerkezetek hővesztesége.....	123
8. Talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségeit számító szoftver bemutatása	124
8.1. A szoftver leírása	124
8.2. A kezelőfelület	125
8.2.1. Hőátbocsátási tényező számítása.....	126
8.2.2. Adatok megadása és a követelmények kiválasztása	126
8.2.3. Korrekciós körülmények beállítása	127
8.2.4. Padló kerülete mentén elhelyezett hőszigetelő sáv figyelembevétele	127
8.2.5. A számítás elvégzése és eredmények.....	128
8.2.6. A szoftver ellenőrző funkciói	128
8.3. A szoftver futása és eredményei	129
9. Eredmények összehasonlítása	130
9.1. 7/2006 TNM Rendelettel számított eredmények	130
9.2. MSZ EN ISO 13370:2008 szabvány szerint számított eredmények.....	131
9.3. Tranziens modellezésen alapuló táblázatos módszer szerinti eredmények	132
9.4. Az eredmények összehasonlítása stacioner és tranziens VDM szimulációval.....	133
10. Összegzés.....	136
Köszönetnyilvánítás	139
Források	140
Mellékletek	145

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra: A háromdimenziós véges differenciámódszer ábrázolása	25
2. ábra: Hőáramok feltételezett útvonala [Latta és Boileau 1969].....	37
3. ábra: Az MSZ-04-140/3 – 1987 szabvány talajjal érintkező szerkezeteire vonatkozó táblázatok magyarázó ábrája.	40
4. ábra: Az MSZ-04-140/2 – 1991 szabvány talajjal érintkező padló szerkezet magyarázó ábrája.....	41
5. ábra: Szigetelősáv elhelyezés 1 m hosszon a padló szerkezet alatt vagy a lábazaton.	41
6. ábra: Az MSZ EN ISO 13370 szerinti talajon fekvő padló szerkezet modellje	46
7. ábra: A talajon fekvő padlók és falszerkezetek vonalmenti hőátbocsátási tényezői különféle szerkezeti kialakítások esetén az MSZ EN ISO 14683 alapján.....	48
8. ábra: Az MSZ EN ISO 13370 szerinti fűtött pince modellje	48
9. ábra: Az MSZ EN ISO 13370 szerinti vízszintes hőszigetelő sáv modellje	50
10. ábra: Az MSZ EN ISO 13370 szerinti függőleges hőszigetelő sáv (balra) és hőszigetelő alapozás (jobbra) modelljei	51
11. ábra: Diszkretizált geometriai modell talajon fekvő padló és falsarok szimulációjakor, VDM alkalmazása esetén [Blomberg 1996].....	52
12. ábra: Véges elemes felbontás háromszögelemekkel 2D VEM alkalmazásakor, Psi-Therm szoftverrel [Nagy 2013a]	53
13. ábra: Talajhőmérséklet éves vázlatos diagramja [foek.hu].....	57
14. ábra: Talajjal érintkező pincefal és padló nagymodell kísérleten mért felületi hőmérsékleteinek és kétdimenziós dinamikus hőtechnikai szimuláció útján számított eredmények összehasonlítása egy éves periódus figyelembevételével [Rees et al. 2007].....	58
15. ábra: Az évi átlagos középhőmérséklet Magyarországon az 1971-2000 közötti időszak alapján. [www.met.hu]	59
16. ábra: Az évi átlagos szélsőségek (m/s) és az uralkodó szélirányok Magyarországon. [www.met.hu]	60
17. ábra: Talajok fázisos összetétele [wikipedia.com]	61
18. ábra: Szitálás és hidrometrálás [Mecsi 2009]	63
19. ábra: Talajazonosításhoz használt diagramok [Mahler 2013]	64
20. ábra: Talajtextúra osztályozáshoz használt diagram [Varga 2008]	65

21. ábra: Hazánk talajainak fizikai félesége [enfo.agt.bme.hu]	65
22. ábra: Víztartalmi talajminták	66
23. ábra: Talajminták származási helye és a segédfűtőlapos hővezetési tényező mérése utáni állapota	66
24. ábra: RADWAG MAC 110 gyors nedvesség meghatározó szárítós mérleg készülék.....	67
25. ábra: BÉTI 200 mm / 0,063-63 mm-es szitasor és PASCALL ENG. 12404 szitarázó [kép: Mahler András]	68
26. ábra: Talajt alkotó frakciók tömegszázalékának értelmezése	69
27. ábra: 3. minta azonosítása: Homokos agyagos iszap	70
28. ábra: 4. minta azonosítása: Homokos agyagos iszap	71
29. ábra: 5. minta azonosítása: Iszapos homok.....	72
30. ábra: 3. minta talajtextúrája: Homokos vályog.....	73
31. ábra: 4. minta talajtextúrája: Homokos vályog.....	73
32. ábra: 5. minta talajtextúrája: Vályogos homok	74
33. ábra: Taurus TLP 300 DTX segédfűtőlapos hővezetési tényező mérőműszer.....	74
34. ábra: Talajminták hővezetési tényezői.....	78
35. ábra: Talajminták térfogati hőkapacitásai	83
36. ábra: Modellalkotás Heat3-ban.....	86
37. ábra: Peremfeltételek definiálása Heat3-ban	88
38. ábra: Országos átlagos havi középhőmérsékletek alsó-, felsőkvartilise és szélsőértékei [www.met.hu]	89
39. ábra: Numerikus felbontás beállítása Heat3-ban.....	89
40. ábra: Szimulációs idő beállítása Heat3-ban	90
41. ábra: Tranziens szimuláció futtatása Heat3-ban	91
42. ábra: Tranziens szimuláció összeállítása ANSYS végeselemes szoftverben.....	96
43. ábra: Az egyik geometriai modell, a peremfeltételek jelölésével	98
44. ábra: Napi átlagos középhőmérsékletek 50 éves adatsorokból és függvényből, I. éghajlati zóna.....	101
45. ábra: Geometriai modell végeselemes felbontása	103
46. ábra: Tranziens szimuláció változói és beállításai	104
47. ábra: Hővesztések egy modell esetében szerkezetenként	105
48. ábra: Hőmérséklet eloszlás a talajban és a kapcsolódó szerkezetekben a fűtési idény alatt	106

49. ábra: Talajjal érintkező padlószervezetek vonalmenti hőátbocsátási tényezői	107
50. ábra: Logaritmikus összefüggés a szimulált értékek között $z = -3$ m és $+0,25$ m között.....	108
51. ábra: A logaritmikus összefüggés együtthatóinak változása „ z ” függvényében	109
52. ábra: A vizsgálatok eredményei grafikusán ábrázolva.....	111
53. ábra: Az éves átlagos középhőmérséklet 1 K-el való csökkenése esetén az értékek növekednek	112
54. ábra: Korrekciós tényező számításához szükséges vizsgálatok	112
55. ábra: II. éghajlati zóna és a hőmérsékletet jellemző „Függvény 9,5”	113
56. ábra: Alsó szigetelésű padló felépítésének modellje $z = -2$ m esetén	115
57. ábra: Transzmissziós hőveszteségek grafikusán ábrázolva	119
58. ábra: 8 m-es belső kerületű pozitív sarok geometriai modellje	119
59. ábra: Logaritmikus összefüggések hányadosainak változása	120
60. ábra: 8 m-es belső kerületű negatív sarok geometriai modellje.....	121
61. ábra: Negatív sarok hőveszteségeinek hibája.....	122
62. ábra: Talajjal érintkező szerkezetek vonalmenti hőátbocsátási tényezőjét számító szoftver.....	125
63. ábra: Hőátbocsátási tényező számítása	126
64. ábra: Adatok megadása és követelményértékek kiválasztása	126
65. ábra: Korrekciós tényezők beállítása	127
66. ábra: Hőszigetelő sáv figyelembevétele	127
67. ábra: Eredmények.....	128
68. ábra: Adatok ellenőrzése	128
69. ábra: Hőveszteségek az 1-5 modellek esetében.....	134
70. ábra: Hőveszteségek a 6-10 modellek esetében.....	135

TÁBLÁZATJEGYZÉK

1. táblázat: Talajok hőtechnikai tulajdonságai az MSZ EN ISO 13370:2008 táblázatai alapján	30
2. táblázat: Talajok ajánlott kvarctartalma Peters-Lidard et al. [1998] alapján	32
3. táblázat: Talajösszetevők hőtechnikai tulajdonságai az MSZ EN ISO 10456:2008 és Farouki 1981-es gyűjtése alapján.	33
4. táblázat: Tömeg és nedvességtartalom kivágott minta alapján	67
5. táblázat: Nedves és száraz tömeg és térfogatsűrűség 180x180x40mm-es minta alapján	68
6. táblázat: Hézagterfogat, telítettségi fok és talajösszetevők részarányai 180x180x40 mm -es minta alapján	68
7. táblázat: Talajmintákat alkotó frakciók térfogatszázaléka	69
8. táblázat: Hővezetési tényező számítása de Vries módszerrel.....	75
9. táblázat: Hővezetési tényező számítása módosított Johansen módszerrel, segédmenységek	75
10. táblázat: Hővezetési tényező számítása módosított Johansen módszerrel, eredmények	76
11. táblázat: Hővezetési tényező számítása Endrizzi módszerrel	76
12. táblázat: Hővezetési tényezők összehasonlítása	77
13. táblázat: Hővezetési tényező számítása saját módszerrel 1.	80
14. táblázat: Hővezetési tényező számítása saját módszerrel 2.	80
15. táblázat: Térfogati hőkapacitás számítása de Vries módszerrel	81
16. táblázat: Térfogati hőkapacitás számítása Farouki módszerrel.....	81
17. táblázat: Térfogati hőkapacitás számítása Farouki nem fagyott talajokra alkalmazható módszerével.....	82
18. táblázat: Térfogati hőkapacitás számítása Sikora & Kossowski és az MSZ EN ISO 13370:2008 szerinti módszerrel	82
19. táblázat: Térfogati hőkapacitások összehasonlítása	83
20. táblázat: Alkalmazott anyagtulajdonságok	87
21. táblázat: Tranziens szimulációhoz használt modellek paraméterei	92
22. táblázat: Tranziens VDM szimulációk eredményei.....	94
23. táblázat: Stacioner VDM szimulációk eredményei.....	94
24. táblázat: A padló U értékei és a hozzá tartozó hőszigetelő réteg vastagságok	99

25. táblázat: Anyagtulajdonságok	100
26. táblázat Korrekciós vizsgálatok eredményeinek összehasonlítása $z = 0$ m esetén	110
27. táblázat: Talajjal érintkező szerkezetek transzmissziós hőveszteségei a geometria függvényében.....	118
28. táblázat: 7/2006. TNM Rendelet szerinti eredmények.....	130
29. táblázat: Szabványos számításhoz szükséges adatok	131
30. táblázat: Szabványos számítás eredményei.....	131
31. táblázat: Tranziens modellezésen alapuló táblázatos módszer eredményei	132
32. táblázat: Eredmények összefoglalva.....	133

JELÖLÉSEK JEGYZÉKE

Latin betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
A	Terület	m^2
B'	Segédmenyiség, a padló területe és a kerület felének hányadosa	m
c_p	Fajlagos hőkapacitás, állandó nyomáson	J/kgK
C_v	Térfogati hőkapacitás	MJ/m^3K
d	Rétegvastagság	m
D	Hőszigetelő sáv hossza	m
d'	Többlet egyenértékű talajvastagság	m
d_t	Egyenértékű padlóvastagság	m
d_w	Egyenértékű falvastagság	m
H	Hővesztésgtényező	W/K
h	Hőszigetelő anyag vastagsága	m
h_{ci}	Konvekciós hőátadási tényező	W/m^2K
H_g	Talajjal érintkező szerkezet transzmissziós hővesztesége	W/K
H_T	Transzmissziós hővesztésgtényező	W/K
H_v	Szellőzési hővesztésgtényező	W/K
k	Hőátbocsátási tényező (régi jelölés)	W/m^2K
K	Kerület	m
k_l	Padló kerületére vonatkozó vonalmenti hőátbocsátási tényező	W/mK
l	Hossz	m
L_{3D}	Szimulációval számított hőveszteség	W
n	Hézagterfogat	$\%$
P_t	Hőtárolóképességet figyelembe vevő helyesbítő tényező	1
Q	Hőmennyiség, hőveszteség	W
q	Kvarctartalom	$\%$
Q_{sd}	Direkt sugárzási nyereség a standard fűtési idényben	$kWh/m^2/a$

Q_{sid}	Indirekt sugárzási nyereség a standard fűtési idényben	kWh/m ² /a
R	Hővezetési ellenállás	m ² K/W
R_f	Padlószerkezet hővezetési ellenállása	m ² K/W
R_{se}	Külső felületi (hőátadási) ellenállás	m ² K/W
R_{si}	Belső felületi (hőátadási) ellenállás	m ² K/W
R_{sz}	Szabvány szerint szigetelt peremű padlószerkezet hővezetési ellenállása (régi jelölés)	m ² K/W
R_w	Falszerkezet hővezetési ellenállása	m ² K/W
Sr	Telítettségi fok	1
t	Idő	s
T	Napi átlagos középhőmérséklet	°C
T_b	Belső hőmérséklet (régi jelölés)	°C
T_e	Külső hőmérséklet	°C
T_i	Belső hőmérséklet	°C
T_k	Külső hőmérséklet (régi jelölés)	°C
T_m	Éves átlagos középhőmérséklet	°C
T_r	Éves átlagos hőingás fele	°C
U	Hőátbocsátási tényező	W/m ² k
U_{bf}	Pincepadló hőátbocsátási tényezője	W/m ² K
U_{bw}	Pincefal hőátbocsátási tényezője	W/m ² K
U_{fal}	Külső fal hőátbocsátási tényezője	W/m ² k
$U_{lábazat}$	Lábazati fal (talajjal érintkező fal) hőátbocsátási tényezője	W/m ² k
$U_{padló}$	Padlószerkezet hőátbocsátási tényezője	W/m ² k
U_R	Rétegrendi hőátbocsátási tényező	W/m ² K
v	Szélesebbesség	m/s
V	Fűtött épülettérfogat	m ³
w	Külső (lábazati) fal vagy talajjal érintkező fal vastagsága	m
X	Az év egy adott napjának a sorszáma	1
x	Térfogatarány	%
z	A külső oldali talaj és a belső oldali padló felső síkja közötti távolság	m

Görög betűk

Jelölés	Megnevezés, megjegyzés, érték	Mértékegység
$\gamma_{c,p}$	Kerületi hossz korrekciós szorzótényező pozitív sarok esetén	1
γ_f	Padlószerkezet változás miatti korrekciós tényező	W/mK
γ_{fw}	Padlóhossz változás miatti korrekciós tényező	W/mK
γ_g	Talaj-összetétel változás miatti korrekciós tényező	W/mK
γ_{mt}	Éves átlagos középhőmérséklet változás miatti korrekciós tényező	W/mK
ε	Emissziós tényező	1
θ_e	Külső hőmérséklet átlaga az adott időszakra	°C
θ_i	Parancsolt (belső) hőmérséklet	°C
θ_w	Víztartalom	kg/kg
λ	Hővezetési tényező	W/mK
ρ	Sűrűség	kg/m ³
σ	Stefan-Boltzmann állandó (5,67x10 ⁻⁸)	W/m ² K ⁴
χ	Pontszerű hőátbocsátási tényező	W/K
Ψ	Vonalmenti hőátbocsátási tényező	W/mK
Ψ_g	Padlószerkezet és falcsatlakozásnál kialakuló hőveszteség vonalmenti hőátbocsátási tényezője	W/mK
$\Psi_{padló}$	Környezeti és helyi hatásokkal korrigált, talajjal érintkező szerkezetek vonalmenti hőátbocsátási tényezője	W/mK
Ψ_t	Vonalmenti hőátbocsátási tényező új módszer szerinti korrigálatlan (táblázatos) értéke	W/mK

1. ABSZTRAKT

Talajjal érintkező szerkezetek tranziens numerikus hőtechnikai modellezése

Nagy Balázs, CDHCL2

Konzulensek: Dr. Csanaky Judit Emília, BME Magasépítési Tanszék

Dr. Tóth Elek DLA, BME Magasépítési Tanszék

Dr. Tompai Zoltán, BME Geotechnikai Tanszék

Az elmúlt években a hazai épületenergetikai szabályozások és rendeletek követelményei folyamatosan szigorodtak, rákényszerítve a tervezőket az energiatudatos épületek tervezésére. Nem változtak azonban jelentősen az épületfizikai tervezés módszerei és számítási eljárásai, holott a jelenlegi technológiák lehetővé tennék a régebbi közelítő módszerek és táblázatok felülvizsgálatát, valamint új számítási eljárások és táblázatok kidolgozását.

Az épületek hőveszteség-számításakor jelenleg a talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségeinek figyelembevétele hordozza a legtöbb bizonytalanságot, mivel a talaj és szerkezetek anyagtulajdonságai és a folyamatosan változó külső környezeti tényezők miatt a szerkezetben többdimenziós, instacioner hőtechnikai állapotok uralkodnak.

A diplomamunkában nemzetközi szakirodalomban található, talajok hővezetési tényezőinek közelítő számítását lehetővé tevő eljárásokat három hazai talajmintán keresztül labormérési eredményekkel és az MSZ EN ISO 13370:2008 értékeivel hasonlítottam össze. A vizsgálatok alapján a talajok hővezetési tényezője a módosított Johansen módszer alkalmazásával közelíthető legjobban a magasabb homoktartalmú minták esetében, de Vries módszere pedig a magas iszap és agyag tartalmú mintánál bizonyult a legpontosabbnak. A hővezetési tényező számítására saját módszert is kidolgoztam, mellyel a homokos agyagos iszap minták esetében a mérést értékekkel közel azonos eredményeket kaptam, a jelenlegi módszereknél pontosabb becsléssel. A kutatás során a talajok térfogati hőkapacitását is vizsgáltam, és arra az eredményre jutottam, hogy a szabványos, MSZ EN ISO 13370:2008 szerinti számításhoz legközelebbi és emiatt legjobbnak mondható becslést Farouki módszerének használatával érhetjük el. A szabvány reprezentatív értékeinek használatát lehetőleg kerüljük, ha van mód talajminta beszerzésére és vizsgálatára.

A dolgozatban a jelenleg ismert és hazánkban általános számítási eljárásokat (7/2006. TNM, MSZ EN ISO 13370:2008, stacioner véges differenciámódszeres numerikus szimuláció), a tranziens VDM szimulációt és egy új, a 2013. novemberi TDK-n bemutatott tranziens közelítő eljárást és az azt alkalmazó szoftvert mutattam be. A különböző számításokkal kapott eredményeket 10 eltérő modell alkalmazásával hasonlítottam össze a hőveszteségek szempontjából, melyek között az eltérő éghajlati zónák és az épület eltérő geometriáját is vizsgáltam. Az eredmények alapján a tranziens VEM szimuláción alapuló táblázatos számítási eljárás alkalmazása adta a legpontosabb közelítést a szimulált tranziens eredményekhez.

A diplomamunka eredményei segítséget nyújthatnak az energetikailag tudatos tervezésben mind építészek, építőmérnökök vagy gépészmérnökök számára.

2. SUMMARY

Transient numerical thermal modeling of ground contact structures

Balázs Nagy, CDHCL2

Consultants: Judit Emília Csanaky PhD, BUTE Dept. of Architectural Engineering

Dr. Elek Tóth DLA, BUTE Dept. of Architectural Engineering

Zoltán Tompai PhD, BUTE Dept. of Geotechnics

In recent years, the requirements of the national building energy codes and regulations constantly tightened, forcing designers to design energy efficient buildings. However, there was no significant change in the building physics calculation methods and procedures, despite the fact that current technologies would allow the revision of the older approximate methods and tables, as well as the development of new computational methods and spreadsheets.

The buildings heat loss calculation is carried into account the heat loss of ground contact structures involves the most of uncertainties because due to the ground's and structure's material properties and the constantly changing external environmental factors there are multi-dimensional transient thermal conditions prevailing in the structure.

In the diploma work, international literature's approximate thermal conductivity calculation methods were compared through three hungarian soil samples with laboratory measurement results and the values of MSZ EN ISO 13370:2008. Based on the studies, soil's thermal conductivity can be approximated using the modified Johansen method for higher soil containing samples, and de Vries's method for the high silt and clay containing samples. For the thermal conductivity calculations I was also developed a method, which I used for sandy clay silt samples and gave almost identical results compared to the measured values, and also was more accurate then other estimations. During the research, the samples volumetric heat capacity was also investigated and come to the conclusion that Farouki's approximation is come closest to MSZ EN ISO 13370:2008 standard's estimations. The use of representative values from the standard should be avoided, if there is a possible way to obtain and examine soil samples.

In this paper the currently known and generally used domestic calculation procedures (7/2006. TNM, MSZ EN ISO 13370:2008, steady-state finite difference method numerical simulations), and the transient FDM simulation and a new method, developed for the BUTE's 2013th november Scientific Student Conference and it's software application was presented. The results obtained by these different calculation methods were compared using 10 different models examining heat losses in terms of different climatic zones and different geometry of the building. The conclusion of the research, that use of the tabulated, transient FEM based calculation method was the most accurate approach to approximate the transient FDM simulation's results. The thesis work may help in energy conscious design to architects, civil engineers and mechanical engineers.

3. BEVEZETÉS

3.1. A hőtechnikai számításokról, modellezésről

Az épületfizikai, hőtechnikai számítások során tulajdonképpen a termodinamika első főtételét, avagy az energiamegmaradás elvét alkalmazzuk a hő-transzportfolyamatok felírására azzal a különbséggel, hogy a jelenséget leíró parciális differenciálegyenlet rendszert a belső energia helyett az egyes pontok hőmérsékletére írjuk fel.

A modellezés során azonban nem minden esetben van szükségünk a teljes egyenletrendszer felírására és megoldására, mivel annak egyes komponensei egyszerűsíthetők a valóságos helyzet ismeretének függvényében, például közel azonos nyomáson működő rendszerek esetében a nyomásváltozásból eredő munkát leíró tag elhanyagolható, vagy szilárd testek hőtechnikai viselkedésének vizsgálatakor elhanyagolhatjuk a viszkózus alakváltozásból származó hatásokat, esetleg pedig a teljes folyamat időben változó természetét, azaz az instacioner állapot helyett stacioner állapotra felírva az egyenletrendszert. Természetesen az egyenletrendszert csak és kizárólag addig szabad egyszerűsíteni, míg annak megoldásával a valóság jól közelíthető marad.

Jelen kutatást, melyből e diplomamunka is született, egy a hőtechnikai számítások és modellezések során gyakran elkövetett egyszerűsítés indukálta. Bizonyos helyzetekben az épületszerkezetek esetében a rendszer állandósult állapotra történő felírása oly mértékben csorbítja az eredmények pontosságát, hogy az már megengedhetetlen a mérnöki számítások során. Ezek pedig a jelentős hőtároló kapacitással rendelkező anyagokkal érintkező struktúrák, melyek esetében a velük érintkező szilárd testek hőkapacitása és hővezetési ellenállástöbblete döntően befolyásolhatja azok hőtechnikai viselkedését, ezt a jelenséget pedig az állandósult állapotra felírt egyenletrendszer teljes mértékben elhanyagolja.

Azon épülethatároló szerkezetek esetében, ahol két oldalról csekély hőkapacitású gáz van jelen és maga a szerkezet sem bír jelentős hőtárolási képességekkel, a teljes fűtési szezonra felírt időben változó hővezetés differenciálegyenlete valóban közelíthető stacioner modellel is, az eredmények nem térnek el számottevően. Azonban könnyen belátható, hogy a talajjal érintkező szerkezeteknél, például a talajon fekvő padlószerkezet esetén, a fűtési idényben számottevő hatást fog gyakorolni a hőveszteségekre a nyáron a talajban eltárolt hőmennyiség, valamint a földünk geotermikus gradiensének hatása, azaz a föld saját hője is.

A külső hőmérséklettől függő hatások ez által egy mélyen fekvő pinceszaton később fognak jelentkezni, mint egy talajon fekvő padló esetében, de egy talajszinttől lényegesen magasabban fekvő padlóval rendelkező épület viselkedése is el fog térni.

A talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségei a szerkezetek melletti talajok hőtechnikai tulajdonságaitól is jelentősen függnének. Egy alacsonyabb hővezetési tényezővel rendelkező agyagos talaj esetén a hőveszteségek alacsonyabbak lehetnek, mint egy homokos talajjal határolt szerkezetnél. Az egyes talajok hővezetését és hőkapacitását tehát ismernünk szükséges, ha valóban pontos számítást szeretnénk végezni.

Az előbbieken említett jelenségek vizsgálhatóak és modellezhetőek, a számításokat pedig számítógépes szimulációk futtatásával, a bonyolult egyenletrendszereket numerikus közelítő módszerek segítségével megoldva lehetőségünk van a tranziens folyamatok elemzésére is. Jelenleg azonban az épületenergetikai tanúsítás vagy az épületszerkezeti tervezés során szinte elhanyagolhatóan csekély számú építész vagy mérnök dolgozik szimulációs szoftverekkel, és a szimulációt végző szakemberek is inkább választják az állandósult állapot feltételezését a tranziens elemzések helyett, melyek segítségével az épületek hőveszteségeinek meghatározása valóban pontosabbá tehető volna.

3.2. Iránymutatások

Az Európai Parlament és Tanács 2010/31/EU irányelve rögzíti, hogy az épületek számottevő befolyást gyakorolnak a hosszú távú energiafogyasztásra és a meglévő épületek hosszú felújítási ciklusára tekintettel az új és a jelentős felújítás alatt álló épületeknek eleget kell tenniük a helyi éghajlathoz igazított, energiahatékonyságra vonatkozó követelményeknek. Ilyen követelményértékeket tartalmaz a Kormány 1246/2013. (IV.30.) Korm. határozata, mely az irányelveknek megfelelően meghatározza az energiahatékonyságra vonatkozó, költségoptimalizált követelményszinteket. Ez a határozat 2015-től lép érvénybe középületek esetében, míg más rendeltetésű épületeknél 2018-ig használhatjuk a 7/2006. (V.24.) TNM Rendeletben közzétett követelményértékeket.

A követelményértékek első szintje az épülethatároló szerkezetek és nyílászáró szerkezetek hőátbocsátási tényezőjére irányul, melyek során a talajjal érintkező szer-

kezeteknek (Talajjal érintkező padló, Lábazati fal, talajjal érintkező fal...) meg kell felelniük a határozatban foglalt követelményértéknek. A szerkezetek vonalmenti hőátbocsátási tényezőire azonban nem állapítottak meg követelményértéket, annak hatása a második követelményszint esetében jelenik meg, a fajlagos hőveszteségtényező számításakor tulajdonképpen a transzmissziós hőveszteségek és a szoláris nyereségek összegének fűtött épülettérfogatra vonatkoztatott értékét viszonyítjuk egy az épület geometriai adataiból (a lehűlő belső felületek és a fűtött térfogat hányadosa) nyert követelményértékkel. A fajlagos hőveszteségtényező nem tartalmazza az épületekre szintén egyedien jellemző filtrációs hőveszteségeket, melyeket a Rendelet szerint az épületek rendeltetésének megfelelő konstansokkal kell figyelembe vennünk.

A talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségeit a Rendelet azonban nem a padló-szerkezet és a talajjal érintkező fal átlagos hőátbocsátási tényezője szerint összegzi, külön figyelembe véve a szerkezetek csatlakozásánál kialakuló hőhídjelenségek miatti hőveszteség többleteket, hanem e struktúrák veszteségeit egy táblázatban vonalmenti hőátbocsátási tényezőkben összegzi, melyeket a padló-szerkezet kerülete mentén vett hosszal szorozva megadják a padló és a csatlakozások miatt kialakuló hőveszteségeket. E táblázatos módszer, melyről bővebben is szó esik a kutatás későbbi részeiben, egyszerűsége és könnyű kezelhetősége révén iránymutatásul szolgál a vizsgálatok során, hogy hasonlóan jól kezelhető számítási módszer születhessen.

Azonban a 2010/31/EU irányelv kimondja, hogy az épületek energiahatékonyságát olyan módszer alapján kell kiszámítani, amelyet mind nemzeti, mind pedig regionális szinten differenciálni lehet, és az energiahatékonyság további javítására irányuló intézkedéseknek figyelembe kell venniük a klimatikus és helyi feltételeket. A jelenlegi Rendeletben leírt számítás viszont az ország klimatikus viszonyait teljesen egységesen kezeli, mely ez által az országunk egyes városaiban álló épületek hőveszteségeit egységesnek veszi. A konstans éghajlati adatok a hőveszteségek számításánál pontatlansághoz vezetnek, a valóságos állapotok leírásától mind távolabb kerülünk. Az épületek energetikai minőségének meghatározásánál akár 40%-al is eltérhetünk azoktól a számoktól, amiket a helyi klimatikus viszonyok és feltételek figyelembevételével számítottunk [Nagy 2011]. Lehetőséget kell találni a jelenlegi számítási módszer változtatása nélkül arra, hogy a helyi adottságokat a talajjal érintkező szerkezetek esetében figyelembe tudjuk venni.

Az iránymutatások között meg kell továbbá említeni az MSZ EN ISO 10211:2008 szabványt, mely az épületszerkezetekben előforduló hőhidak modellezésében nyújt elengedhetetlen segítséget és szabványos megoldásokat, valamint az MSZ EN ISO 13370:2008 szabványt, mely a talajjal érintkező szerkezetek hőátviteli folyamataira ad meg analitikus számítási eljárásokat, továbbá tartalmazza a különböző talajok szabványos anyagtulajdonságait. A harmonizált szabványok iránymutatásával és segítségével olyan modelleket hozhatunk létre, mely nem csupán hazai körülmények között, hanem bárhol megállja a helyét. A talajok szerkezetére és hőtechnikai tulajdonságai leírására vonatkozó fejezetek a szabványok értékes részei, noha a számítási eljárások többnyire a már említett állandósult állapotra vonatkoznak, az állandósult hőáramlás jelenségét pedig már az első hőtechnikával foglalkozó magyar nyelvű kiadvány, az Építési Zsebkönyv I. kötete is olyannak nyilvánította, mellyel „a valóságban aligha fogunk találkozni” [Möller 1934].

3.3. Célkitűzések

A diplomamunka két főbb részre bontható. Az első részben a talajok hőtechnikai paramétereinek vizsgálatát tűztem ki célul. Hazai talajminták laborvizsgálata után a talajfizikai paraméterek meghatározásával és a nemzetközi szakirodalomban fellelhető számítási módszerek valamint labormérések segítségével a talajok hővezetési tényezőjének számított és mért valamint a térfogati hőkapacitás számított eredményeit egymáshoz és az MSZ EN ISO 13370:2008 szabvány reprezentatív értékeihez hasonlítva megállapítsam, melyik módszer alkalmazása célszerű a minél pontosabb eredmények elérése érdekében.

A második részben talajjal érintkező szerkezetek modelljein keresztül bemutatom a tranziens véges differenciámódszeres numerikus hőtechnikai szimulációt, és eredményeit a stationer VDM szimulációkhoz, a 7/2006. TNM Rendelet számítási eljárásával és az MSZ EN ISO 13370:2008 szabvány módszereivel kapott eredményekhez, valamint a 2013. novemberi TDK dolgozatomban található és a diplomamunkában továbbfejlesztett tranziens közelítő módszerrel kapott eredményekhez hasonlítom, hogy megállapítsam, melyik módszer képes a leginkább pontos eredményeket adni. A modellek között eltérő éghajlati zónájú, de azonos szerkezetű, valamint eltérő geometriával rendelkező modelleket használok, hogy ezek hatását vizsgálhassam a hőveszteségek szempontjából.

4. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS, ALAPISMERETEK

4.1. Hőhidak és a vonalmenti hőátbocsátási tényező

A hőhíd a szerkezetek azon része, melynél a környező elemek átlagos hőáramához képest eltérő mértékű, többdimenziós hőáramlás alakul ki, röviden megváltozik a hőáramok gradiense. A hőhidas zónák legegyszerűbben a szerkezetek felületi hőmérsékletének megváltozásával vagy a szerkezeten belül haladó izoterma vonalak egymáshoz viszonyított iránytangensének változásával ismerhetőek fel. [Nagy 2013a]

A hőhidakat az épületfizikai és energetikai számítások során vonalmenti- vagy pontszerű hőátbocsátási tényezőkkel vesszük figyelembe. A vonalmenti hőátbocsátási tényezők egy méter hosszon egy Kelvin (egyensúlyi) hőmérsékletkülönbség esetén adják meg azt a hőmennyiség többletet, amely egy hőhíd miatt (legyen az geometriai-, anyagdifferencia miatti-, konvektív- vagy környezeti eltérések miatti hőhíd) az adott felület vagy csatlakozó felületek átlagos hőátbocsátásán felül kialakul. A vonalmenti hőátbocsátási tényező kétdimenziós hőáramlás legalább esetén értelmezhető, és ez a tényező a hazai gyakorlatban akkor is alkalmazott, ha egy felület (pl. pincepadló) hőveszteségeit egy egységnyi hosszúságú vonalra (pl. a padlóélre) redukáljuk.

A pontszerű hőátbocsátási tényező esetében a hőmennyiség többlet háromdimenziós modell alkalmazásával határozható meg, mely egy adott szerkezetnek a vonalmenti hőátbocsátási tényezőjén felüli hőmennyiségeket tartalmazza egy Kelvin (egyensúlyi) hőmérsékletkülönbség esetén.

Meg kell említeni továbbá, hogy a hőhidakat a hazai (és pl. a Svéd) gyakorlatban a belső felületek alapján és a belső méretek szerint számítjuk.

4.2. A hővezetés differenciálegyenlete

A szakdolgozat keretein belül a hőtechnikai szimulációkat az adott csomóponti modellekre felírt, izotróp szilárd testekre vonatkozó hővezetési feladatok számítógépes megoldására korlátoztam. Ezzel az egyszerűsítéssel a valós jelenségek stilizálása történik, azonban ennél részletesebb modellek megalkotására az alkalmazott szoftverek nagy részével nem lett volna lehetőség. A teljesség kedvéért azonban a stacioner hővezetés differenciálegyenletéig (bár röviden leírva) a teljes, háromdimenziós, tranziens hőáramlás differenciálegyenletén keresztül jutunk el.

4.2.1. A TRANZIENS HŐVEZETÉS DIFFERENCIÁLEGYENLETÉNEK LEVEZETÉSE

A hőáramlás differenciálegyenlete a termodinamika első főtétele, avagy az energiamegmaradás elve alapján U (x,y,z,t) belső energiára történő felírást jelenti, azonban a szimulációk során az egyszerűbben értelmezhető T(x,y,z,t) hőmérsékletre történő felírasmódot alkalmazzuk. A teljes egyenlet folyadék közegre és az x,y,z koordinátákkal megadott, „t” időben változó T(x,y,z,t) abszolút hőmérsékletre felírva, a differenciálegyenlet rövidítése gyanánt pedig alkalmazva ∇ operátort¹:

$$-(\nabla \cdot q_i) + \tau : S - \frac{T}{\rho} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial T} \bigg|_p \left(\frac{\partial p}{\partial t} + (v \cdot \nabla) \cdot p \right) + Q = c_p \cdot \rho \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial t} + (v \cdot \nabla) \cdot T \right) \quad (1)$$

ahol:	q_i	Hőáramok [W/m ²]
	τ	Viszkózus feszültség tenzor [Pa]
	S	Alakváltozási sebességtenzor [1/s]
	T	Abszolút hőmérséklet [K]
	ρ	Sűrűség [kg/m ³]
	p	Nyomás [Pa]
	v	Sebességvektor [m/s]
	Q	Hőforrások, eltérően a viszkózus melegedéstől [W/m ³]
	c_p	Állandó nyomáson vett fajlagos hőkapacitás [J/kgK]

Vezessük be a Fourier-féle hővezetési törvény egyenletét a konduktív hőáramok leírásához:

$$q_i = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (2)$$

¹ Nabla elsőrendű vektoriális differenciáloperátor, $\nabla = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix}$

ahol: λ Hővezetési tényező² [W/mK]

Behelyettesítve (2) egyenletet valamint elhanyagolva a viszkózus melegedést és a nyomás okozta munkát (1)-be, valamint zérus sebességvektor esetén kapjuk a szilárd testekre vonatkozó tranziens hővezetés differenciálegyenletét:

$$\nabla(\lambda \cdot \nabla T) + Q = c_p \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

Az egyenlet tovább egyszerűsíthető, ha bevezetjük

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \quad (4)$$

hődiffuzitást (egyes hazai forrásokban hőmérséklet-vezetési tényező), majd behelyettesítjük (3)-ba. Sok esetben Q zérus (pl. sem külső, sem belső hőfejlődés nincs), valamint a (4)-es egyenlet során feltételeztük, hogy az anyag minden irányban azonos hővezetési tulajdonságokkal rendelkezik, így az egyenlet

$$\alpha \cdot \nabla^2 T = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

alakúra egyszerűsödik.

4.2.2. A STACIONER HŐVEZETÉS DIFFERENCIÁLEGYENLETE

A dolgozat keretén belül bemutatott jelenleg alkalmazott, talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségeinek meghatározására szolgáló számítási módszerek többsége stacioner, azaz állandósult állapotot feltételezve számítják a hőveszteségeket. Emiatt elengedhetetlen, hogy a stacioner hővezetés differenciálegyenlete is bemutatásra kerüljön, melyet az előbbi egyenlet további egyszerűsítésével kaphatunk meg. Állandósult állapotban a hőmérsékletmező állandó, így a (3)-as egyenlet jobb oldala zérus. A

²A hővezetési tényező szilárd testek esetében anizotróp is lehet, ez esetben a hővezetési tényezőt $\lambda = \begin{bmatrix} \lambda_{xx} & \lambda_{xy} & \lambda_{xz} \\ \lambda_{yx} & \lambda_{yy} & \lambda_{yz} \\ \lambda_{zx} & \lambda_{zy} & \lambda_{zz} \end{bmatrix}$ tenzorral definiáljuk, és a konduktív hőáramokat $q_i = -\sum_j \lambda_{ij} \frac{\partial T}{\partial x_j}$ egyenlettel adhatjuk meg.

Q hőforrásokat továbbra is zérusnak véve az alábbi formulát kapjuk végül, mely a stationer hővezetés differenciálegyenlete:

$$\nabla(\lambda \cdot \nabla T) = 0 \quad (6)$$

Természetesen abban az esetben, ha minden irányban azonos hővezetési tényezővel rendelkező anyagok esetében írjuk fel a differenciálegyenletet, a következő formulát alkalmazhatjuk:

$$\lambda \cdot \nabla^2 T = 0 \quad (7)$$

4.2.3. PEREMFELTÉTELEK

Az hővezetés differenciálegyenletének megoldásához definiálnunk kell a modellezett szilárd testek határainál fellépő hatásokat, megkötéseket.

Alkalmazhatunk meghatározott hőmérsékletet a peremen, mely esetében annak T hőmérsékletét kell előre definiálnunk.

Megadhatjuk továbbá a peremfeltételt úgy is, ha meghatározzuk az ott ható hőáramokat. Ez esetben a hőáramokat a peremre normálvektorával párhuzamos irányban kell megadni, illetve a numerikus módszerek a megadott hőáramokat ezen irányokba fogják transzformálni. Hővezetési feladat esetében ez

$$q_0 = n \cdot \lambda \cdot \nabla T \quad (8)$$

befelé irányuló hőáramot jelent, ahol n a perem normálvektorát jelöli.

A hőáramokat szilárd test és az azzal érintkező levegő határán általában az adott anyag felületén értelmezett h [W/m²K] hőátadási tényező (vagy a hatályos európai szabványoknak megfelelően a hőátadási tényező reciprokával jellemezve, R_s [m²K/W]) felületi ellenállásként) és a felület melletti hőmérséklet segítségével definiálhatjuk. Ez esetben a befelé irányuló hőáramok:

$$q_0 = h \cdot (T - T_s) = \frac{1}{R_s} \cdot (T - T_s) \quad (9)$$

ahol T a környező tér megkötött hőmérséklete, T_s pedig a felületen mérhető hőmérsékletet jelenti, melyek között a hőátadási tényező teremti meg a kapcsolatot. Alap esetben a hőátadási tényező nem csak a hőátadási jelenséget leíró tagot (h_c) tartalmazza, hanem a hőszugárzást leíró tagot (h_r) is. Egyes szimulációs szoftverekben lehetőségünk van azonban külön is definiálni a hőszugárzást, mint peremfeltételt, ez esetben az ezt leíró egyenlet az ideális szürke test modell alapján (az abszorpció tényező egyenlő az emissziós tényezővel) az alábbi egyenlettel adható meg:

$$q_0 = \varepsilon \cdot (G - \sigma \cdot T^4) \quad (10)$$

ahol: ε Emissziós tényező
 G Besugárzás [W/m^2]
 σ Stefan-Boltzmann állandó [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$]

A modellezett szerkezetek esetében az anyagváltások peremén a hőáramoknak folytonosnak kell lenniük, ez abban az esetben is teljesül, ha a felületek között úgynevezett kontaktellenállás, R_k [$\text{m}^2\text{K/W}$] is fellép. Ekkor a felületre normálirányban ható hőáramok mindkét anyag irányából meg kell, hogy egyezzenek a két felületi hőmérséklet különbségének a kontaktellenállással vett hányadosával.

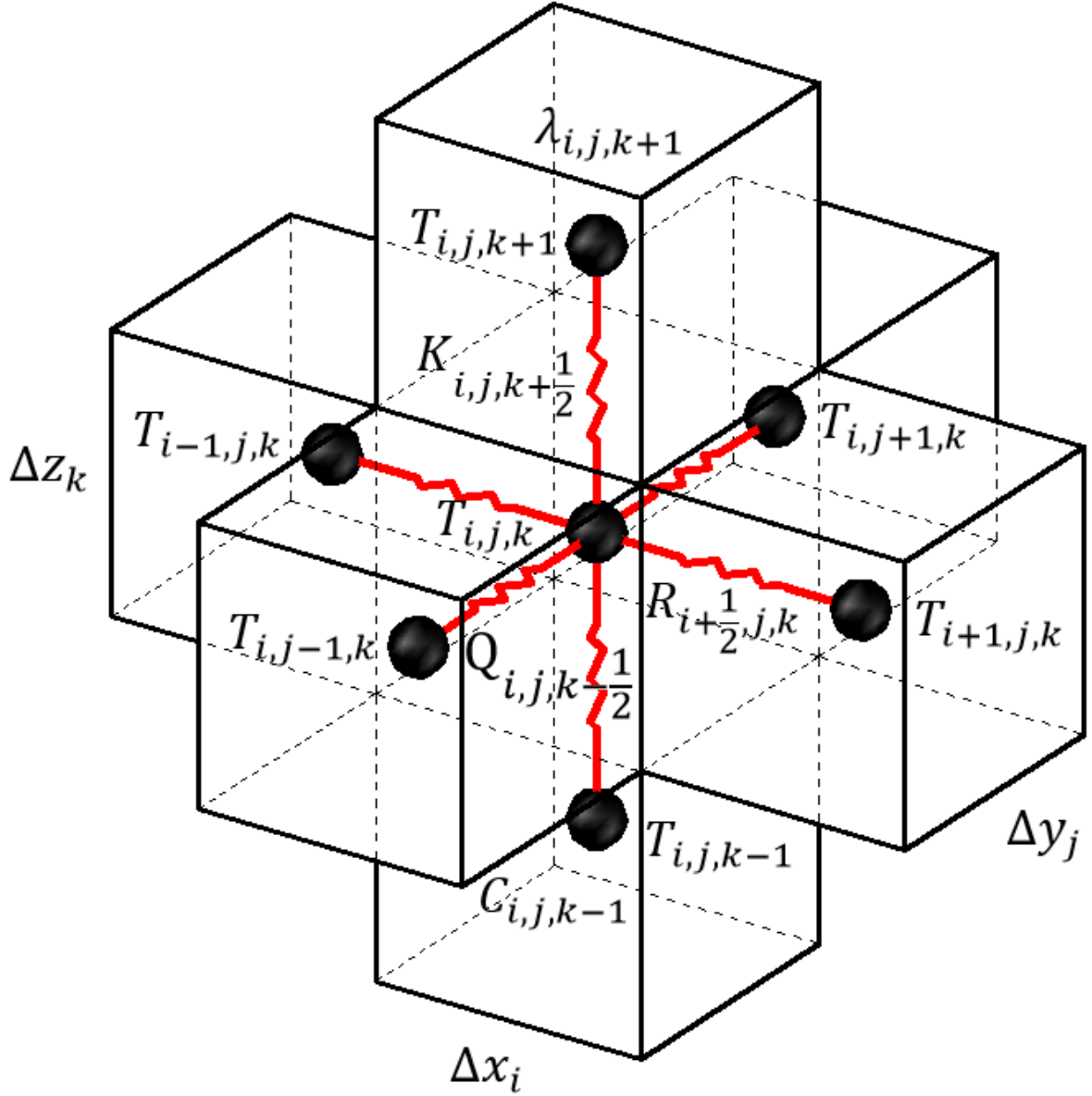
4.3. A háromdimenziós hővezetési feladat megoldása véges differenciámódszerrel

4.3.1. TRANZIENS ESET

Legyen a háromdimenziós, Δx_i , Δy_j , Δz_k élhosszú cellákban t [s] időpillanatban egy meghatározott hőmérséklet és az (i,j,k) cellában annak energiatartalmát reprezentáló hőmérséklet $T_{i,j,k}$ a cellára jellemző hővezetési tényezőt $\lambda_{i,j,k}$ -val, a térfogatra vonatkoztatott hőkapacitását pedig $C_{i,j,k}$ -val jelöljük.

Az 1. ábrán láthatóak az egyes cellák hőmérsékletei. Továbbá ebben az időpillanatban az (i,j,k) cellába a szomszédos cellákból $Q_{i-1/2,j,k}$, $Q_{i+1/2,j,k}$, $Q_{i,j-1/2,k}$, $Q_{i,j+1/2,k}$, $Q_{i,j,k-1/2}$, $Q_{i,j,k+1/2}$ hőáramok [W] érkeznek. Az 1. ábrán az $(i,j,k-1)$ jelölésű cellából

az (i,j,k) cellába áramló $Q_{i,j,k-1/2}$ hőáram van feltüntetve, melyet a következő egyenlettel számíthatunk:



1. ábra: A háromdimenziós véges differenciámódszer ábrázolása

Az 1. ábrán az $(i,j,k-1)$ jelölésű alsó cellába az (i,j,k) középső cella irányából áramló $Q_{i,j,k-1/2}$ hőáram van feltüntetve, melyet a következő egyenlettel számíthatunk, ahol $K_{i,j,k-1/2}$ [W/K] az egy kelvin hőmérsékletkülönbség hatására átáramló konduktív hőmennyiséget jelenti, melyet hő-vezetőképességnek is nevezhetünk:

$$Q_{i,j,k-\frac{1}{2}} = K_{i,j,k-\frac{1}{2}} \cdot (T_{i,j,k} - T_{i,j,k-1}) \quad [\text{W}]$$

(11)

Az egyes cellák közötti hő-vezetőképességet, például az 1. ábrán jelölt $(i,j,k+1)$ felső és (i,j,k) középső cella közötti $K_{i,j,k+1/2}$ -el jelöltet, a következő módon számíthatjuk:

$$K_{i,j,k+1/2} = \frac{\Delta x_i \cdot \Delta y_j}{\frac{\Delta z_k}{2 \cdot \lambda_{i,j,k}} + \frac{\Delta z_{k+1}}{2 \cdot \lambda_{i,j,k+1}} + R_{i,j,k+1/2}} \quad [\text{W/K}] \quad (12)$$

Az egyenletben szereplő $R_{i,j,k+1/2}$ a két cella közötti felületen kialakuló kontaktellenállást $[\text{m}^2\text{K/W}]$ jelenti.

Képzeli el, hogy az 1. ábrán látható $R_{i+1/2,j,k}$ most nem kontaktellenállást jelöl, hanem a perem felületi (hőátadási) ellenállását, tehát az $(i+1,j,k)$ cellát eltüntettük. Ekkor a hő-vezetőképesség, mellyel a $(i+1/2,j,k)$ perem hőmérséklete is meghatározható:

$$K_{i+1/2,j,k} = \frac{\Delta y_j \cdot \Delta z_k}{\frac{\Delta x_i}{2 \cdot \lambda_{i,j,k}} + R_{i+1/2,j,k}} \quad [\text{W/K}] \quad (13)$$

Az (i,j,k) középső cella teljes hőmennyiségének leírásához bevezetjük $H_{i,j,k-t}$, mely most mind a hat környező cellából áramló hőmennyiséget tartalmazza:

$$\begin{aligned} H_{i,j,k} = & K_{i-1/2,j,k} \cdot (T_{i-1,j,k} - T_{i,j,k}) + K_{i+1/2,j,k} \cdot (T_{i+1,j,k} - T_{i,j,k}) + K_{i,j-1/2,k} \\ & \cdot (T_{i,j-1,k} - T_{i,j,k}) + K_{i,j+1/2,k} \cdot (T_{i,j+1,k} - T_{i,j,k}) + K_{i,j,k-1/2} \\ & \cdot (T_{i,j,k-1} - T_{i,j,k}) + K_{i,j,k+1/2} \cdot (T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}) \quad [\text{W}] \end{aligned} \quad (14)$$

Határozzuk meg a tranziens véges differenciámódszer során alkalmazandó stabil Δt időlépést, melyet a következő stabilitási kritérium kielégítésével kaphatunk meg:

$$\Delta t < C_{i,j,k} \cdot \frac{\Delta x_i \cdot \Delta y_j \cdot \Delta z_k}{\sum K_{i,j,k}} \quad (15)$$

amely egyenletben $\Sigma K_{i,j,k}$ tartalmazza a teljes rendszer összes hő-vezetőképességét a cellák között és teljesül minden i, j és k -ra.

Ha a következő Δt időlépés során az (i,j,k) középső cellával szomszédos $(i+1,j,k)$, $(i,j+1,k)$ és $(i,j,k+1)$ cellákból hő áramlik a középső cellába, akkor az áramló hőmennyiségekkel csökkentjük a szomszédos cellák teljes hőmennyiségét:

$$H_{i+1,j,k}^{\acute{u}j} = H_{i+1,j,k} - K_{i+\frac{1}{2},j,k} \cdot (T_{i+1,j,k} - T_{i,j,k}) \quad [W] \quad (16)$$

$$H_{i,j+1,k}^{\acute{u}j} = H_{i,j+1,k} - K_{i,j+\frac{1}{2},k} \cdot (T_{i,j+1,k} - T_{i,j,k}) \quad [W] \quad (17)$$

$$H_{i,j,k+1}^{\acute{u}j} = H_{i,j,k+1} - K_{i,j,k+\frac{1}{2}} \cdot (T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}) \quad [W] \quad (18)$$

és természetesen növeljük a környező cellákból kivont hőmennyiségekkel a középső cellát:

$$H_{i,j,k}^{\acute{u}j} = H_{i,j,k} + K_{i+\frac{1}{2},j,k} \cdot (T_{i+1,j,k} - T_{i,j,k}) + K_{i,j+\frac{1}{2},k} \cdot (T_{i,j+1,k} - T_{i,j,k}) + K_{i,j,k+\frac{1}{2}} \cdot (T_{i,j,k+1} - T_{i,j,k}) \quad [W] \quad (19)$$

Végezetül pedig a következő időlépés elkezdéséhez a cellák új hőmérsékleteit is meg kell határoznunk, tekintsük ezért (i,j,k) középső cella új hőmérsékletének számítását:

$$T_{i,j,k}^{\acute{u}j} = T_{i,j,k} \cdot \frac{\Delta t}{C_{i,j,k} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta y_j \cdot \Delta z_k} \cdot H_{i,j,k}^{\acute{u}j} \quad [^{\circ}C] \quad (20)$$

4.3.2. STACIONER ESET, A FELSŐ RELAXÁCIÓS MÓDSZER ALKALMAZÁSA

Stacioner állapotban ahhoz, hogy definiálni tudjuk a középső cella hőmérséklet-változását, meg kell határoznunk a cella $C_{i,j,k}$ térfogatra vonatkozó hőkapacitásának értékét. Mivel stacioner állapotban a cellák hőkapacitása nem játszik szerepet (ez által a megadásuk sem szükséges), ezeket az értékeket azért állítjuk elő, hogy az iterációs folyamatban minden cellában meghatározzák a stabil iterációs lépésközt. A térfogati hőkapacitást úgy kapjuk, hogy a tranziens esetben stabilitási feltételül szolgáló egyenletet egyenlővé tesszük Δt -vel és átrendezzük $C_{i,j,k}$ -ra:

$$C_{i,j,k} = \Delta t \cdot \frac{\sum K_{i,j,k}}{\Delta x_i \cdot \Delta y_j \cdot \Delta z_k} \quad \left[\frac{\text{J}}{\text{m}^3 \text{K}} \right] \quad (21)$$

A középső (i,j,k) cellába belépő elosztatlan hőáramok megváltoztatják a cella $T_{i,j,k}$ hőmérsékletét, melyet a következő egyenlettel írhatunk fel:

$$T_{i,j,k}^{\text{új}} = T_{i,j,k} \cdot \frac{\Delta t \cdot \omega}{C_{i,j,k} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta y_j \cdot \Delta z_k} \cdot H_{i,j,k}^{\text{új}} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (22)$$

ahol ω a felső relaxációs tényező, $2,0 > \omega > 1,0$.

A lineáris egyenletrendszereket tehát a Gauss-Seidel iteráció egyik variációjával, a felső relaxációs módszerrel oldhatjuk meg stacioner állapotban, az eljárás ugyanis lényegesen gyorsabban konvergál az eredeti módszernél. Az optimalizált felső relaxációs tényező értéke általában 1,8 és 2,0 közötti. Blomberg [1996] kutatása alapján a felső relaxációs tényező alkalmazásával az iterációs eljárás az alkalmazott modelltől, cellaszámtól és megállási kritériumtól függően 1/10-ed és 1/50-ed idő alatt futott le, mintha az ω -t 1,0-ra vettük volna fel, mert ez esetben gyakorlatilag a Gauss-Seidel eljárást végezzük el. A javasolt felső relaxációs tényező értéke 1,95.

Mivel a numerikus módszerek során a valódi függvényértéket nem ismerjük, állandósult állapotban az iterációs eljárást addig folytatjuk, míg az általunk előre megadott megállási feltétel (ez lehet például az elosztatlan hőmennyiségek okozta relatív hiba) nem teljesül, tehát a cellák hőmérsékletei vagy a hőáramok nem változnak jelentősen.

4.4. Talajok hőtechnikai tulajdonságai

A talajokban lejároló hőátadási transzportfolyamatok összetett fizikai jelenségek kombinációjaként zajlanak le, melyek ismerete elengedhetetlen a jelenség leegyszerűsítéséhez. A jelenségeket Sterling [1992] foglalta össze, mely alapján megkülönböztethetünk a következő jelenségeket:

- Hővezetés:
 - A talajszemcsék között
 - A talajok üregeiben/hézagokban lévő víz vagy jég között
 - A talajok üregeiben/hézagokban lévő párás levegő között
 - Kontaktellenállás a talajszemcsék körül és találkozásuknál
- Hőáramlás:
 - Konvekció a talaj pórusaiban víz vagy levegő által
 - Advekció a talaj pórusaiban víz vagy levegő által
- Hőszugárzás:
 - Sugárzás a talajok üregeiben/hézagokban
- Anyagtranszport:
 - Nedves levegő és víz transzportja annak hőtartalmával együtt a külső víz- és/vagy párányomás különbség, a gravitáció és a nedves levegő vagy víz termikus áramlása miatt
- Fázisváltás:
 - Az elpárolgás vagy fagyás miatti látens hő tárolása vagy leadása.

A fentiekben összefoglalt jelenségek együttes figyelembevétele egy hőtechnikai szimuláció során jelenleg még nem megoldott. A jelenségeket jelenleg leegyszerűsítve és összevonva egy differenciálegyenletben leírva számíthatjuk annak megoldásával, és így akár megfelelő pontosságú számításokat is végezhetünk.

Ahhoz, hogy a talajjal érintkező szerkezeteken keresztül eláramló energiamennyiséget a tranziens hővezetés egyenletének segítségével megoldhassuk, ismernünk kell az adott szerkezet melletti talaj hőmérséklet-vezetési tényezőjét. Tranziens esetben tehát nem elegendő a pincefal vagy aljzat alatti talajréteg hővezetési tényezőjének ismerete, szükséges ismernünk a térfogatsűrűséget valamint a fajlagos hőkapacitást is, melyek szorzatai adják a talajok térfogati hőkapacitását.

Az MSZ EN ISO 13370:2008 szabvány 1-es táblázata és G melléklete alapján a következő táblázatban összefoglalva megtalálhatjuk a talajok szabványos hőtechnikai tulajdonságait:

Talajtípus	Száraz térfogat- sűrűség ρ kg/m ³	Nedvesség- tartalom u kg/kg	Telített- ségi fok %	Hővezetési tényező λ W/mK	Reprezentatív térfogati hőkapacitás C_v MJ/m ³ K	Reprezentatív hővezetési tényező λ W/mK
Iszap	1400 - 1800	0,10 - 0,30	70 - 100	1,0 - 2,0	3,0	1,5
Agyag	1200 - 1600	0,20 - 0,40	80 - 100	0,9 - 1,4	3,0	1,5
Tőzeg	400 - 1100	0,05 - 2,00	0 - 100	0,2 - 0,5	-	-
Száraz homok	1700 - 2000	0,04 - 0,12	20 - 60	1,1 - 2,2	2,0	2,0
Nedves homok	1700 - 2100	0,10 - 0,18	85 - 100	1,5 - 2,7	2,0	2,0
Kőzet	2000 - 3000	< 0,03	-	2,5 - 4,5	2,0	3,5

1. táblázat: Talajok hőtechnikai tulajdonságai az MSZ EN ISO 13370:2008 táblázatai alapján

Az 1. táblázat alapján látható, hogy a jelenleg érvényes szabvány bár megad értéktartományokat az egyes talajtípusok hővezetési tényezőire, de nem ad meg konkrét értékeket. A szabvány alapján a számítások során u.n. reprezentatív hővezetési tényezőket alkalmazhatunk. A térfogati hőkapacitás esetén a táblázatban feltüntetett értékek szintén reprezentatív értékek. A táblázatban nem szerepel a kavicsok hőtechnikai tulajdonságai, melyek azonban reprezentatív értékét tekintve a szabvány alapján meg egyeznek a homokoknál feltüntetett értékekkel.

A talajok részletesebb hőtechnikai vizsgálatához szükséges áttekinteni a nemzetközi irodalomban fellelhető mérési vagy számítási módszereket, melyek közül a következő oldalakon a szükséges két hőtechnikai anyagjellemzőnek a meghatározására alkotott módszerek közül a későbbiekben is alkalmazott három-három módszert tekintjük át.

4.4.1. HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ MEGHATÁROZÁSA

4.4.1.1. De Vries módszer

Porózus közegek hővezetési tényezőjének meghatározására de Vries 1952-ben publikált képletét alkalmazhatjuk, mely esetében a kétfázisú talaj szilárd, ellipszoid részecskéi a folyadék fázisban egységesen eloszlva (diszpergáltan) helyezkednek el

[Fricke et al. 1992]. 1963-ban publikált módszerében pedig már a levegő részarányát és hővezetési tulajdonságát is figyelembe veszi, mely képlet „k” helyett a jelenleg is alkalmazott „λ” hővezetési tényező jelöléssel:

$$\lambda = \frac{x_a \cdot \lambda_a + x_f \cdot \lambda_f + F \cdot x_s \cdot \lambda_s}{x_a + x_f + F \cdot x_s} \quad \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (23)$$

ahol „x_a”, „x_f” és „x_s” a levegő, a folyadék és a szilárd rész térfogatarányát jelöli, „λ_a”, „λ_f” és „λ_s” a talajösszetevők hővezetési tényezői, „F” pedig a szilárd frakció hatását leíró tényező. Az „F” tényezőt Westermann [2010] alapján a következőképpen, a talajszemcséket gömbölyűnek feltételezve egyszerűen is meghatározhatjuk:

$$F = \left[1 + \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{\lambda_n}{\lambda_c} - 1 \right) \right]^{-1} \quad [-] \quad (24)$$

ahol „λ_n” az adott frakció hővezetési tényezőjét jelöli, „λ_c” pedig Campbell és kutatótársainak 1994-es javaslata alapján a nem fagyott talajok esetében a szemcséket kitöltő folyamatos fázis hővezetési tényezője. Az eredeti de Vries módszer alapján ez a folyadékfázis hővezetési tényezőjét jelöli, azonban a Westermann-féle számítási változatban, ha a talajt kitöltő folyamatos közeg levegő-domináns, akkor a levegő hővezetési tényezőjét kell „λ_c”-ként figyelembe vennünk. Ez azonban már azt feltételezi, hogy a talaj nem kétfázisú, így közölt hővezetési tényező meghatározására szolgáló összefüggésben a levegő fázist is fel kell tüntetnünk, ahogyan ezt a (23)-as képletben tettük.

Farouki [1981] monográfiájában az addigi módszereket validálva a nem fagyott talajok esetében a de Vries módszert a durvaszemcsés talajok esetében 0,1-0,2-es telítettségi fokig valamint telített esetben, míg finomszemcsés talajok esetében csak telített esetben találta pontosnak. 0,2-es telítettségi fok felett valamint finomszemcsés talajok esetében a következőekben bemutatott, Johansen [1975] módszert javasolta alkalmazni az általa tett módosításokkal.

4.4.1.2. Módosított Johansen módszer

Johansen módszerénél a talaj hővezetési tényezőjét a száraz talaj és a telített talaj hővezetési tényezőjének kombinációjaként számíthatjuk, ahol súlyszámként alkalmazzuk a „K_e” jelölésű Kersten számot. Az aktualizált összefüggés „k” helyett „λ” jelöléseket alkalmazva:

$$\lambda = (\lambda_{sat} - \lambda_{dry}) \cdot K_e + \lambda_{dry} \quad \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (25)$$

A képletben szereplő tényezők számítására Johansen ugyancsak összefüggéseket határozott meg. A természetes talajok „ λ_{dry} ” száraz hővezetési tényezőjét a következő összefüggés segítségével határozhatjuk meg:

$$\lambda_{dry} = \frac{0,135 \cdot \gamma_d + 64,7}{2700 - 0,947 \cdot \gamma_d} \quad \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (26)$$

Az összefüggésben szereplő 2700-as szám a szilárd ásványok átlagos 2700 kg/m³-es sűrűségére utal. A „ λ_{sat} ” telített hővezetési tényező nem fagyott talajok esetében függ „ n ” hézagterfogatától, „ q ” kvarc tartalomtól és az egyéb ásványi összetevőktől:

$$\lambda_{sat} = 0,57^n \cdot (\lambda_{quartz}^q \cdot \lambda_o^{1-q})^{1-n} \quad \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (27)$$

Az összefüggésben 0,57 (W/mK) a víz hővezetési tényezője, „ λ_{quartz} ” a kvarc kristály hővezetési tényezője $\lambda_{quartz} = 7,7$ W/mK, más források³ azonban 10°C-os hőmérséklet esetében 8,8 W/mK-es hővezetési tényezőt ajánlanak. Az egyéb ásványi összetevők hővezetési tényezője $q > 0,2$ esetén $\lambda_o = 2,0$ W/mK, különben $\lambda_o = 3,0$ W/mK.

Az egyes talajok kvarctartalmát az alábbi táblázat tartalmazza:

Talajtextúra	Kvarctartalom [%]	Talajtípus	Kvarctartalom [%]
Homok	92	Agyagos vályog	35
Vályogos homok	82	Iszapos vályog	25
Homokos vályog	60	Agyag	25
Homokos agyagos vályog	60	Iszapos agyag	10
Homokos agyag	52	Iszapos agyagos vályog	10
Vályog	40	Iszap	10

2. táblázat: Talajok ajánlott kvarctartalma Peters-Lidard et al. [1998] alapján

³ Usowicz & Usowicz [2004] szerint a kvarc hővezetési tényezője a „ $\lambda_q = 9.103 - 0.028 \cdot T$ ” összefüggéssel határozható meg, ahol „ T ” a kvarc hőmérséklete °C-ban. Farouki [1981] pedig Van Wijk 1963-as kutatása alapján 8,4 W/mK-t ad meg 20 °C-on és 1 ATM nyomáson.

A Kersten számot meghatározó egyenletben a nem fagyott talajok esetében az egyedüli változó az „ S_r ” telítettség fok. A képlet durvaszemcsés talajok esetén, ha $S_r > 0,05$:

$$K_e = 0,7 \cdot \log(S_r) + 1,0 \quad [-] \quad (28)$$

és finomszemcsés talajok esetében, ha $S_r > 0,1$:

$$K_e = \log(S_r) + 1,0 \quad [-] \quad (29)$$

A talajok durva- vagy finomszemcsés voltát Farouki [1981] alapján úgy határozhatjuk meg, hogy ha az adott talaj esetében a szemeloszlást vizsgálva 5%-nál több 2 μm -nél (0,002 mm-nél) kisebb szemcse található, a talaj finomszemcsésnek minősül.

4.4.1.3. Endrizzi módszer

Az előző módszerekben az egyes talajalkotókat különböző súlysúlyszámokkal szoroztuk. Endrizzi et al. [2011] által leírt módszerrel lényegesen egyszerűbben, az alábbiakban bemutatott módon számolhatunk („ k ” helyett itt is „ λ ” jelölést alkalmazva):

$$\lambda = \left(\sum_i x_i \cdot \sqrt{\lambda_i} \right)^2 \quad \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (30)$$

ahol „ i ” index a különböző talajösszetevőket jelöli, „ x ” a térfogategységre vonatkoztatott arány. Az egyes talajösszetevők hőtechnikai tulajdonságait a következő táblázat tartalmazza:

Talajösszetevők	Sűrűség, ρ [kg/m ³]	Fajlagos hőkapacitás, c_p [J/kgK]	Térfogati- hőkapacitás, C_v [MJ/m ³ K]	Hővezetési tényező, λ [W/mK]
Kvarc	2660	800	2,13	8,80
Szilárd ásványok	2650	900	2,39	2,92
Szerves anyag	1300	1920	2,50	0,25
Víz (10 °C)	1000	4190	4,19	0,60
Jég (0 °C)	900	2000	1,80	2,20
Levegő	1,23	1008	0,0012	0,025

3. táblázat: Talajösszetevők hőtechnikai tulajdonságai az MSZ EN ISO 10456:2008 és Farouki 1981-es gyűjtése alapján.

4.4.1.4. Laborméréssel

Laborkörülmények között a száraz vagy nedves talajminta hővezetési tényezőjét segédűtőlapos berendezéssel az MSZ EN 12664:2001 szabvány alapján vizsgálhatjuk. A szabvány alapján 2,0 W/mK-es hővezetési tényezőig vizsgálhatunk anyagokat a segédűtőlapos berendezéssel, melyek hővezetési ellenállása nem kisebb, mint 0,1 m²K/W.

A mérési korlátok miatt a megfelelő (mérhető) talajminták kiválasztása szükséges lesz a vizsgálatok során.

4.4.2. FAJLAGOS HŐKAPACITÁS MEGHATÁROZÁSA

4.4.2.1. De Vries módszer

A térfogatra vetített hőkapacitást (C) az alábbi empirikus egyenlettel adta meg de Vries [1963], mely a jelenleg alkalmazott MJ/m³K mértékegységre váltva a következő:

$$C_v = 2,0 \cdot x_s + 2,51 \cdot x_o + 4,19 \cdot x_w \quad \left[\frac{MJ}{m^3 K} \right] \quad (31)$$

ahol az „x_s” a szilárd alkotórészek térfogataránya, az „x_o” a szerves alkotórészek térfogataránya és az „x_w” a víz térfogataránya a talajban.

4.4.2.2. Farouki módszer

Farouki 1981-ben publikált monográfiájában a következő formulát alkalmazza a talajok térfogat-kapacitásának számítására:

$$C_v = x_s \cdot C_s + x_w \cdot C_w + x_a \cdot C_a \quad \left[\frac{MJ}{m^3 K} \right] \quad (32)$$

ahol „x_s”, „x_w” és „x_a” a szilárd, víz és levegő alkotórészek térfogataránya, és „C_s”, „C_w” és „C_a” pedig az egyes alkotórészek térfogategységre vonatkoztatott hőkapacitása, mely értékek a 2. táblázatban találhatóak. A De Vries módszerhez képest látható, hogy elhanyagolja a talajok szervesanyag-tartalmát, azonban a talajban található levegő hőkapacitásával számol.

A nem fagyott illetve fagyott talajokra egy másik összefüggést is ismertet, melyek a következők:

$$C_{v,U} = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot (0,18 + 1,0 \cdot \frac{w}{100}) \cdot C_w \quad [\frac{MJ}{m^3 K}] \quad (33)$$

$$C_{v,F} = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot (0,18 + 0,5 \cdot \frac{w}{100}) \cdot C_w \quad [\frac{MJ}{m^3 K}] \quad (34)$$

ahol „ $C_{v,U}$ ” a nem fagyott és „ $C_{v,F}$ ” a fagyott talajok térfogatra vetített hőkapacitása, „ γ_d ” az adott talaj száraz térfogatsúlya, „ γ_w ” a víz térfogatsúlya és „ w ” pedig a minta víztartalma százalékban.

4.4.2.3. Sikora & Kossowski módszer⁴

A kutatók 1993-ban publikált összefüggése a J-ból MJ-ba történő átváltás miatti 10^6 -onnal osztva a következő:

$$C_v = \frac{(c_s + 4,19 \cdot 10^3 \cdot \theta_w) \cdot \rho}{10^6} \quad [\frac{MJ}{m^3 K}] \quad (35)$$

ahol „ c_s ” a szilárd talajok fajlagos hőkapacitása (713 J/kgK), „ θ_w ” a talaj víztartalma kg/kg-ban és „ ρ ” a talaj száraz térfogatsűrűségét jelöli. A $4,19 \cdot 10^3$ –os szorzó víz fajhője.

4.5. A talajjal érintkező szerkezetek hőtechnikai számítási eljárásainak bemutatása

Ahhoz, hogy összefüggésükben átláthassuk és megérthessük a talajjal érintkező szerkezetekre vonatkozó jelenlegi hőtechnikai számítási módszereket, melyeket az épületenergetikusok alkalmaznak ezeknek a szerkezeteknek a hőveszteségeinek meghatározásához, nem árt megismerni a nemzetközi szakirodalmakban publikált módszereket, azok változatosságát, ezáltal pedig megismerni a számítási eljárások fejlődését is.

⁴ A képlet gyakorlatilag megegyezik az MSZ EN ISO 13370:2008 G mellékletében szereplővel, azonban a szabvány a szilárd talajokra $c_s \approx 1000$ J/KgK-t a vízre pedig $c_w \approx 4180$ J/KgK-t ad meg.

4.5.1. NUMERIKUS MÓDSZEREK

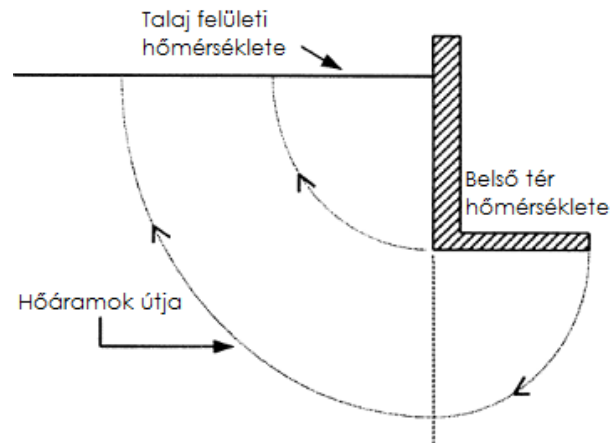
Hőtechnikai számítások során a numerikus módszerek alkalmazásához vezető utat általában a végelelemmódszer vagy a véges differencia módszer jelenti. Az egyik első, talajjal érintkező szerkezetekre vonatkozó szimuláció is az explicit véges differencia módszeren alapult, mely során kísérleti földalatti menedékhelyek hő- és nedvesség transzportfolyamatait vizsgálták [Kusuda és Achenbach 1963], majd évek múltán és egymásra is épülő publikációk sokaságával jutottak el a kutatók odáig, hogy többdimenziós számítógépes szimulációk eredményeit nagymodell kísérletekkel ellenőrizték és igazolják [Rees et al. 2007].

Az Európai Szabványügyi Testület már 1998-ban adott ki szabványt, melyben a hőáramok és felületi hőmérsékletét szabályozta, ennek a szabványnak a jelenleg érvényben lévő változata az MSZ EN ISO 10211:2008. A szabvány leírja a padlószervezetek és falszerkezetek csatlakozásánál kialakuló vonalmenti hőhidak jellemzésére szolgáló vonalmenti hőátbocsátási tényezők számítási eljárását mind kétdimenziós szimuláció mind pedig háromdimenziós szimuláció esetén. A számítás során két opciót ajánl, egyik esetben a padlószervezet hőveszteségeit is tartalmazza a vonalmenti hőátbocsátási tényező (ezt a szemléletet képviselik a hazai számítási eljárások is), míg másik esetben nem csak a csatlakozó falszerkezet hőveszteségeit kell kivonni, hanem a padlószervezetét is, melyet külön szimuláció útján határozhatunk meg. A szabvány rögzíti továbbá, hogy 8 m-es belső hosszánál szélesebb épületek esetén a veszteségeket elegendő a 8 m-es padló szerint meghatározni. Azonban a szabványban leírt módszerek egyike sem említi a geotermikus gradiens szerepét, azaz a földhőt teljesen elhanyagolja.

4.5.2. ANALITIKUS MÓDSZEREK

Az analitikus megoldások során a tranziens hővezetés differenciálegyenletét részletes vizsgálatok, elemzések után létrehozott, egyszerűsített egyenletek segítségével oldjuk meg. Az analitikus eljárások során általában a legelső egyszerűsítés a probléma dinamikus voltának elhanyagolása és az egyenletek stacioner állapotra történő felírása.

Az egyik ilyen megoldást már a hatvanas évek végén Kanadában [Latta és Boileau 1969] publikálták, mely a szerzők mérési eredményein alapulva, ahol egy fűtött pince körüli földtömeg hőmérséklet eloszlását vizsgálták jutottak arra a megállapításra, hogy a hőáram vonalak kör alakú útvonalat írnak le a pincefal és pincepadlótól a felszínig. A hőveszteségeket ezáltal a talaj felületi hőmérsékletének és a belső tér lég-



2. ábra: Hőáramok feltételezett útvonala [Latta és Boileau 1969]

mérsékletének különbségétől, a pincefal és pincepadló hővezetési ellenállásától és a talaj hővezetési tényezőjétől valamint a kör alakú útvonalaknak a hosszától függnek (tehát a pincepadló mélységétől) az egyenleteikben, ahogy az 1. ábrán is látható. Ez a számítási módszer azonban csak a felszín irányába tartó hőáramokkal foglalkozik, és amint az egyik épített szerkezet hőszigetelést is tartalmaz, a hőáramok útja megváltozik. Állandósult állapot feltételezése révén pedig a talaj hőtároló kapacitását szintén nem veszi számításba.

Az analitikus számítási eljárások a következő évek során folyamatosan fejlődtek és jutottak a nyolcvanas évekre odáig, hogy megoldást adtak periodikusan változó peremfeltételekkel rendelkező kétdimenziós esetekre, vagy akár háromdimenziós állandósult állapotú négyszögletes padlószerkezetű épületek hőveszteségeire is [Delsante 1983].

Ugyancsak analitikus számítási eljárásokat tartalmaz a jelenleg érvényben lévő, talajok hőátviteli folyamatainak egyszerűsített számítási módszereit tartalmazó MSZ EN ISO 13370:2008 szabvány is, mely gyakorlatilag svéd kutatók kilencvenes évekbeli publikációira épül [Claesson és Hagentoft 1991].

4.5.3. FÉL-ANALITIKUS MÓDSZEREK

A félig analitikus megoldások az előbbieken tárgyalt analitikus megoldási módokat a vegyítik a numerikus módszerekkel megkapott eredményekkel. Megfelelő példa lehet az efféle eljárások megismeréséhez az a módszer [Kusuda és Bean 1984],

melyben a peremérték-problémát Green-függvény felhasználásával dinamikus háromdimenziós hővezetési egyenlet felírásából oldották meg. A kutatásban a hőszigetelt padlószerkezet hőveszteségeit a talaj hővezetési tényezője és vastagsága valamint a padlólemez átlagos hőmérsékletének és a padlószerkezet alatti aljzat, adott mélységben numerikus módszer segítségével meghatározott havi átlaghőmérsékletének függvényében számították.

4.6. A hazánkban alkalmazott számítási módszerek bemutatása

A nemzetközi publikációs adatbázisokban számos eljárás leírása található a talajjal érintkező szerkezetek hőtechnikai modellezésére, azonban a hazai gyakorlatban ezek az eljárások többnyire nem honosodtak meg. A továbbiakban a magyarországi mérnökök által használt módszerek előbbieknél részletesebb bemutatása következik.

4.6.1. AZ MSZ-04-140 SZABVÁNYOK MÓDSZEREI

Az MSZ-04-140 jelzésű Magyar Népköztársaság Építésügyi Ágazati Szabványai 1978 és 1991 között 3 alkalommal jelentek meg, 1987-ig az Építésügyi és Városfejlesztési Minisztérium majd 1991-ben a Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium adta ki. A szabványok magyar nyelvűek.

A szabványok négy fejezetből állnak, melyek önálló egységeket képeznek, ezek pedig az MSZ-04-140/1, mely a meghatározásokat és jelöléseket tartalmazza, az MSZ-04-140/2 mely a hőtechnikai méretezés eljárását szabványosítva, az MSZ-04-140/3 a fűtési hőszükséglet-, míg az MSZ-04-140/4 a hűtési hőterhelés-számítását tartalmazza. A kutatás szempontjából a 3-as, majd később a 2-es jelű szabványok tartalmaznak számítási módszereket a talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségeinek meghatározásához.

A szabványok 2012. január 15.-én visszavonásra kerültek, de azóta is számos épületenergetikus, energetikai tanúsító szoftver és a későbbiekben bemutatott jelenleg hatályos 7/2006. TNM Rendelet talajjal érintkező szerkezetekre vonatkozó részei alkalmazzák ezeket.

4.6.1.1. MSZ-04-140/3 – 1978

Az épületek fűtési hőszükséglet-számítását a szabványok új verziói egyre komplexebb formában tartalmazzák. Kezdetben a hőveszteségeket a következő egyenlettel írták le:

$$\dot{Q}_v = \sum A_1 \cdot k_1 \cdot (T_b - T_k) \quad (36)$$

ahol „A” az egyes határoló szerkezetek jellemző felülete, „k” a határolók hőátbocsátási tényezője, „T_b” a helyiség jellemző hőmérséklete, míg „T_k” a határolókon túli hőmérséklet. A talajon álló, vagy talajjal érintkező határoló szerkezeteknél ún. vonalmenti hőátbocsátással számolhatunk.

4.6.1.2. MSZ-04-140/3 – 1987

A külső transzmissziós energiaáram számításának képlete egy átrendezésen és a hőmérsékletek b – belső és k – külső paramétere helyett i – interior és e – exterior jelölésű paraméterek alkalmazásán kívül változatlan maradt. A szabvány e változata tartalmazza a talajba irányuló energiaáramok meghatározására szolgáló képletet is, mely:

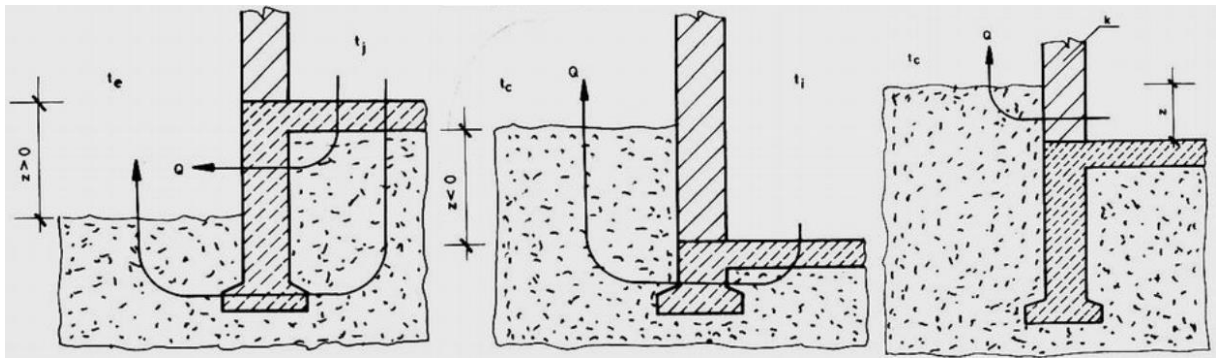
$$Q = l \cdot k_l \cdot (T_i - T_e) \quad (37)$$

összefüggés segítségével határozható meg, ahol „l” a padló kerületének a külső térelhatárolással érintkező része és „k_l” a padló kerületére vonatkozó vonalmenti hőátbocsátási tényező. A vonalmenti hőátbocsátási tényező értékeit egy folyóméter hossza a szabvány 1. mellékletében szereplő két táblázat tartalmazza.

A szabványban szerepel egy helyesbítés is a külső transzmissziós energiaáramok egyes külső térelhatárolásokra vonatkozó hatásainak figyelembevételére, melynek gondolata, hogy a helyiségek hőtároló képességének figyelembevételét egy „P_t” helyesbítő tényező alkalmazásával, a transzmissziós energiaáramokat ezzel szorozva vehetjük figyelembe.

A dolgozat szempontjából releváns talajon álló vagy talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségeit a szabványban található 1.1. és 1.2.-es táblázat tartalmazza, előbbi a padlón keresztüli hőveszteségeket adja meg a padlószint és a talajszint közötti magasságkülönbség és a padló szerkezet hővezetési tényezőjének függvényében, míg

utóbbi a talajjal érintkező falon keresztüli hőveszteségeket tartalmazza, a földdel érintkező falszakasz magassága és a falszerkezet eredeti, stacioner állapotban kiszámított hőátbocsátási tényezőjének függvényében. Az egyes értékek nem konkrét számértékek függvényében, hanem bizonyos tartományok közötti értékeként kereshetők ki a táblázatból, melyek két tizedes jegy pontossággal szerepelnek a táblázatban.



3. ábra: Az MSZ-04-140/3 – 1987 szabvány talajjal érintkező szerkezeteire vonatkozó táblázatok magyarázó ábrája.

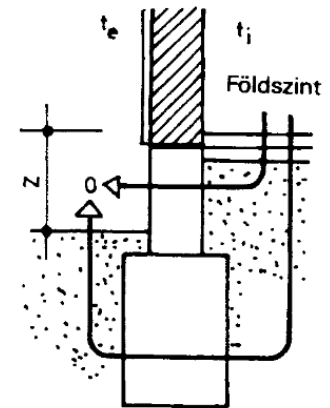
A padló és falcsatlakozásnál kialakuló szerkezeti hőhíd miatti többlet-hőveszteségekkel a szabvány nem foglalkozik. Megfigyelhető továbbá a fenti ábrán, hogy a padló szerkezet és a falszerkezet is homogén réteggént van jelen, az alaptest ábrázolása pedig gyakorlatilag szimbolikus jelentőségű csupán.

A táblázatos értékek az ábrák tekintetében tehát állandó vastagságú homogén rétegek változó hővezetési ellenállás melletti értékei, mely a valóságban egy bizonyos vastagság után kivitelezhetetlenek. A táblázatos értékek továbbá valószínűsíthetően állandósult állapot feltételezésével készülhettek, mivel a szabvány idején a tranziens egyenletek megoldásához szükséges számítási kapacitás nem állt még rendelkezésre és a hőtárolás hatásait is egy helyesbítő tényező segítségével vehettük figyelembe.

A szabványban szereplő számítási eljárás értelmezésében tehát egy fűtött pince hőveszteségeinek meghatározásához a pince falszerkezetének külső, talajjal érintkező kerülete mentén mind a padló szerkezet hőveszteségeit, mind pedig a talajjal érintkező falszerkezet hőveszteségeit összegeznünk kell.

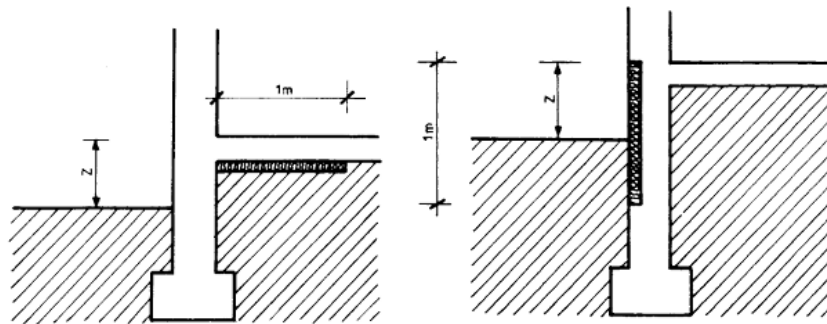
4.6.1.3. MSZ-04-140/2 – 1991

A szabvány rendelkezik arról, hogy a talajra fektetett padlószerkezet hővesztéseit az MSZ-04-140/3 – 1987 szabványban is közölt, táblázatos módon számíthatjuk. A táblázat értékei, melyek azt M.5.6. mellékletben szerepelnek, nem változtak, csupán a szabványban szereplő magyarázó ábra vált kidolgozottabbá, ahogy az a 3. ábrán a dolgozatban is látható. Szerepel továbbá egy talajon fekvő padlók egyenértékű hőátbocsátási tényezőjének meghatározására vonatkozó diagram és képlet a szabványban, mely diagram a talajon fekvő padló területének és a padló területének hányadosának függvényében adja meg a szabvány szerint szigetelt peremű padlószerkezet egyenértékű hőátbocsátási tényezőjét.



4. ábra: Az MSZ-04-140/2 – 1991 szabvány talajjal érintkező padlószerkezet magyarázó ábrája

A szabvány tehát leírja, hogy a talajjal érintkező padlószerkezeteknek az épület külső kerülete mentén húzódó 1 m széles sávjában szükséges hőszigetelés a padló talajhoz viszonyított szintjéhez képest mekkora hővezetési ellenállással rendelkezzen, azonban a szövegezés ellentmondásba kerül a magyarázó ábrákkal, mivel a szöveg a padló alsó síkját említi viszonyítási pontként, míg a kótázás szerint a padló felső síkja számít. A szigetelősáv elhelyezésére vonatkozó magyarázó ábrákat alább láthatjuk.



5. ábra: Szigetelősáv elhelyezés 1 m hosszal a padlószerkezet alatt vagy a lábazon.

Visszatérve a padló egyenértékű hőátbocsátási tényezőjének számításához, a szabvány 50. oldalán lévő diagram egy összefüggést is tartalmaz, mely a következő:

$$k = \frac{K}{A} \cdot [1,55 - (\frac{R}{R_{sz}} - 1) \cdot 0,30]$$

(38)

ahol „R” a padló hővezetési ellenállása a padló alsó szintjéig, „R_{sz}” a szabvány szerint szigetelt peremű padlószerkezet 1 m-es szigetelősávjában lévő hővezetési ellenállása, míg „K” a talajon fekvő padló kerülete, „A” pedig a padló területét jelöli.

A képlet szerint tehát a padlószerkezet egyenértékű hőátbocsátási tényezője nem függ a padló talajhoz viszonyított magasságkülönbségétől, sem pedig a talaj alatt lévő föld tulajdonságaitól.

4.6.2. AZ MSZ EN 832 SZÁMÍTÁSI MÓDSZERE

Ez a nemzeti szabvány, s annak 2002-es változata (előtte megjelent egy 1999-es változat is, mely angol nyelvű szövegezést tartalmazott) teljesen megegyezik az EN 832:1998 európai szabvánnyal, és tartalmazza annak AC:2000 és AC:2002 jelű helyesbítéseit is.

A szabvány szerint a hőveszteségek számítását a következő összefüggés alapján számíthatjuk:

$$Q_l = H \cdot (\theta_i - \theta_e) \cdot t \quad (39)$$

ahol „θ_i” a parancsolt (belső) hőmérséklet, „θ_e” a külső hőmérséklet átlaga az adott időszakra, „t” a számításba vett időtartam, „H” pedig az épület hőveszteségtényezője, mely két tag összegéből áll: „H_T” az EN 13789:2000 szabvány szerint számított transzmissziós hőveszteség-tényező és „H_V” a szellőzési hőveszteség-tényező.

A transzmissziós hőveszteségek az európai szabvány szerint a következőkből állnak a közölt összefüggés szerint:

$$H_T = \sum_i A_i \cdot U_i + \sum_k l_k \cdot \psi_k + \sum_j \chi_j \quad (40)$$

ahol „A” a felületek nagysága, „U” a hozzájuk tartozó hőátbocsátási tényezők, „l” a vonalmenti hőátbocsátási tényezők hossza, „ψ” a vonalmenti hőátbocsátási tényezők, míg „χ”-vel a pontszerű hőátbocsátási tényezőket jelölhetjük.

A szabvány alapján tehát a hőveszteségeket az EN 13789 szabvány alapján kell számítanunk, tehát a talajjal érintkező szerkezetek esetében is ennek az angol nyelvű európai szabványnak az alkalmazása az elvárt.

Ezt a tényt bizonyítja a szabvány L mellékletében szereplő, tájékoztató mintapélda, mely során egy Lausanne-ban, Svájcban építendő épület előzetes energiafogyasztásának meghatározására irányult. A talaj felé irányuló hőveszteségeket a számítások során az EN ISO 13370-ben közölt legegyszerűbb módszerrel számították, mely során a hőátbocsátási tényező alapértéke került kiszámításra, a talaj hővezetési tényezőjének előírt értéke 2 W/mK volt. A geometriai méreteket az épület külső méretei alapján határozták meg és vették számításba.

Legegyszerűbb módszer alatt valószínűleg az állandósult állapotra vonatkozó, talajon fekvő homogén padlószerkezetre vonatkozó összefüggéssel számították a hőveszteségeket, azonban ez a szabvány hőátbocsátási tényezőt számol és nem vonalmenti hőátbocsátási tényezőt, melyet külön numerikus szimuláció vagy az EN ISO 14683 szabványban közölt értékek alapján vehetünk fel. A szabványok aktuális változatának bemutatásával a 4.2.4.-es pontban részletesebben is foglalkozom.

Az MSZ EN 832:2002 szabvány 2008. szeptember 1-jei dátummal került visszavonásra.

4.6.3. A 7/2006. TNM RENDELET TÁBLÁZATOS MÓDSZERE

A hazánkban jelenleg is érvényben lévő (bár 2012-ben módosított változatú) rendelet az épületeket energetikai jellemzőinek meghatározására vonatkozik, mely alapja az épületek energetikai tanúsításának is.

A rendelet háromlépcsős követelményszinteket határozott meg, mely során a talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségei az első és második lépcsőt érintik közvetlenül. Az első követelményszint a határoló- és nyílászáró szerkezetek hőátbocsátási tényezőire vonatkozó követelményeknek való megfelelést jelenti, mely során a talajjal érintkező fal 0 és 1 m között $U = 0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$ míg a talajon fekvő padló a kerület mentén 1,5 m széles sávban (mely a lábazaton elhelyezett azonos ellenállású hőszigeteléssel helyettesíthető) $U = 0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ követelményérték alatt kell maradjon.

A második szint során a fajlagos hőveszteségtényezőre vonatkozó követelményértékeknek kell megfelelnie az épületnek, melyet az épület fűtött épülettérfogatot határoló szerkezetek (belső) összfelülete és a fűtött épülettérfogat (fűtött légtérfogat) hányadosa alapján a rendeletben szereplő összefüggés segítségével határozhatunk meg.

A fajlagos hőveszteségtényező számításához az épület esetében a következő összefüggést kell alkalmaznunk:

$$q = \frac{1}{V} \cdot \left(\sum A \cdot U_R + \sum l \cdot \psi - \frac{Q_{sd} + Q_{sid}}{72} \right) \quad (41)$$

ahol a „V” a fűtött épülettérfogatot, „A” a belső lehűlő felületet, „U_R” az egyszerűsített esetben a hőhídveszteségek figyelembevételével korrigált rétegrendi hőátbocsátási tényező, míg részletes módszer esetében megegyezik a rétegrendi hőátbocsátási tényezővel (ez esetben azonban a hőhídveszteségeket a második tag szerint és az MSZ EN ISO 10211 szabvány alkalmazásával kell figyelembe venni). A képlet jobboldalának második tagjában „l” a vonalmenti hőhidak hossza, „ψ” a hosszokhoz tartozó vonalmenti hőátbocsátási tényező, majd pedig „Q_{sd}” a direkt sugárzási nyereségeket, „Q_{sid}” pedig az indirekt sugárzási nyereségeket jelöli, melyeket egyszerűsített számítás esetén elhanyagolhatunk. A képletben szereplő 72 a standard magyarországi fűtési idényre meghatározott hőfokhíd ezredrésze.

A rendelet meghatározása szerint a talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségeit részletes számítás esetében az MSZ EN ISO 13370 szabvány szerint, míg egyszerűsített számítás esetén a rendelet 3. mellékletében közölt vonalmenti hőátbocsátási tényezők alkalmazásával kell meghatározni.

Ez utóbbi eset azért érdekes, mert a rendeletben közölt táblázatok gyakorlatilag megegyeznek az előbbieken bemutatott MSZ-04-140 szabványokban szereplő táblázatokkal, így a padlószerkezetek vonalmenti hőátbocsátási tényezőit a kerület hosszegységére vonatkoztatva az MSZ-04-140/2 – 1991 alapján, míg a talajjal érintkező fal esetében (mivel az nem szerepelt az 1991-es szabványban) az MSZ-04-140/3 – 1987 szabványban megismert táblázat alapján számíthatjuk.

A Rendelet szerint tehát míg minden méretet belső méretek alapján kell figyelembe vennünk, a táblázatos értékek külső kerületre meghatározva szerepelnek, az értékek pedig a rendelet hatálybalépésekor mintegy 30 évesek. A hővezetési tényezők követelményértékeit felsoroló táblázatban a padlószerkezet esetében másfél méter szélességben lévő hőátbocsátási tényezőt kell figyelembe vennünk, a régi MSZ szabványok 1 m szélességben írták elő a hőszigetelés szükségességét, bár a táblázatban szereplő értékek nyilvánvalóan a hőszigetelő réteg figyelembevétele nélkül, homogén padlószerkezetként kerültek a táblázatba és csak a már említett magyarázó ábraváltozás történt meg.

Továbbá míg a rendelet első követelményszintje a talajjal érintkező szerkezetek esetében a hőátbocsátási tényezőre vonatkozik, a táblázatban továbbra is hővezetési

ellenállás alapján kell kikeresnünk az értékeket, mely figyelmetlenség esetén könnyen hibához vezetheti az épületenergetikusokat.

4.6.3.1. A 40/2012. BM Rendelet a módosításról

2012-ben érkezett az első módosítás a 7/2006. TNM Rendelethez, melyben többek között a padlószerkezetek vonalmenti hőátbocsátási tényezőit tartalmazó táblázat is módosult. Ez alatt pedig a táblázat bővülését érthetjük, mivel az addigi táblázat (lévén 30 éve változatlan volt már) nem tartalmazott olyan nagy, kvázi a kétezres években valójában megépítésre szánt padlószerkezeteknek megfelelő hővezetési ellenállású oszlopokat.

A rendelet táblázata így bővítésre került, azonban a régi értékek változatlanok maradtak és az új értékeket illesztették inkább a régiekhez, mintsem a teljes táblázatot újra elkészítsék. Az új értékek véges differenciámódszerrel készülhettek, a szimuláció során az MSZ EN ISO 10211 szabvány instrukcióit többé-kevésbé betartva, azonban mivel ebben a szabványban nem kerül elő említés szintjén sem a földhőmérséklet, mint alsó peremfeltétel, így ezek valószínűleg továbbra sem szerepelnek az új táblázatos értékekben sem. A szimuláció továbbá stacioner állapotban kellett történnjen, és az illesztés miatt további egyszerűsítésekre és korrekciókra lehetett szükség, melyek a valóságos modellezés hátrányára közelítették a 30 éves értékek tendenciáit.

A táblázatos értékek tehát továbbra is nélkülözik a padló és falcsatlakozásnál kialakuló vonalmenti hőveszteség többleteket.

4.6.3.2. A 1246/2013. Korm. határozat a módosításról

Bár csak 2015-től lép legelőször hatályba középületek esetében és csak 2018-tól kell lakó- vagy irodaépületek tervezése és tanúsítása során figyelembe vennünk, a rendelet új „költségoptimalizált” követelményértékeket határoz meg, bevezetve a lábazati falra vonatkozó követelményeket is, így a külső falra vonatkozó érték $U_m = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ és a talajjal érintkező fal a terepszinttől 1 m mélységig valamint lábazati falra vonatkozó követelményérték $U_m = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$ lesz. A padlószerkezet követelményértéke új építésű épületek esetén szintén $U_m = 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$. A hőátbocsátási tényezők követelményértékén túl a további követelmények is szigorodtak, így a fajlagos hőveszteség-tényezőre vonatkozó követelmény is.

4.6.4. AZ MSZ EN ISO 13370:2008 SZABVÁNY SZÁMÍTÁSI MÓDSZEREI

Az előbbieken számos alkalommal esett utalás erre a 2008 óta hazánkban is érvényben lévő szabványra. A szabvány különféle talajjal érintkező szerkezetek esetére ad meg a talajjal érintkező szerkezetekre vonatkozó, egyszerűsített analitikus számítási eljárással számolható, állandósult állapotra vonatkozó hőátbocsátási tényezőket. A szabvány mellékletében szerepelnek képletek a szélei mentén hőszigetelt talajon fekvő padló vonalmenti hőátbocsátási számítására, illetve a függőlegesen a lábazon elhelyezett hőszigetelés hatásának figyelembevételére.

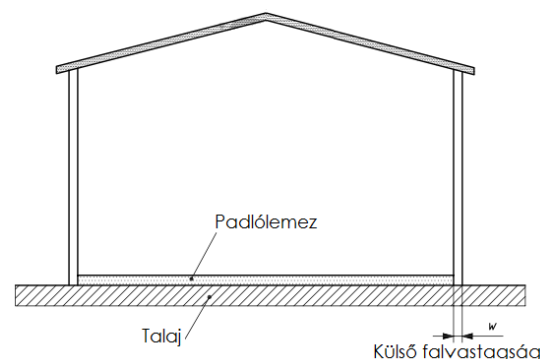
A mellékletekben továbbá szerepel egy periodikus hőátbocsátási tényezők számítására vonatkozó eljárás, és a dinamikus szimulációs programok alkalmazásához történő virtuális réteg illesztése is. Azonban a vonalmenti hőátbocsátási tényezők esetén tovább hivatkozik az MSZ EN ISO 10211 szerinti numerikus szimulációs eljárás elvégzésére, vagy az MSZ EN ISO 14683 szabványban szereplő vonalmenti hőátbocsátási tényezők alkalmazására.

4.6.4.1. Talajon fekvő földszinti padlók hővesztesége

A szabvány számítási eljárásának elvi elrendezési vázlata a 6. ábrán látható. A modell alapján homogén, egyetlen hővezetési ellenállással jellemzett padlólemez (melynek vastagsága a modell szempontjából lényegtelen, csupán az ellenállás mértéke fog számítani) és az a mellett található „w” falvastagságú külső fal vastagsága alapján és a talaj hővezetési tényezőjének ismeretében, valamint természetesen a padlószerkezet geometriai méreteinek ismeretében számíthatjuk a padló hőátbocsátási tényezőjét. A számítás a következő képletek segítségével és sorrendben történhet:

Először meg kell határozni „d_t” egyenértékű padlóvastagságot:

$$d_t = w + \lambda \cdot (R_{si} + R_f + R_{se}) \quad (42)$$



6. ábra: Az MSZ EN ISO 13370 szerinti talajon fekvő padlószerkezet modellje

ahol „w” a külső (lábazati) fal vastagsága, „λ” a padlólemez alatti talaj hővezetési tényezője, melyekre ajánlott értékeket tartalmaz a szabvány, „R_f” a padlórétegek hővezetési ellenállása, míg „R_{si}” és „R_{se}” a belső és külső felületi ellenállásokat jelöli.

Ki kell továbbá számítanunk „B’ ” segédmenységet, melyet a talajon fekvő padló területe és a padló kerület hosszának ismeretében tehetünk meg:

$$B' = \frac{A}{0,5 \cdot P} \quad (43)$$

amely képletben „A” jelöli a területet, míg „P” a padló kerületét.

Ezután a szabvány az előbbieken számított két mennyiséghez összehasonlításával dönti el, hogy két képlet közül melyiket alkalmazzuk a padló hőátbocsátási tényezőjének kiszámítására.

Ha $d_t < B'$, akkor:

$$U = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot B' + d_t} \cdot \ln\left(\frac{\pi \cdot B'}{d_t} + 1\right) \quad (44)$$

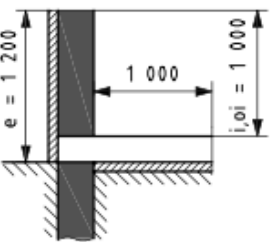
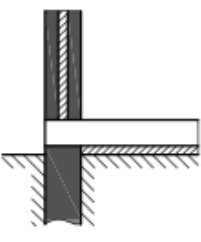
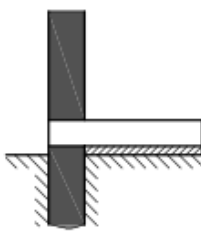
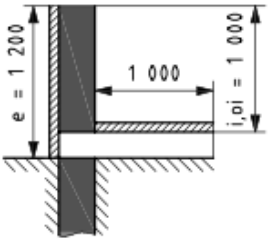
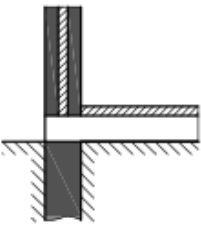
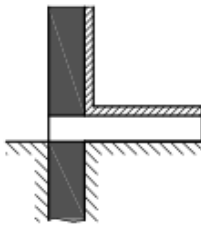
Ha $d_t \geq B'$, akkor:

$$U = \frac{\lambda}{0,457 \cdot B' + d_t} \quad (45)$$

képleteket kell alkalmaznunk. A hőátbocsátási tényező utána a padló transzmissziós hővesztesége is számítható a következő képlettel:

$$H_g = A \cdot U + P \cdot \psi_g \quad (46)$$

ahol „ψ_g” a padló szerkezet és falcsatlakozásnál kialakuló hőveszteséget számításba vevő vonalmenti hőátbocsátási tényező, melynek értékét MSZ EN ISO 10211 szerinti numerikus szimuláció útján, vagy az MSZ EN ISO 14683 szabványban szereplő értékek alapján vehetőek fel. Ez utóbbi szabványban a vonalmenti hőátbocsátási tényezők $U_{fal} = 0,375 \text{ W/m}^2\text{K}$ vagy szigetelt esetben $U_{fal} = 0,343 \text{ W/m}^2\text{K}$ és $R_{padló} = 2,5 \text{ m}^2\text{K/W}$ értékek mellett kerültek meghatározásra. A szabvány formáját a 7. ábra mutatja be.

Talajon fekvő padlószervezetek		
 GF1 $\begin{aligned}\psi_e &= 0,65 \\ \psi_{oi} &= 0,80 \\ \psi_i &= 0,80\end{aligned}$	 GF2 $\begin{aligned}\psi_e &= 0,60 \\ \psi_{oi} &= 0,75 \\ \psi_i &= 0,75\end{aligned}$	 GF3 $\begin{aligned}\psi_e &= 0,55 \\ \psi_{oi} &= 0,70 \\ \psi_i &= 0,70\end{aligned}$
 GF5 $\begin{aligned}\psi_e &= 0,60 \\ \psi_{oi} &= 0,75 \\ \psi_i &= 0,75\end{aligned}$	 GF6 $\begin{aligned}\psi_e &= 0,45 \\ \psi_{oi} &= 0,60 \\ \psi_i &= 0,60\end{aligned}$	 GF7 $\begin{aligned}\psi_e &= -0,05 \\ \psi_{oi} &= 0,10 \\ \psi_i &= 0,10\end{aligned}$

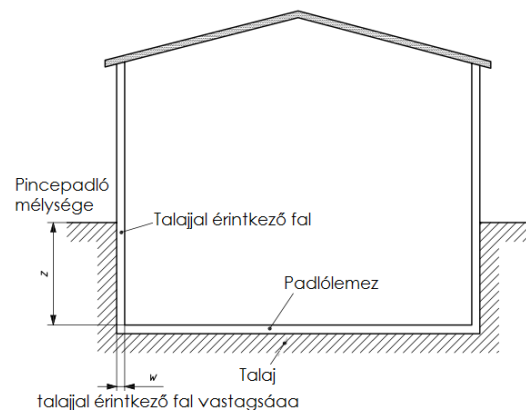
7. ábra: A talajon fekvő padlók és falszerkezetek vonalmenti hőátbocsátási tényezői különféle szerkezeti kialakítások esetén az MSZ EN ISO 14683 alapján

4.6.4.2. Fűtött pince hővesztesége

Ebben az esetben a transzmissziós hőveszteségek számításához a pincefal egyenértékű hőátbocsátási tényezőjének számítására is szükség van.

A számítás során az előzőeken kívül a 8. ábrán látható módon a pincepadló „z” mélységének ismerete és a talajjal érintkező fal hővezetési ellenállása is szükséges lesz a transzmissziós hőveszteségek számításához.

A számítás során az egyenértékű padlóvastagság számítását az előbbiekben ismertetett módon a (42) összefüggés, míg a B' segédmenyiséget a (43) összefüggés alapján számíthatjuk, azonban a padló hőátbocsátási tényezőjét az előbbiektől eltérően a következők szerint határozzuk meg:



8. ábra: Az MSZ EN ISO 13370 szerinti fűtött pince modellje

Ha $(d_t + 0,5 \cdot z) < B'$, akkor:

$$U_{bf} = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot B' + d_t + 0,5 \cdot z} \cdot \ln\left(\frac{\pi \cdot B'}{d_t + 0,5 \cdot z} + 1\right) \quad (47)$$

Ha $(d_t + 0,5 \cdot z) \geq B'$, akkor:

$$U_{bf} = \frac{\lambda}{0,457 \cdot B' + d_t + 0,5 \cdot z} \quad (48)$$

képleteket kell alkalmaznunk. Számolnunk kell továbbá a pincefal hőátbocsátási tényezőjét is, melyhez szükség van a „ d_w ” egyenértékű pincefal vastagság meghatározására a következő összefüggéssel:

$$d_w = \lambda \cdot (R_{si} + R_w + R_{se}) \quad (49)$$

ahol „ λ ” a falszerkezet melletti talaj hővezetési tényezője, melyekre ajánlott értékeket tartalmaz a szabvány, „ R_w ” a talajjal érintkező falrétegek hővezetési ellenállása, míg „ R_{si} ” és „ R_{se} ” a belső és külső felületi ellenállásokat jelöli.

Az egyenértékű pincefal vastagság, a talaj hővezetési tényezőjének valamint a padló szerkezet egyenértékű vastagságának és a pincepadló mélységének ismeretében számíthatjuk a pincefal hőátbocsátási tényezőjét:

$$U_{bw} = \frac{2 \cdot \lambda}{\pi \cdot z} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot d_t}{d_t + z}\right) \cdot \ln\left(\frac{z}{d_w} + 1\right) \quad (50)$$

Az összefüggés abban az esetben alkalmazható, ha $d_w \geq d_t$, amennyiben viszont ez nem teljesül, az (50)-es összefüggésbe d_t helyett d_w írandó.

A hőátbocsátási tényezők utána a pince teljes, állandósult állapotra vonatkozó transzmissziós hővesztesége is számítható a következő képlettel:

$$H_g = (A \cdot U_{bf}) + (z \cdot P \cdot U_{bw}) + (P \cdot \psi_g) \quad (51)$$

4.6.4.3. Hőszigetelt sáv figyelembevétele

Abban az esetben, a padlóél vagy az alapozás mentén valamilyen szélességben hőszigetelő sávot alakítottak ki (melyet a régebbi magyar szabványok megköveteltek),

az ebből származó hőveszteség csökkenést az MSZ EN ISO 13370:2008 B melléklete szerint számíthatjuk.

A melléklet megkülönböztet vízszintesen és függőlegesen elhelyezett hőszigetelő sávot is, melyek hatását „ $\psi_{g,e}$ ” vonalmenti hőátbocsátási tényező által vehetjük figyelembe, akár tranziens hőtechnikai állapotban is⁵. Hőszigetelt sáv alkalmazásakor a talajon fekvő padló hővesztesége a (46)-os képletet megváltoztatva⁶ a következőre módosul:

$$H_g = A \cdot U + P \cdot (\psi_g + \psi_{g,e}) \quad (52)$$

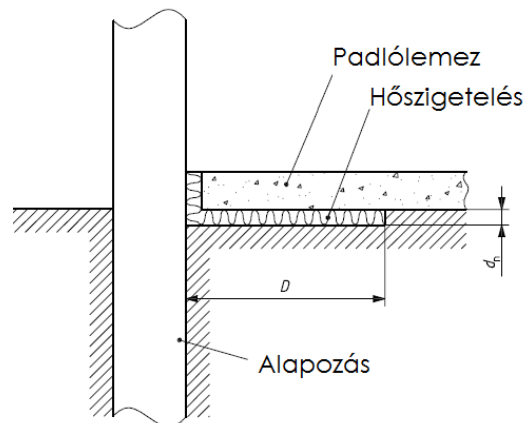
4.6.4.3.1 Vízszintes hőszigetelő sáv

A vízszintes hőszigetelő sáv vonalmenti hőátbocsátási tényezőjének meghatározásához először meg kell határozni „ d' ” többlet egyenértékű talajvastagságot:

$$d' = R' \cdot \lambda \quad (53)$$

ahol „ R' ” a padlóél melletti többlet hővezetési ellenállás, azaz a hőszigetelő sáv „ R_n ” hővezetési ellenállásának és a „kiszorított” talaj vagy padlólemez „ d_n ” vastagságának (mely vastagság megegyezik a hőszigetelő sáv vastagságával) és hővezetési tényező hányadosának a különbsége:

$$R' = R_n - \frac{d_n}{\lambda} \quad (54)$$



9. ábra: Az MSZ EN ISO 13370 szerinti vízszintes hőszigetelő sáv modellje

⁵ Az MSZ EN ISO 13370:2008 A mellékletének (A.3)-as pontja és B mellékletének 3-as megjegyzése szerint a padlóélnél kialakuló hőhídhatások (ide értve a hőszigetelő sáv hatását is) figyelembe vehetők „ H_{pi} ” belső periodikus hőveszteségtényező és „ H_{pe} ” külső periodikus hőveszteségtényező esetén.

⁶ Állandósult állapotbeli számítás esetén a padlóél melletti vízszintes vagy függőleges hőszigetelő sáv hatását a padló hőátbocsátási tényezőjében is számíthatjuk, így $U = U_0 + \frac{2 \cdot \psi_{g,e}}{B'}$ képletet alkalmazhatjuk, ahol „ U_0 ” a padló hőszigetelő sáv nélküli hőátbocsátási tényezője.

A vízszintes hőszigetelő sáv vonalmenti hőátbocsátási tényezője ezután „D” hőszigetelősáv hossz ismeretében számítható:

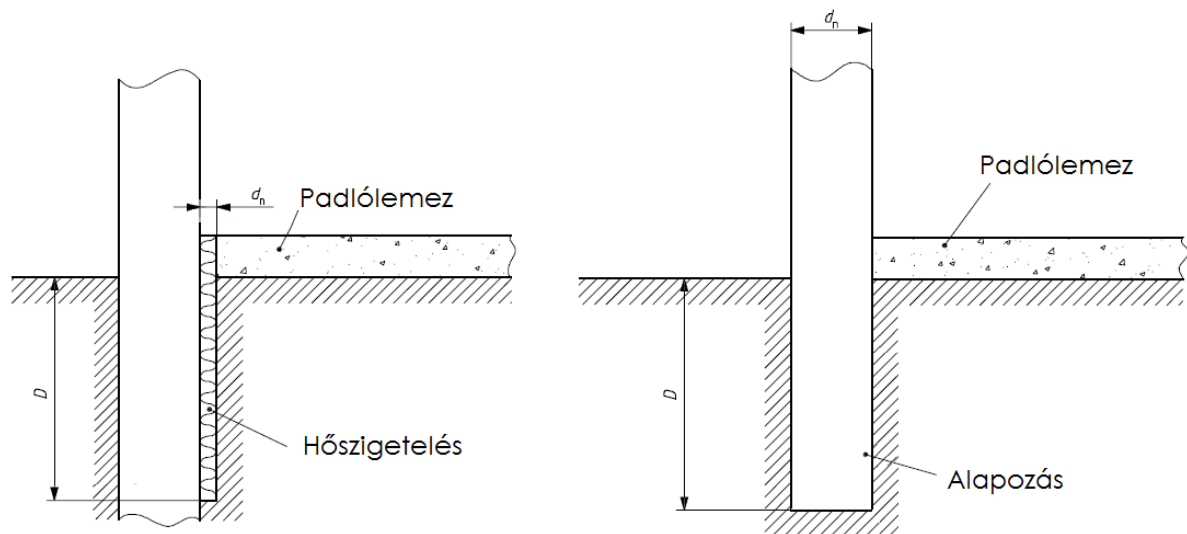
$$\psi_{g,e} = -\frac{\lambda}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{D}{d_t} + 1\right) - \ln\left(\frac{D}{d_t + d'} + 1\right) \right] \quad (55)$$

4.6.4.3.2 Függőlegesen elhelyezett hőszigetelő sáv

Abban az esetben, ha a szigetelősávot függőlegesen helyezzük az alaptest mellé vagy az alaptest anyagának hővezetési tényezője kisebb, mint a mellette található talaj hővezetési tényezője, a vonalmenti hőátbocsátási tényező a következő egyenlet segítségével adható meg:

$$\psi_{g,e} = -\frac{\lambda}{\pi} \cdot \left[\ln\left(\frac{2D}{d_t} + 1\right) - \ln\left(\frac{2D}{d_t + d'} + 1\right) \right] \quad (56)$$

A többlet egyenértékű talajvastagság számítása megegyezik a vízszintes padlóélnél bemutatottal. A számításhoz használt geometriai modell az alábbi 10-es ábrán látható.



10. ábra: AZ MSZ EN ISO 13370 szerinti függőleges hőszigetelő sáv (balra) és hőszigetelő alapozás (jobbra) modelljei

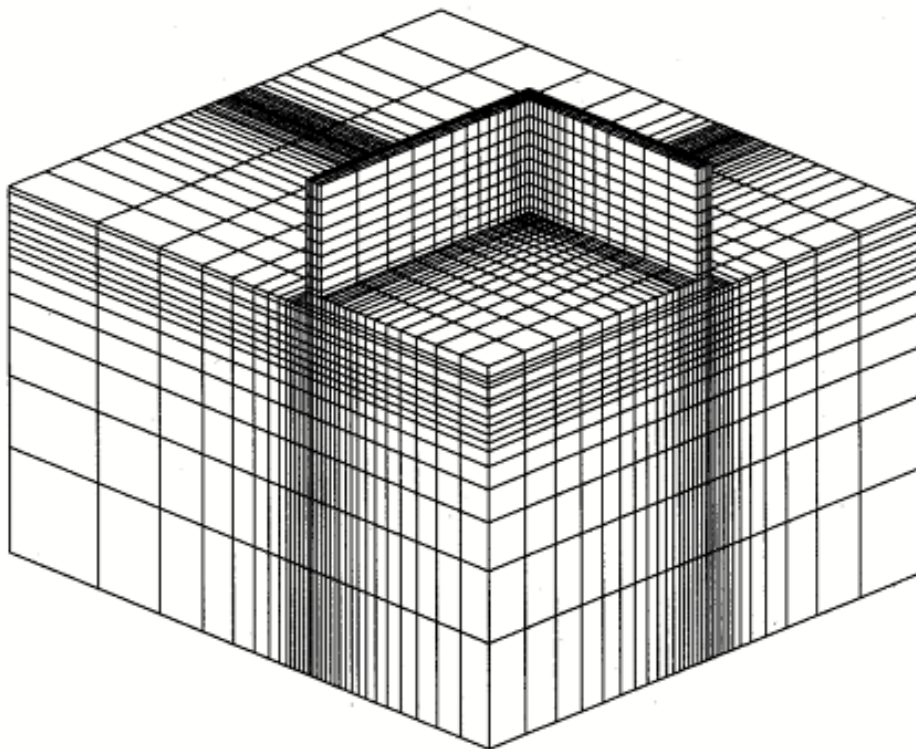
4.6.5. SZIMULÁCIÓS MÓDSZEREK

Az épületenergetikusok körében viszonylag ritkán jelenik meg a numerikus szimuláció, azonban az egyetemi oktatásban és kutatásban, speciális tervezési feladatok esetében már egyre inkább találkozhatunk ezekkel a módszerekkel is.

4.6.5.1. Véges differenciámódszer (VDM)

A parciális differenciálegyenletek egyik legrégebbi megoldási módszere az időben és térben folytonos függvényeket diszkretizálja (véges sok pontra és meghatározott időpontokra írja le), a differenciálegyenletekből differenciaegyenleteket állít elő és a differenciahányadosokkal közelíti a differenciálegyenletben szereplő deriváltakat.

A megoldás pontossága nagyban függ a tartomány felosztásának minőségétől és a létrehozott pontok számától és az időlépéstől, melyek a felhasználó által szabadon megválaszthatóak, vagy az időlépést optimalizáló, szoftverbe beépített algoritmus által meghatározott módon függnek. A hálóméret hirtelen megváltozása, illetve torzulása szintén csökkenti a megoldás pontosságát, azonban megfelelően létrehozott modell esetében a felbontás finomításával, a pontok számának növelésével az eredmény egyre jobban fogja közelíteni a folytonos rendszert. A módszer hátránya, hogy bonyolult alakú tér esetén nehéz olyan transzformációs függvényt találni (ez ráadásul a kiindulási egyenleteket is átalakíthatják), mely egységes léptékű számítási térhez vezetne. A VDM gyakorlatában ezért a globális koordináta-rendszerre merőleges, téglalap (2D) vagy téglatest (3D) alapú cellákra bontjuk a tartományt.



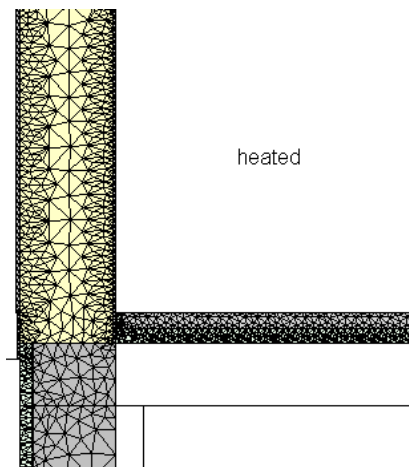
11. ábra: Diszkretizált geometriai modell talajon fekvő padló és falsarok szimulációjakor, VDM alkalmazása esetén [Blomberg 1996]

A VDM-et alkalmazó szoftverekkel számított eredmények hibáiért a geometriai modell megalkotásának korlátozottsága felel leginkább, csak olyan esetben alkalmazható a módszer, mely során a geometria téglatestekre bontható [Nagy 2013a]. A talajjal érintkező szerkezetek szimulációja során általában megfelelünk ennek a kritériumnak, azonban ahogy az a 11. ábrán is látható, gyakran felesleges cellasűrítésre kényszerülünk a diszkretizáció során, mely feleslegesen hosszabbítja meg a numerikus közelítő számításokat. Azonos teljesítményű számítógépen jelenleg a következő pontban bemutatott végeselemmódszert alkalmazó szoftverek jutnak gyorsabban azonos pontosságú numerikus megoldáshoz.

4.6.5.2. Végeselemmódszer (VEM)

A módszert először a repülőszerkezetek komplex szilárdságtani vizsgálatához fejlesztették, mely segítségével a teljes vizsgált tartományt leíró parciális differenciálegyenletek megoldásait a tartomány részhalmazaira felírt egyszerűbb egyenletek megadásával, majd ezen egyenletek megoldásainak összeillesztésével közelítik, ezáltal matematikai szempontból az alkalmazható numerikus közelítések legelegánsabb módszerét alkotva.

A közelítés a függvényter bázisának kiválasztásával kezdődik, melyek a tartomány egy korlátos része felett lehetnek zérustól különbözőek. A tartományok meghatározása tehát maga a tér diszkretizálása, mely során létrehozuk a végeselemes hálót. A VEM módszerrel megoldott feladatok esetén két féle megoldási módszer létezik. Az egyik esetben a variációs módszert alkalmazzuk, melyben egy funkcionált írunk fel az egész számítási térre vonatkozóan, mely tartalmazza mind az ismeretlen függvényeket, mind pedig ezek deriváltjait. A megoldás során ennek a funkcionálnak a minimumát kielégítő függvényt keressük. A másik módszerbe differenciálegyenletek írhatóak fel egy elemi térrészre, melyek megfelelő peremfeltételekkel megadásával leírják a tartomány állapotát.



12. ábra: Végeselemes felbontás háromszögelemekkel 2D VEM alkalmazásakor, Psi-Therm szoftverrel [Nagy 2013a]

A hőtechnikai numerikus számítások során a második módszert alkalmazzuk, leggyakrabban a súlyozott hibák elvén alapuló Galjorkin-féle közelítéssel állítjuk elő az alacsonyabb rendű deriváltakat a magasabb rendűekből.

4.6.6. VÉGES TÉRFOGAT MÓDSZER (VTM)

A mérnöki gyakorlatban leginkább folyadékok és gázok áramlástanai problémáinak vizsgálatában alkalmazott módszer a számítási tartományt, hasonlóan a végeselemmódszerhez, cellákra, azaz kisebb térfogati elemekre bontja, amelyeken belül a keresett áramlástanai mezőváltozók egyszerűbb függvényekkel közelíthetők. A véges térfogatok egy vagy több cella szuperpozíciójával állíthatóak elő, melyek a többi eljárásban alkalmazott cellákkal szemben átlapolhatják egymást.

A véges térfogat módszer magába foglalja a végeselemmódszer geometriai és a véges differencia módszer diszkrétizálási rugalmasságát, matematikailag azonban a végeselemmódszernél kevésbé komplex metódus, emiatt a magasabb rendű deriváltak kezelése nem könnyű feladat. [Nagy 2013a]

4.6.7. PEREMELEM MÓDSZER (PEM)

A módszert olyan esetekben alkalmazható a végeselemmódszer hatékony alternatívájaként, ahol a vizsgált tartomány belsejében sem geometriai, sem anyagjellemzők tekintetében nincsenek változások. Ekkor az erős alakban megadott peremérték-feladatot különlegesen megválasztott súlyfüggvények használatával átírjuk olyan gyenge alakba, amelyben az ismeretlen függvénynek egy tetszőleges pontbeli értéke kifejezhető ennek a függvénynek a vizsgált tartomány peremén felvett jellemzőivel.

A perem diszkrétizálása után a felvett csomóponti értékek a tartomány belsejének paramétereitől függetlenül meghatározhatóak. Ezután a peremen kapott értékekből egyenként tudjuk számítani a tartomány pontjait.

A módszer előnye, hogy a térbeli feladatok dimenziószáma eggyel csökken, ebből adódóan a többi numerikus módszerhez képest egy nagyságrenddel kevesebb a csomópontok száma, tehát az algoritmizált eljárás lefutási ideje lényegesen kevesebb. A PEM hátránya, hogy csak olyan egyszerűbb geometriai modellek esetében alkalmazható hatékonyan, ahol a peremérték probléma megoldásához szükséges Green függvények ismertek. [Nagy 2013a]

4.7. Numerikus számítások hibái

Az általában már kiindulási hibával is terhelt adatokhoz számítógépes feldolgozás során lebegőpontos számokat rendelünk. Emiatt a kezdetben valós számot csak véges pontossággal (értékes tizedes jegyekkel) tudjuk tárolni. Az eljárások során alkalmazhatjuk a szabályos kerekítést vagy a csonkítási eljárást, mely esetén a hiba értelem-szerűen nagyobb, azonban a művelet egyszerűbbé válik.

Numerikus számítási eljárásoknál és az előbbieken ismertetett módszerek alkalmazása esetén diszkretizációt alkalmazunk, tehát egy függvény értékét véges sok pontban határozzuk meg. Ha az egzakt matematikai kifejezés helyett annak közelítését alkalmazzuk, az így létrejövő hibát csonkítási hibának nevezzük.

A két hiba független egymástól és együttesen alkotják a numerikus számítások teljes hibáját. Ennek a teljes hibának a minimalizálása a cél a szimuláció során, optimalizált elemszám és lépésköz alkalmazásával. [Nagy 2013a]

4.8. Vonalmenti hőátbocsátási tényező számítása

A vonatkozó MSZ EN ISO 10211:2008 szabvány a következő összefüggést állapítja meg egy szerkezet transzmissziós hőáramlás és a hőátbocsátási tényezők között:

$$L_{3D,i,j} = \sum_{k=1}^{N_k} U_{k(i,j)} \cdot A_k + \sum_{m=1}^{N_m} \Psi_{m(i,j)} \cdot l_m + \sum_{n=1}^{N_n} \chi_{n(i,j)} \quad (57)$$

ahol:	$L_{3D,i,j}$	Teljes háromdimenziós transzmissziós hőáramlás [W/K]
	$U_{k(i,j)}$	Hőátbocsátási tényező [W/m²K]
	A_k	Felület, melyen $U_{k(i,j)}$ hatással van [m²]
	$\Psi_{m(i,j)}$	Vonalmenti hőátbocsátási tényező [W/mK]
	l_m	Hossz, melyen $\Psi_{m(i,j)}$ hatással van [m]
	$\chi_{n(i,j)}$	Pontszerű hőátbocsátási tényező [W/K]
	N_k	Eltérő hőátbocsátási tényezők száma
	N_m	Eltérő vonalmenti hőátbocsátási tényezők száma
	N_n	Eltérő pontszerű hőátbocsátási tényezők száma

A vonalmenti hőátbocsátási tényezőt a szabvány szerint a következő egyenlet segítségével számolhatjuk:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_j} U_j \cdot l_j \quad (58)$$

ahol:	Ψ	Vonalmenti hőátbocsátási tényező [W/mK]
	L_{2D}	Teljes kétdimenziós transzmissziós hőáramlás egy méterre vonatkozó szakaszon [W/mK]
	U_j	Egydimenziós hőtechnikai számítással megkapott hőátbocsátási tényező [W/m²K]
	l_j	Hossz, melyen U_j hatással van [m]

A hazai épületenergetikai gyakorlatban nem alkalmazunk pontszerű hőátbocsátási tényezőket, hatásukat a rétegtervi hőátbocsátási tényezők tartalmazzák.

4.9. A jelenleg hazánkban elterjed számítási módszerek hiányosságai

Összefoglalva az előzőekben ismertetett számítási módszerek hiányosságait, ezzel is indokolva egy új módszer létrehozásának szükségességét, kijelenthető, hogy a bemutatott módszerek állandósult állapotra vonatkoznak, mely a talajon fekvő szerkezetek esetében feltételezhetően nem ad megfelelő közelítést a talajok nagy hőtároló kapacitása és hőkésleltetése miatt.

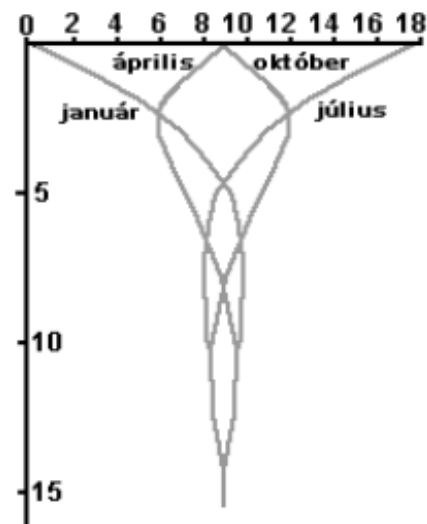
A táblázatos, jelenleg érvényben lévő 7/2006. TNM Rendelet bővített táblázata szerint a padló kerületénél az épület külső méreteit kellene alapul venni, míg a rendelet összes többi számításánál belső méretekkel kell dolgozni, ez következetlen megoldás. Ugyanígy következetlen, hogy a jelenlegi rendelet ragaszkodik a padló esetében a hővezetési ellenállás szerint megadott értékekhez, holott a követelményszinteknél a padló hőátbocsátási tényezőjét adják meg. Ennek az értéknek a reciprokanak bevonása a számításba véleményem szerint egy felesleges lépés, a fizikai tartalom nem változik ettől, csak a forma.

A táblázat értékei esetében semmilyen információ nem áll rendelkezésünkre, hogy az adott épületet milyen talajra építettük, holott a talajoknak eltérő hővezetési tényezőjük és térfogati hőkapacitás értékük van.

Az eddigiekben ismertetett számítási módszerek esetében a padlószerkezet vastagsága sosem játszott szerepet, sem a padlószerkezet rétegeinek sorrendje, pedig a padlószerkezetek hővezetési ellenállása igen nehezen és csak egy bizonyos szintig növelhető a rétegvastagság növelése nélkül.

Továbbá egyik számítási módszer sem veszi figyelembe, illetve említi meg a talajhő hatását, mely a 13. ábrán látható módon hazánkban átlagosan 15 m mélységben állandó $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ hőmérsékletű, és hatása a talajjal érintkező szerkezetek hőtranszport folyamataiban is szerepet játszik.

Az említett hiányosságok kiküszöbölhetőek lennének egy olyan számítási módszer segítségével, ami a jelenlegi eljárások pozitív tulajdonságainak megtartása és a jelenlegi technikai fejlettség mellett (pl. az utóbbi harminc év számítógépes fejlődése) megalkotható, értve ez alatt egy tranziens numerikus szimuláción alapuló módszer kifejlesztését, majd annak jelenlegi táblázatos formátumúvá való alakítását.



13. ábra: Talajhőmérséklet éves vázlatos diagramja [foek.hu]

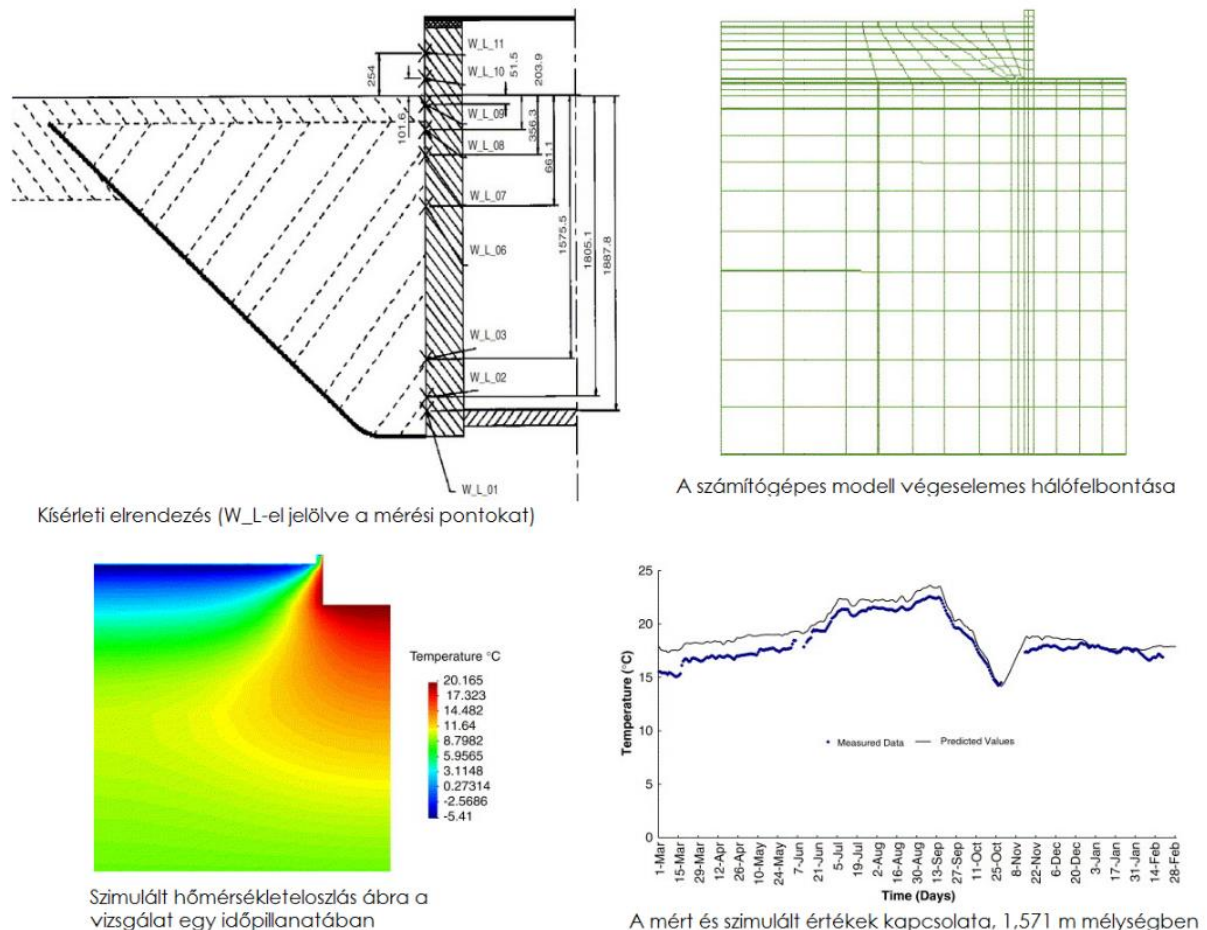
4.10. A modellezés és a valóság kapcsolata

Rees és kutatótársai több mint egy évig mérték egy kísérleti, fűtött pincével rendelkező épület hőmérsékleteit a pincefal bizonyos pontjainál és ezt vetették össze a szimulált eredményekkel. A szimulációhoz végeselemmódszert alkalmaztak, mely során a tranziens differenciálegyenletet kétdimenziós térben oldották meg.

A talajjal érintkező szerkezet időben változó szimulációhoz szükséges hőtechnikai (hővezetési tényező, térfogati hőkapacitás) tulajdonságait feltárással, majd a minták vizsgálata során közvetett, számítási módszerek alkalmazásával határozták meg.

Mint azt a 14. ábrán is láthatjuk, a többdimenziós hőtechnikai szimuláció megfelelően és részletes megalkotott geometriai modell esetén, az anyagjellemzők pontos

ismeretével és jól megválasztott külső és belső hőmérsékletfüggvények (mint peremfeltételek) alkalmazásakor az eredmények korrelálnak a mérési eredményekkel és igen közel tudnak kerülni a valós, mért értékekhez.



14. ábra: Talajjal érintkező pincefal és padló nagymodell kísérleten mért felületi hőmérsékleteinek és kétdimenziós dinamikus hőtechnikai szimuláció útján számított eredmények összehasonlítása egy éves periódus figyelembevételével [Rees et al. 2007]

4.11. Magyarország éghajlata

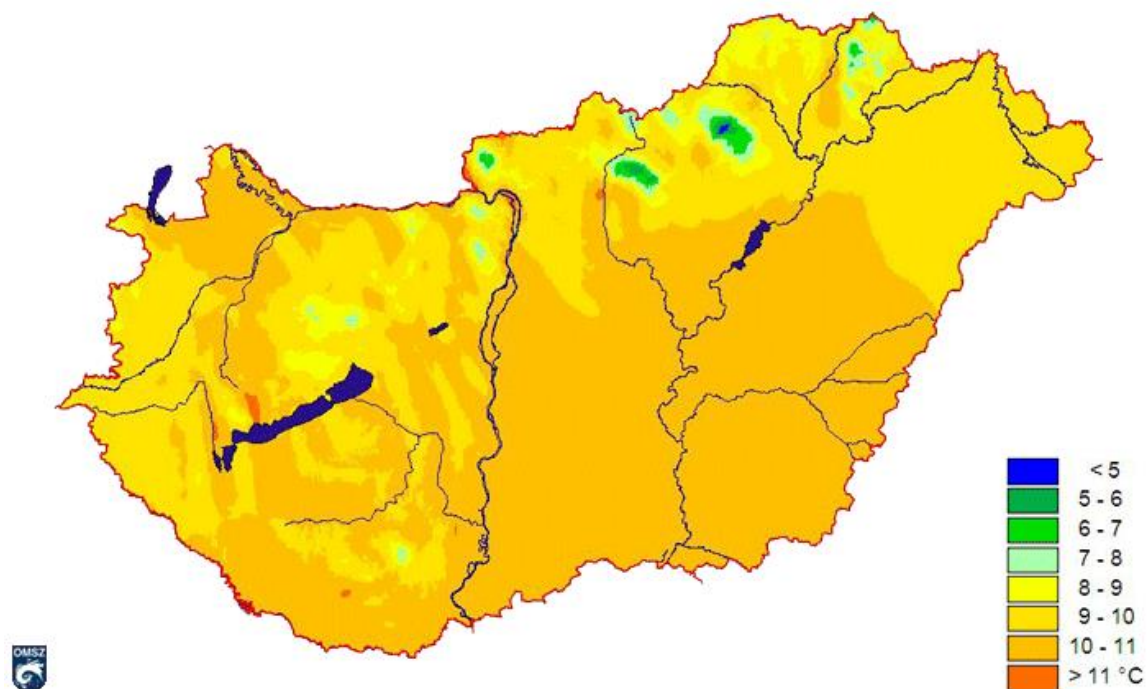
A tranziens hőtechnikai modellezéshez elengedhetetlen a vizsgált időszakra vonatkozó külső és belső hőmérséklet ismerete, változásának pontos leírása. A külső hőmérséklet regionális figyelembevétele, hazánk éghajlati zónákra való felosztása pedig összhangban van a 2010/31/EU irányelvvel.

4.11.1. ÉVES ÁTLAGOS NAPI KÖZÉPHŐMÉRSÉKLET

Az évi középhőmérséklet alapján az ország legnagyobb része a 10 °C – 11 °C-os tartományba esik, melyet a 12-es ábrán is láthatunk. A második legjelentősebb éghajlati zónát pedig a 9 °C – 10 °C-os éves középhőmérséklet jellemzi. Hazánk további pontjain ettől eltérő hőmérsékletek is megfigyelhetők, például a Kékestetőn az elmúlt 30 év mérései 5,8 °C-os évi középhőmérsékletet mutattak.

A kutatás szempontjából azonban nem csupán az évi, hanem a fűtési idény átlaghőmérséklete is jelentős szerepet játszik. A vonatkozó adatok szerint a fűtési idény hónapjainak átlaghőmérséklete az országunk területén -5 °C és 5 °C-os hőmérsékleti tartományban mozog [Nagy 2011]. A tranziens szimulációk futtatásához azonban a havi pontosságú adatok nem elegendők, így a dolgozatban a későbbiekben hazánk éghajlatának napi középhőmérsékletének elemzésével is foglalkozunk, mely segítségével előállíthatjuk a két nagy hőmérsékleti zónára jellemző hőmérsékleti függvényeket.

A függvény előállításához viszont az éves hőingás mértékét is ismernünk kell, mely az Alföldön 24 °C – 25 °C –os, míg a magashegységeinkben 20 °C alatti, átlagosan pedig 22 °C körül mondható.



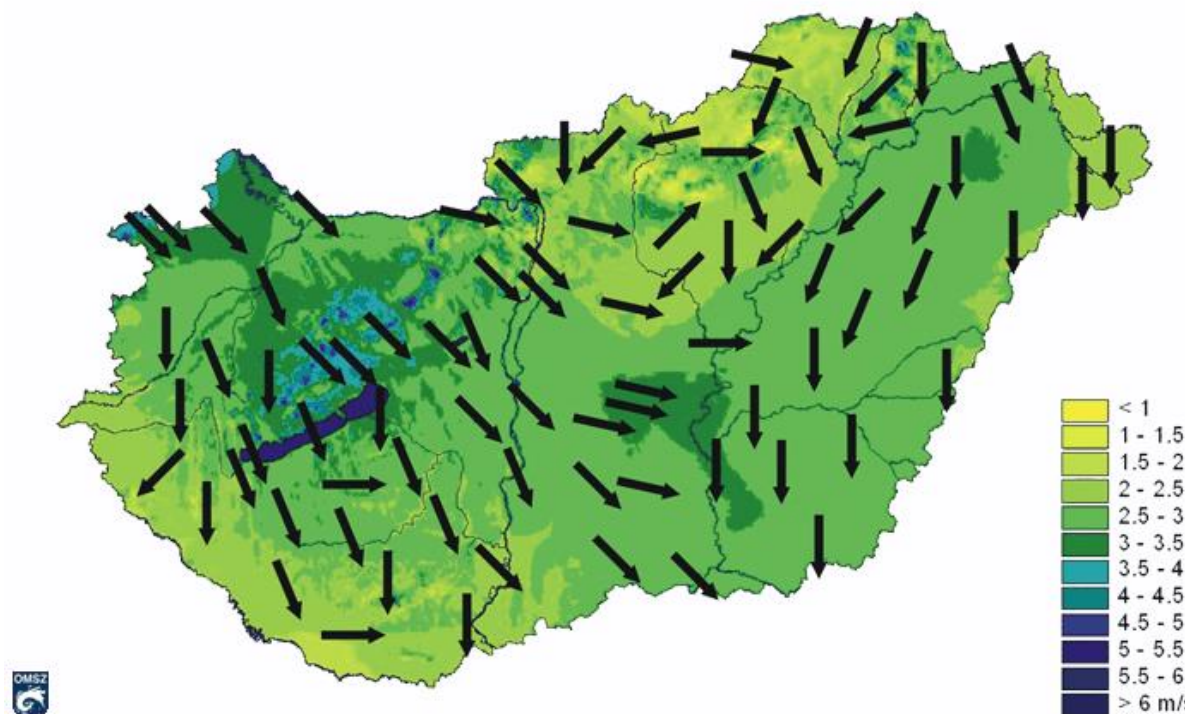
15. ábra: Az évi átlagos középhőmérséklet Magyarországon az 1971-2000 közötti időszak alapján.
[www.met.hu]

4.11.2. SZÉLSEBESSÉG

A hazánkra jellemző szélsébséget a kutatás új módszerének létrehozásához elvégzett tranziens végelelemes szimulációk során szintén dinamikusn változó felületi ellenállások meghatározása miatt kell ismernünk. A 13. ábrán láthatóak a hazai földfelszíni mérésekből meghatározott uralkodó szélirányok és a szélsébség nagysága, melyet m/s-ban ábrázoltak a térkép készítői.

Az ábrán látható, hogy hazánk legtöbb területén a szélsébség 2,5 m/s és 3,5 m/s közötti, ezért ennek jellemzésére a 3 m/s-os értéket tartom megfelelőnek a vizsgálat szempontjából. Ez eltér az MSZ EN ISO 6946:2008 szabványban szereplő 4 m/s-tól, mely azonban nem hazánkra, hanem Európára (azon belül is a már említett svéd kutatók munkájában) meghatározott érték.

A hazánkra jellemző szélsébség alkalmazása a felületi ellenállások számítása esetében szintén az Európai Unió Parlamentjének és Tanácsának irányelve szerint való.



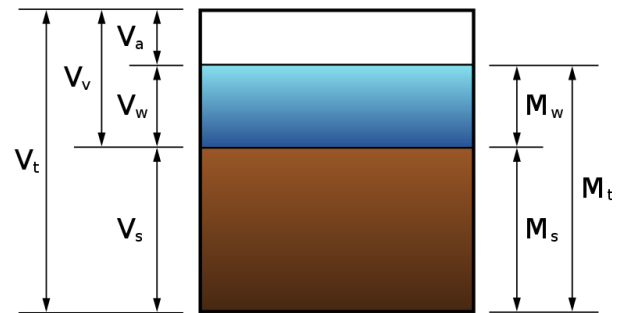
16. ábra: Az évi átlagos szélsébségek (m/s) és az uralkodó szélirányok Magyarországon. [www.met.hu]

4.12. Talajfizikai jellemzők meghatározása

A 4.4-es pontban bemutatott számítások elvégzéséhez, valamint a talajok azonosításához szükségünk van a talajok egyes fizikai jellemzőinek meghatározására.

4.12.1. TALAJOK FÁZISOS ÖSSZETÉTELE, JELLEMZŐI

Mind a hővezetési tényező, mind pedig a hőkapacitások meghatározásához szükség van a talajok fázisonkénti összetevőinek arányára. A 17-es ábrán „V” jelölésekkel az idealizált talajmodellel feltüntetésre kerültek az egyes térfogatok jelölései, „M” pedig az adott fázisok tömegjellemzőit jelöli.



17. ábra: Talajok fázisos összetétele [wikipedia.com]

A laborba háromféle talajminta érkezik. Zavartalan minta (magminta) esetén a talaj a vizsgálat időpontjáig megőrzi tulajdonságait. Víztartalmi (részben zavart) mintáról beszélhetünk, ha a minta a vizsgálatok időpontjáig megőrizte víztartalmát, de egyéb tulajdonságai részben megváltozhattak. Zavart mintáról pedig akkor van szó, ha sem a talaj szerkezetét, sem pedig víztartalmát nem őriztük meg, valamint zavart mintának számít az is, ha egy minta a mintavételt követően megfagyott.

A talajok tömeg- és térfogatjellemzőinek számításához legalább víztartalmi minta kell, mely esetben mérhetjük „m_n” nedves tömeget és „m_d” száraz tömeget.

4.12.1.1. Fázisos összetétel jellemzői

A fázisos összetétel 4.4-es pontbéli, „x”-el jelölt egymáshoz viszonyított térfogatarányait a talajt alkotó három eltérő halmazállapotú közeg térfogatának a teljes térfogathoz való viszonyított értéke. A talajösszetevők részaránya számítható közvetlen mérési eredményekből is, ahol $\rho_s = 2,67 \text{ g/cm}^3$ és $\rho_v = 0,9977 \text{ g/cm}^3$ 10°C-on:

$$x_s = \frac{m_d}{\rho_s \cdot V_t} \cdot 100 \quad [\%] \quad (59)$$

$$x_f = \frac{m_n - m_d}{\rho_v \cdot V_t} \cdot 100 \quad [\%] \quad (60)$$

4.12.1.2. Víztartalom

A 4.4.2.3. pontban bemutatott Sikora & Kossowski féle térfogati hőkapacitás meghatározásához szükséges ismernünk az adott talajminta víztartalmát kg/kg-ban, mely a talajban lévő víz tömegének a száraz talajhoz viszonyított értéke.

$$\theta_w = \frac{m_n - m_d}{m_d} \quad \left[\frac{kg}{kg} \right] \quad (61)$$

4.12.1.3. Térfogatsűrűség

A térfogatsűrűséget a talaj tömegének és a minta által elfoglalt térfogatnak a hányadosaként számíthatjuk, például a talajminta nedves térfogatsűrűsége:

$$\rho_n = \frac{m_n}{V_t} \quad \left[\frac{kg}{m^3} \right] \quad (62)$$

4.12.1.4. Hézagtérfogat

A módosított Johansen módszer szerinti hővezetési tényező meghatározáshoz szükséges ismernünk a talajminta hézagtényezőjét, mely a talajban lévő, vízzel és/vagy levegővel kitöltött hézagok (pórusok) térfogatának és a teljes térfogatnak a viszony-száma. A hézagtényező számítható a minta száraz tömegének, szilárd alkotórészei térfogatsűrűségének és teljes térfogatának ismeretében is:

$$n = \left(1 - \frac{m_d}{\rho_s \cdot V_t} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (63)$$

Az egyes talajok hézagtérfogata tág határok között változhat. A leglazább állapotban a hézagtérfogat $n = 50 \%$, a legtömörebb állapotban pedig $n = 30 \%$ körül van. Vegyes nagyságú szemcsék esetén az apróbb szemcsék jól ki tudják tölteni a durvaszemcsék közötti hézagokat, például agyaggal keveredett szemcsés talajok esetében a hézagtérfogat az elméleti értéknél kisebb, akár $n = 20\%$ is lehet [Mecsi 2009].

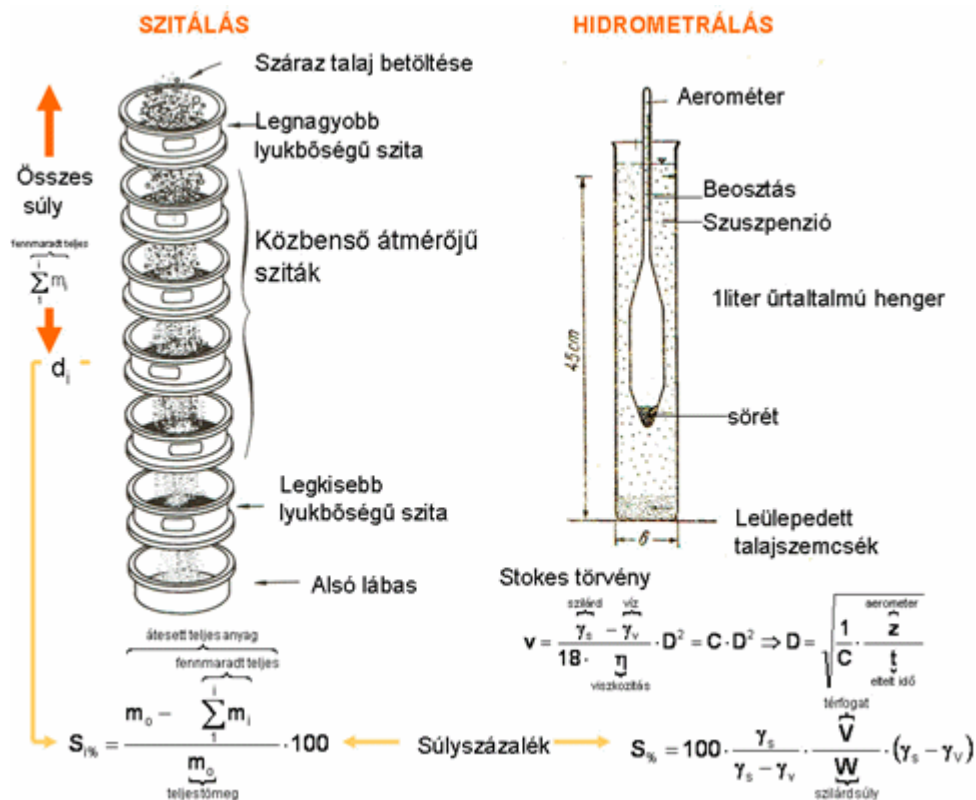
4.12.1.5. Telítettségi fok

Ugyancsak a módosított Johansen módszerhez szükséges a talajminta telítettségi fokának ismerete, mely a vízzel kitöltött hézagok térfogatának és az összes hézag térfogatának arányaként számítható. A talajok paramétereinek közötti kapcsolatot kihasználva számítható például az „e” hézagtenyező (mely a talajban lévő vízzel és/vagy levegővel kitöltött hézagok szilárd anyaghoz viszonyított térfogatarányát mutatja) és a víztartalom ismeretében:

$$S_r = \frac{\theta_w \cdot \rho_s}{e \cdot \rho_v} = \frac{\frac{m_n - m_d}{m_d} \cdot \rho_s}{\left(\frac{\rho_s \cdot V_t}{m_d} - 1\right) \cdot \rho_v} = \frac{(m_d - m_n) \cdot \rho_s}{(m_d - \rho_s \cdot V_t) \cdot \rho_v} \quad [-] \quad (64)$$

4.12.2. SZEMELOSZLÁSI GÖRBE MEGHATÁROZÁSA

A talajazonosítás szemcsés talajok esetén szemeloszlási görbe alapján az egyes frakciók tömegszázalékának ismeretében történik. A szemeloszlási görbét a szemcse-méret alapján két eljárás segítségével állítjuk elő, melyek az alábbi ábrán is láthatóak.



18. ábra: Szitálás és hidrometrálás [Mecsi 2009]

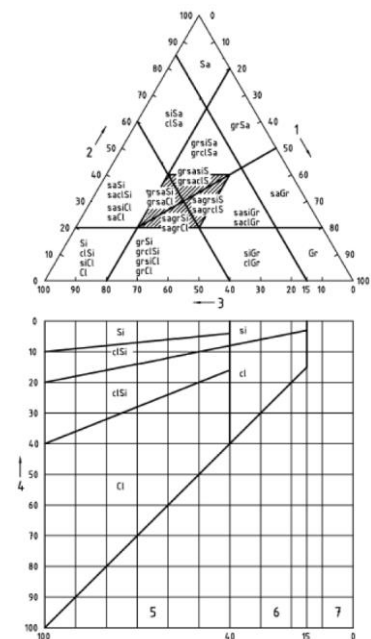
A durva szemcsék ($d > 0,063$ mm) tömegarányát a talajmintában szitálással határozzuk meg, mely során az egyes szemnagysághoz tartozó tömegszázalékot azon legkisebb kör vagy négyzet alakú szitanyílás (átmérője/oldalhossza) alapján regisztráljuk, melyen még éppen átesik. A finom szemcsék ($d < 0,063$ mm) egyes frakciókhoz tartozó tömegszázalékának meghatározása során hidrometrálást alkalmazunk, mely során kihasználva, hogy a különböző méretű szemcsék a folyadékban különböző sebességgel ülepednek, az adott szemcseméret azon gömbnek átmérője lesz, ami a folyadékban azonos sebességgel ülepedik (feltételezve, hogy a szemcsék azonos sűrűségűek).

A dolgozatban vizsgált talajminták szemeloszlási görbéit, melyek az MSZE CEN TS/ISO 17892-4:2006 szabvány szerint a BME Geotechnikai Tanszékének Talajmechanikai Laboratóriumában készültek (a talajminták kiszárítását a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékének Anyagvizsgáló Laboratóriumában végeztük) a Melléklet tartalmazza.

4.12.3. TALAJOK AZONOSÍTÁSA

A talajok azonosítása az MSZ EN ISO 14688-2:2004 szabvány alapján a kavics, homok és iszap+agyag frakciók háromszögdiagramon történő ábrázolása segítségével a diagramról történő leolvasással történik. A talajminta iszapos vagy agyagos mivoltát az iszap+agyag tömegszázalékát levetítve egy másik diagram abcisszájára és a diagram ordinátáján a minta agyagtartalmát tömegszázalékban ábrázolva azon diagramterület elnevezését alkalmazzuk, ahová a metszéspont esett.

A talajazonosításhoz használt diagram a jobb oldali ábrán látható, melyet nagyobb méretben és feliratozva 5. fejezetben, a hazai talajminták azonosítása során mutatom is láthatjuk majd.

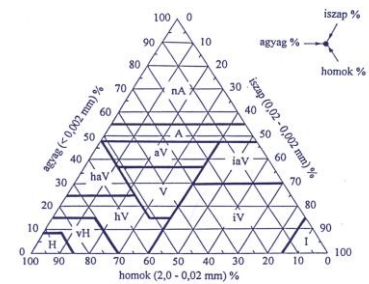


19. ábra: Talajazonosításhoz használt diagramok [Mahler 2013]

4.12.4. TALAJOK TEXTÚRÁJA

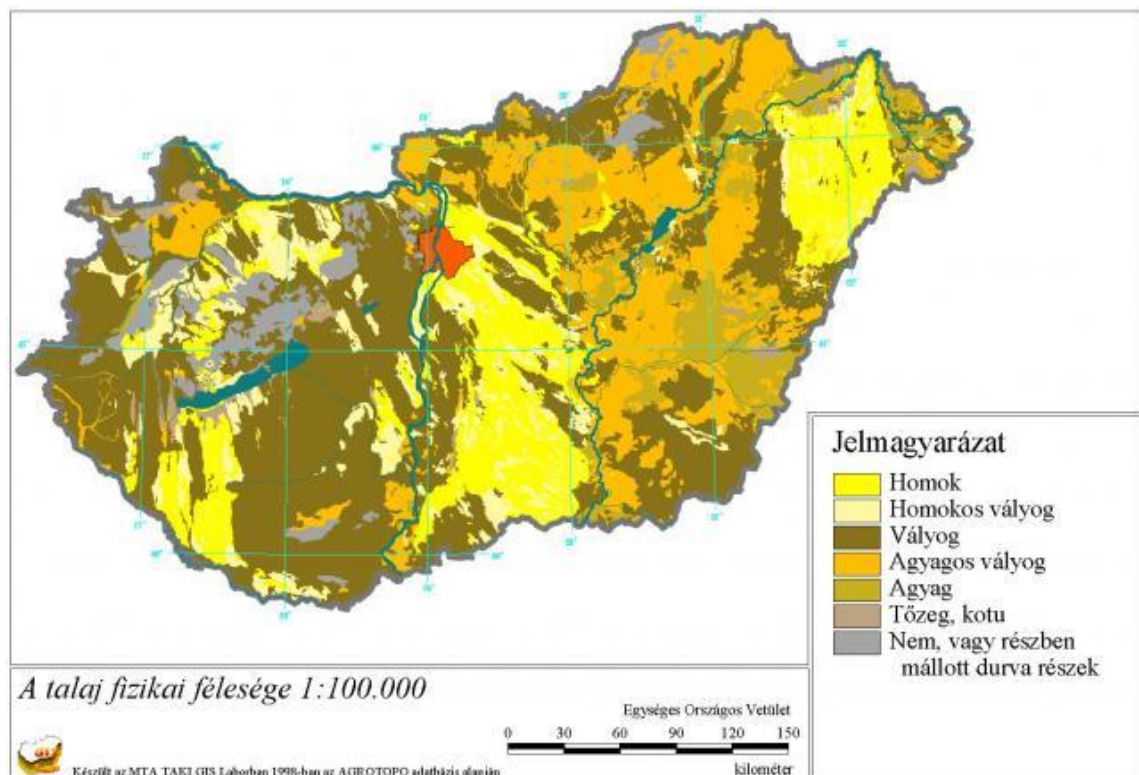
A talajok fizikai féleségének beazonosítása a módosított Johansen módszerhez szükséges, hogy a 2. táblázat segítségével megbecsülhessük a minta kvarctartalmát.

A talajtextúra meghatározása során a Nemzetközi Talajtani Társaság Atterberg-féle rendszerét alkalmazzuk a szemcsefrakciók mérethatárainak meghatározásához. Ez annyiban tér el talajazonosításhoz alkalmazott szabványos szemcsefrakciók méret meghatározásától, hogy a homok frakciót 0,2 mm - 2,0 mm közöttinek állapítja meg, szemben a szabványos 0,063 mm – 2,0 mm közöttitől, emiatt az iszap frakció szemnagyság méretének határai is eltolódnak. Az agyag frakció mindkét esetben a 0,002 mm-nél kisebb szemcseméret. E miatt a szemeloszlási görbéről leolvasott tömegszázalék arányok eltérőek lesznek a talajazonosításhoz meghatározottaktól.



20. ábra: Talajtextúra osztályozáshoz használt diagram [Varga 2008]

A talajtextúra meghatározását ezután a 20. ábrán kicsiben látható háromszögdiagram alapján végezzük, melyen a tengelyek az agyag, az iszap és a homok frakció tömegszázalékos arányát jelölik a mintában. A dolgozatban vizsgált talajmintákhoz készített diagramok értelmezhető méretben is láthatóak a következő 5. fejezetben.



21. ábra: Hazánk talajainak fizikai félesége [enfo.agt.bme.hu]

A fenti ábrán Magyarország talajtextúrái látszanak, mely alapján hazánkban a vályog, a homok és az agyagos vályog talaj fordul elő leggyakrabban.

5. HAZAI TALAJOK ÉPÜLETFIZIKAI JELLEMZŐINEK VIZSGÁLATA

5.1. Talajminták és származási helyük

A dolgozat vizsgálataihoz a BME Geotechnikai Tanszékétől 5 db zavart, de víztartalmi talajmintát kaptam, melyek között az 1-3.-as talajminta azonos helyről, de eltérő fúrásmélységből (4 m - 5 m - 6 m) származott. Ezen három talajminta látható a 22. ábrán. E három minta mennyisége adott a későbbiekben egy hőtechnikailag is vizsgálható mennyiségű talajmintát. Az összekeverésre azért is volt lehetőség, mert a három víztartalmi minta szemrevételezés alapján azonos talajokat tartalmazott.

A három mintából összekevert 3-as minta Érdről származik, átlagosan 5 méteres fúrásmélységből, szemrevételezés alapján magas agyag+iszap taralommal. A 4-es talajminta Budapestről való 1 méteres felszín alatti mélységből és közel azonos mennyiségben tartalmazhat agyag+iszapot mint homokot. Az 5. talajminta Vámoszabadiból érkezett szintén 1 méteres mélységből, ez valamilyen



22. ábra: Víztartalmi talajminták

homoktalajnak feltételezhető szemrevételezés alapján. Az egyes talajmintákon található címkéket és a talajokat, formázva a segédfűtőlapos berendezéssel történő hővezetési tényező mérésre, az alábbi képen láthatjuk.

3. minta

GEOSZFÉRA Kft. - 34/425-073 209/384-840			
Mintavétel helye:	Érd Retyezati u. 48.		
Mintavevő neve:	Janovics János		
Fúrás sz:	1	Mélység:	5,0 méter
Időpontja:	2013.07.01		



4. minta

GEOSZFÉRA Kft. - 34/425-073 209/384-840			
Mintavétel helye:	BUDAPEST Stefánia út - rendőrség		
Mintavevő neve:	Boros János		
Fúrás sz:	17	Mélység:	1,0 méter
Időpontja:	2013.09.12		



5. minta

GEOSZFÉRA Kft. - 34/425-073 209/384-840			
Mintavétel helye:	VÁMOSSZABADI Szendefy munka		
Mintavevő neve:	Lengyel Béla		
Fúrás sz:	6	Mélység:	1,0 méter
Időpontja:	2013.09.12		



23. ábra: Talajminták származási helye és a segédfűtőlapos hővezetési tényező mérése utáni állapota

5.2. A talajminták talajfizikai jellemzői

Az immáron három talajminta talajfizikai jellemzőit a 4-es fejezetben bemutatott módszerekkel határoztam meg. A nedvességtartalom meghatározásához a 24-es ábrán látható gyors nedvesség meghatározó készüléket alkalmaztam, mellyel a minták száraz és nedves tömegét 0,001 g pontossággal határoztam meg, ehhez azonban a nagyobb minták egy résztartományának vizsgálata volt szükséges. A vizsgálatot ezért a talajok térfogati jellemzőit a segédfütlapos hővezetési tényező méréshez készített 180 mm x 180 mm x 40 mm-es testekből kivágott kisebb mintákon végeztem el.



24. ábra: RADWAG MAC 110 gyors nedvesség meghatározó szárítós mérleg készülék

A talajfizikai jellemzőket az általunk formázott talajtest méretei alapján számítottam, mivel a kapott minták nem zavartalanok voltak, levegőtartalmuk és hézagosságuk a mintavételt követően változott. Ennek hátránya, hogy a vizsgált talaj hézagtérfogata e miatt magasabbra adódhatott, mint a helyszínen lévő talajé, ezt azonban csak zavartalan mintával ellenőrizhattük volna, ami nem állt rendelkezésre.

A mintákra vonatkozó talajfizikai jellemzőket az alábbi táblázatokban összefoglalva közlöm:

Minta	180x180x40 mm-es talajtestből kivágott minta		
	Nedves tömege	Száraz tömege	Nedvességtartalma
	m_n g	m_d g	θ_w kg/kg
3. minta	34,458	28,901	0,1923
4. minta	37,041	31,237	0,1858
5. minta	28,307	25,973	0,0899

4. táblázat: Tömeg és nedvességtartalom kivágott minta alapján

Minta	180x180x40 mm-es talajtest						
	térfogata	nedves tömege	száraz tömege	nedves térfogat-sűrűsége	száraz térfogat-sűrűsége	nedves térfogat-súly	száraz térfogat-súly
	cm ³	m _n g	m _d g	ρ _n kg/m ³	ρ _d kg/m ³	γ _n kN/m ³	γ _d kN/m ³
3. minta	1296	2287	1918	1764,66	1480,08	17,31	14,52
4. minta	1296	2176	1835	1679,01	1415,93	16,47	13,89
5. minta	1296	1890	1734	1458,33	1338,09	14,31	13,13

5. táblázat: Nedves és száraz tömeg és térfogatsűrűség 180x180x40mm-es minta alapján

Minta	180x180x40 mm-es talajtest				
	hézagtérfogata	telítettségi foka	szilárd része	víz része	levegő része
	n %	S _r -	x _s %	x _f %	x _a %
3. minta	44,57	0,64	55,4	28,5	16,0
4. minta	46,97	0,56	53,0	26,4	20,6
5. minta	49,88	0,24	50,1	12,1	37,8

6. táblázat: Hézagtérfogat, telítettségi fok és talajösszetevők részarányai 180x180x40 mm -es minta alapján

5.3. A talajmintákat alkotó frakciók meghatározása

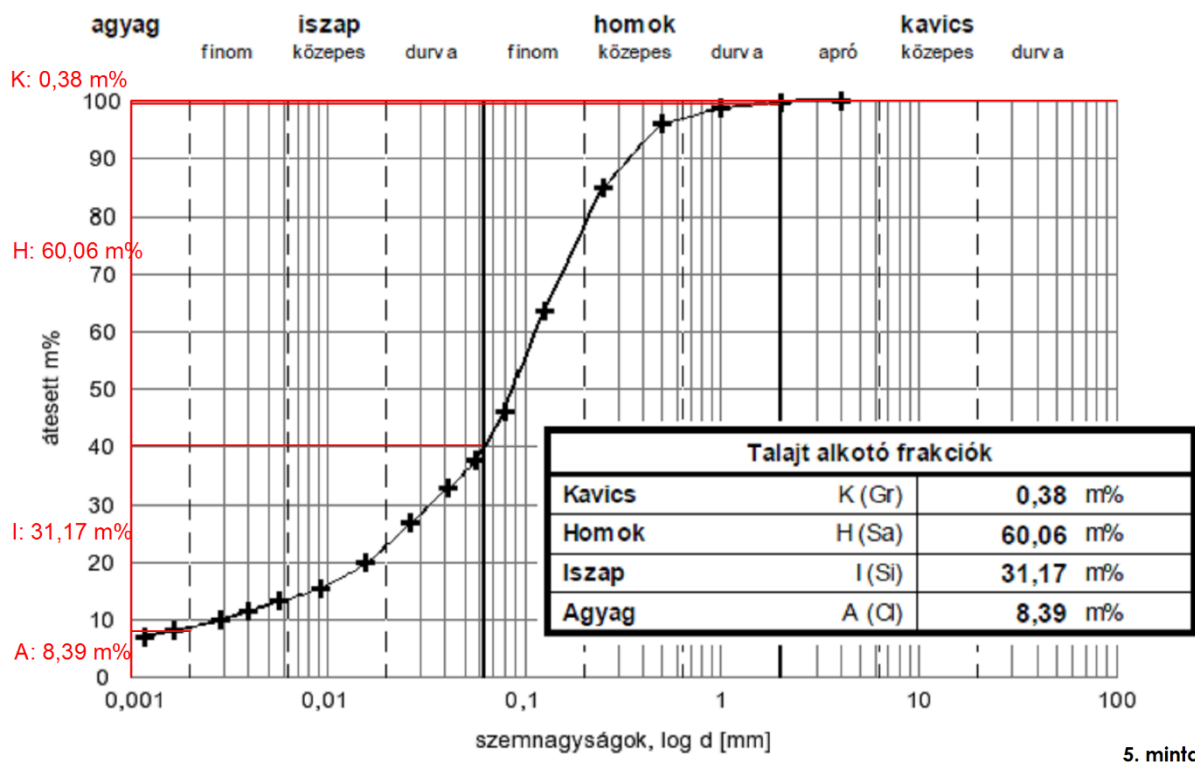
A talajminták szemeloszlási görbéjének előállításához a talajmintákat kiszárítottuk, így a szitálás során száraz eljárást alkalmaztunk. A rögök szétaprítása után a mintát PASCALL ENG. 12404-es szitarázó segítségével BÉTI 200mm / 0,063-63 mm-es szitasoron rostáltuk át és a szitákon fennmaradt talajok tömegét KERN PLJ 4000-2M mérlegen lemertük és a mért tömegek alapján határoztuk meg az egyes szitákon áthullott tömegszázalékokat.

A 0,063 mm-nél kisebb frakciókat hidrometrálással, ANDREAS KFT. 68-as hidrométer és KERN PLJ 4000-2M mérleg alkalmazásával határoztuk meg. Az eredményeket



25. ábra: BÉTI 200 mm / 0,063-63 mm-es szitasor és PASCALL ENG. 12404 szitarázó [kép: Mahler András]

a Mellékletben található vizsgálati jegyzőkönyvben találhatjuk, az alábbi ábrán pedig az 5. minta esetében jelöltem az egyes talajt alkotó frakciók tömegszázalékának értelmezését a szemeloszlási görbén.



26. ábra: Talajt alkotó frakciók tömegszázalékának értelmezése

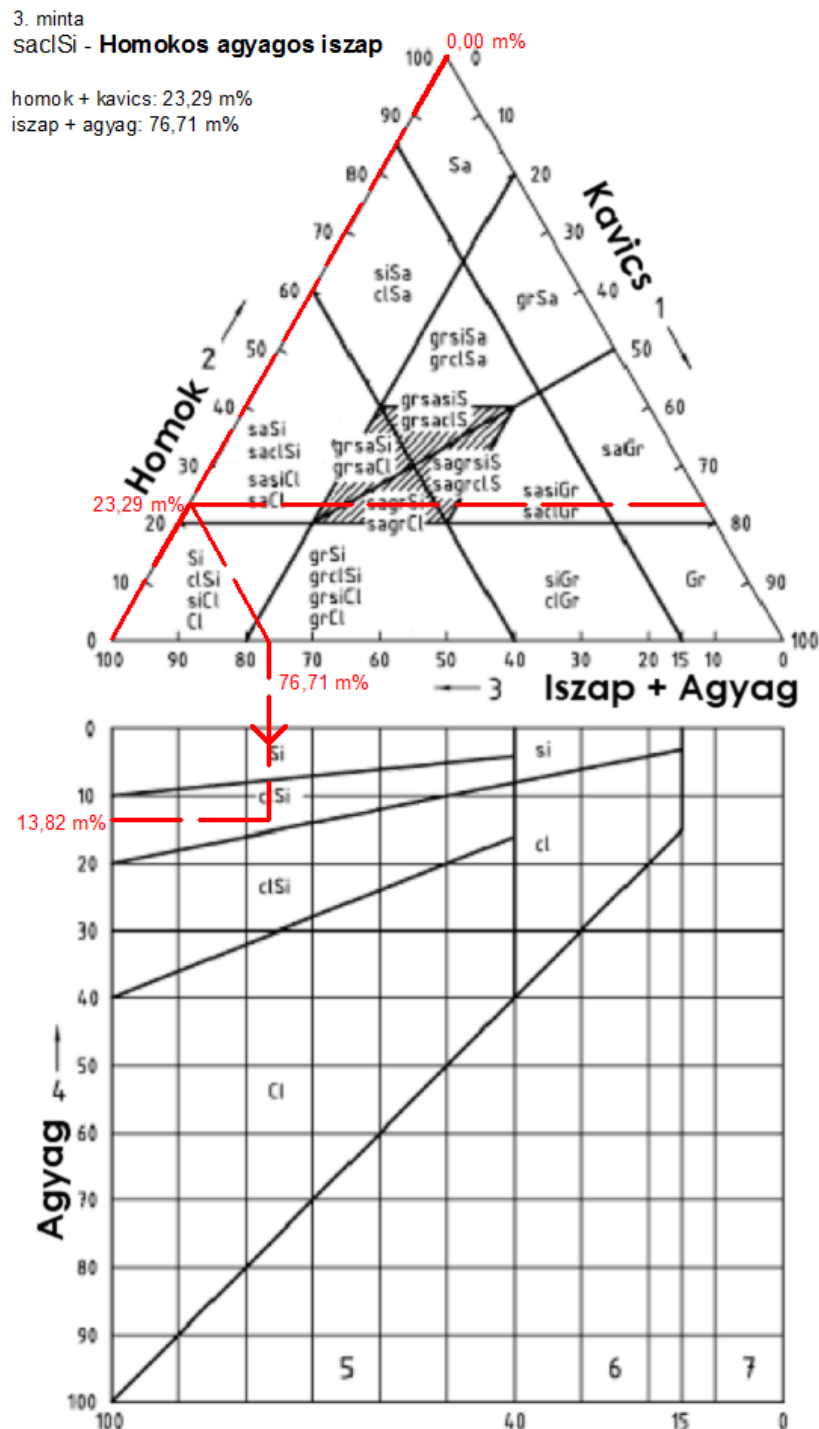
A talajmintákat alkotó frakciókat az MSZE CEN TS/ISO 17892-4:2004 szabvány szerint és az Atterberg-féle rendszer szerint (amely esetében a szabvány szerinti durva iszap már finom homoknak minősül) a következő 7. táblázat tartalmazza.

Minta	Talajt alkotó frakciók MSZE CEN TS/ISO 17892-4:2006 alapján				Talajt alkotó frakciók az Atterberg-féle rendszer szerint			
	kavics K (Gr) m%	homok H (Sa) m%	iszap I (Si) m%	agyag A (Cl) m%	kavics K (Gr) m%	homok H (Sa) m%	iszap I (Si) m%	agyag A (Cl) m%
3. minta	0,00	23,29	62,89	13,82	0,00	60,83	25,35	13,82
4. minta	0,00	46,68	39,51	13,81	0,00	64,34	21,85	13,81
5. minta	0,38	60,06	31,17	8,39	0,38	76,70	14,53	8,39

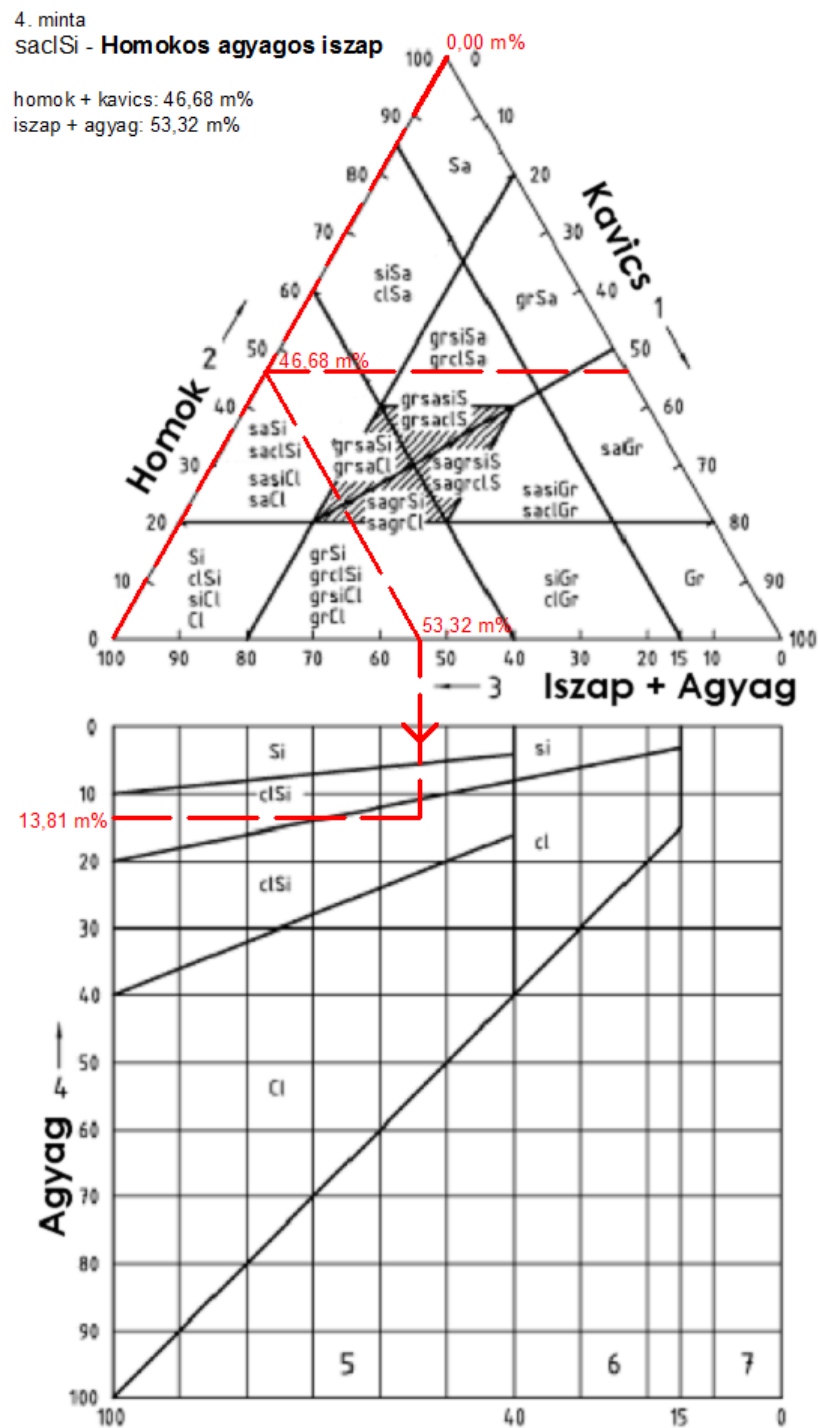
7. táblázat: Talajmintákat alkotó frakciók térfogatszázaléka

5.4. A talajminták azonosítása

Az egyes talajmintákat a 4.13.3-as pont szerint az MSZ EN ISO 14688-2:2004 szabvány alapján azonosítottam. A minták azonosítása és megnevezése a következő három ábrán is látható. Az azonosítás alapján a 3-as és 4-es minta homokos agyagos iszapnak minősül, az 5-ös minta pedig iszapos homoknak.



27. ábra: 3. minta azonosítása: Homokos agyagos iszap



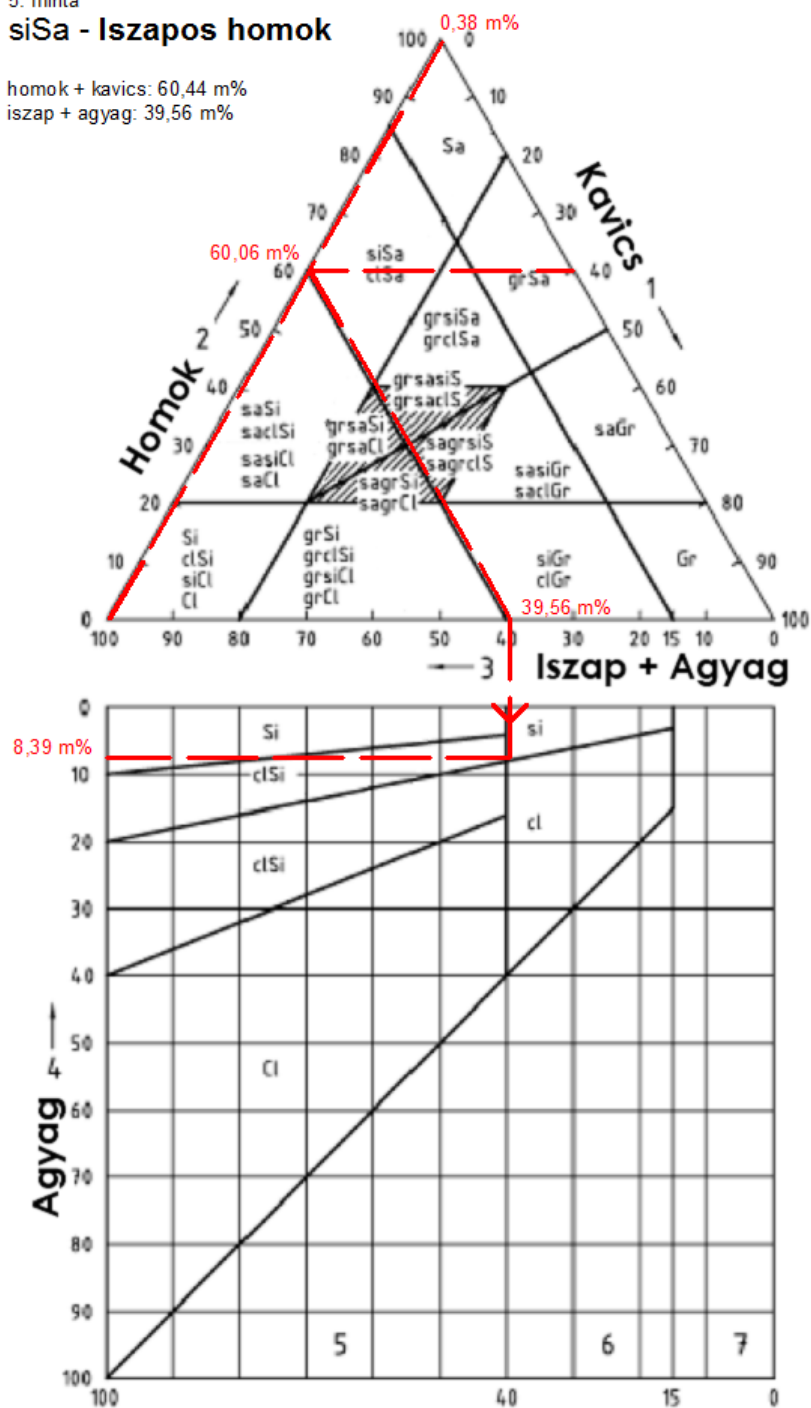
28. ábra: 4. minta azonosítása: Homokos agyagos iszap

5. minta

siSa - Iszapos homok

homok + kavics: 60,44 m%

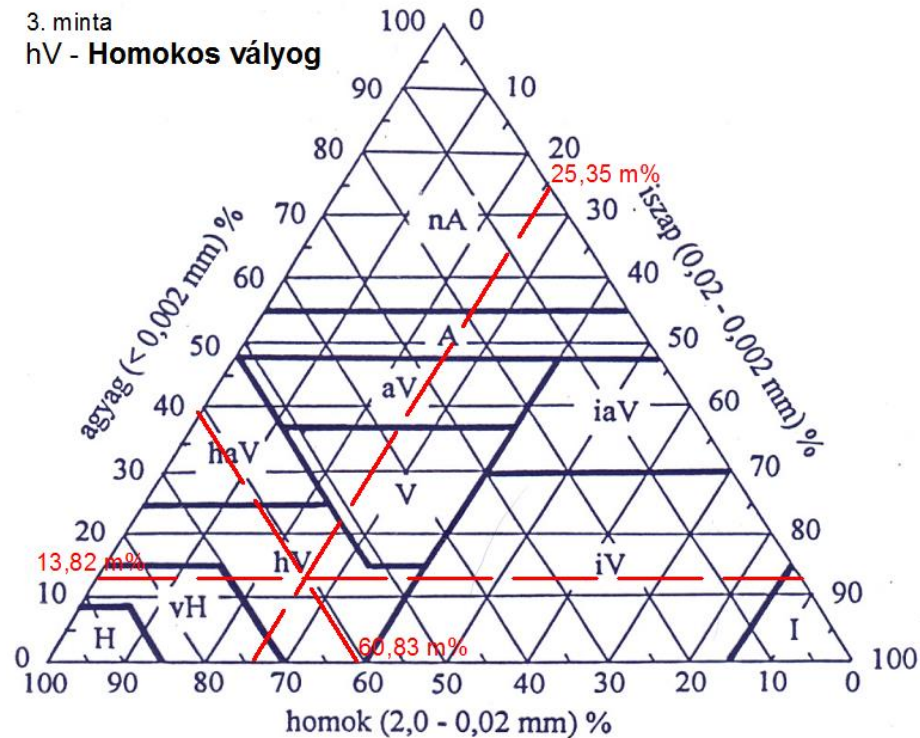
iszap + agyag: 39,56 m%



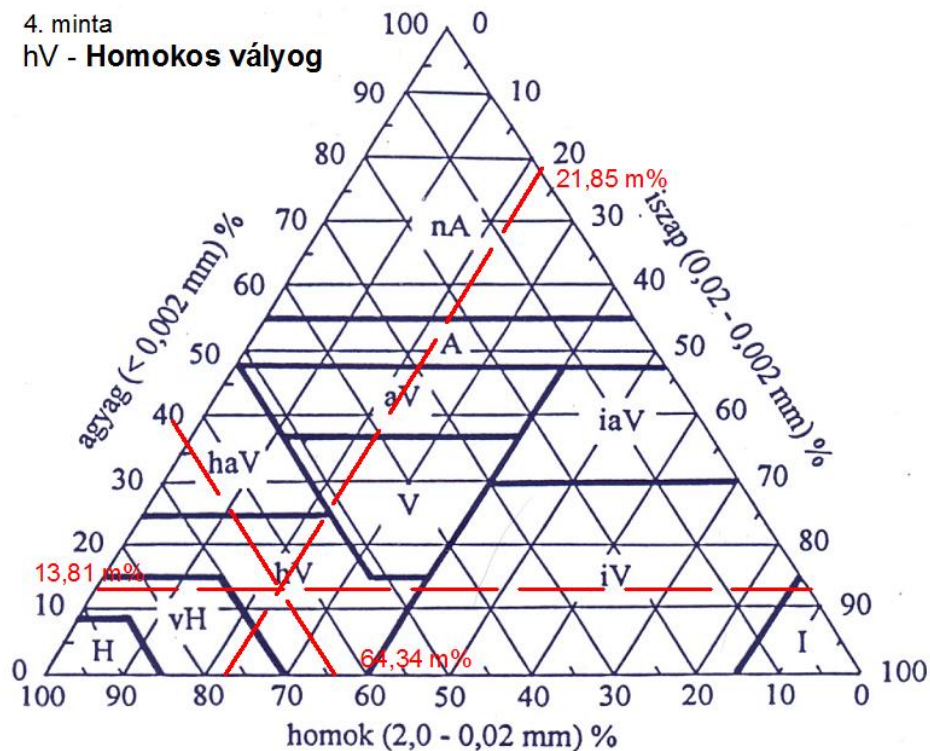
29. ábra: 5. minta azonosítása: Iszapos homok

5.5. A talajminták textúrája

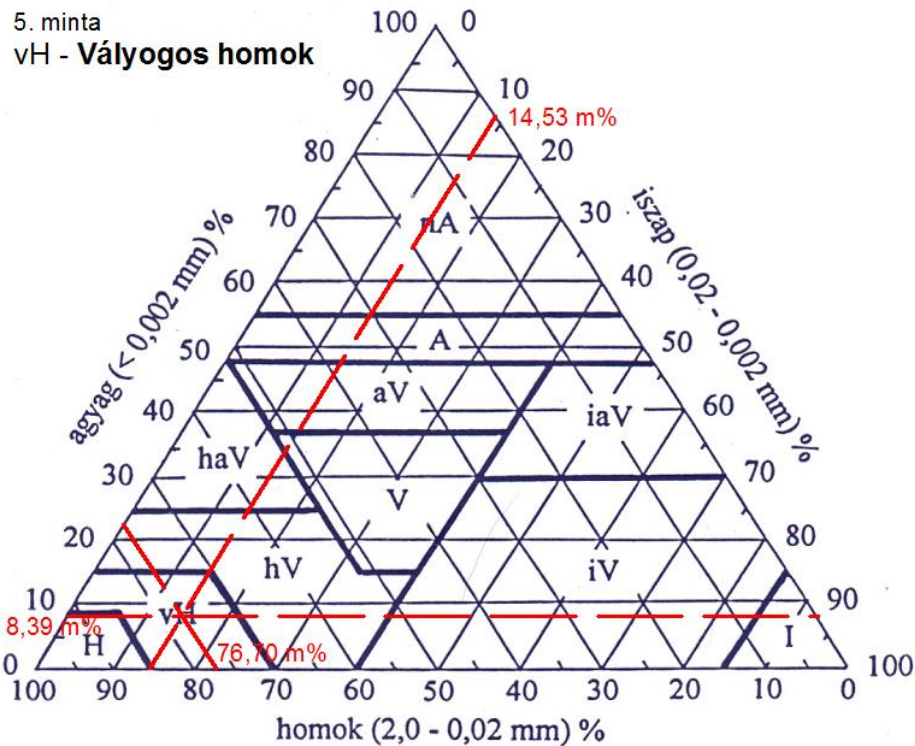
A vizsgált talajminták fizikai féleségének meghatározását az alábbi három ábrán mutatom be.



30. ábra: 3. minta talajtextúrája: Homokos vályog



31. ábra: 4. minta talajtextúrája: Homokos vályog



32. ábra: 5. minta talajtextúrája: Vályogos homok

Az osztályozás alapján a 3-as és 4-es minta homokos vályog, melynek kvarctartalma a 2. táblázat alapján 60%. Az 5. minta besorolása vályogos homok, becsült kvarctartalma pedig 82%-os.

5.6. Talajminták hővezetési tényezői

A hővezetési tényezőket a dolgozat 4.4.1-es pontjában ismertetett számítási és mérési módszerekkel határozom meg. A három eddigi talajmintán kívül azonban még két mintát vettem figyelembe, így a számításokat és a laborméréseket öt mintán keresztül mutatom be. Az eddigiekben vizsgált talajmintákon felüli két minta a 4-es és az 5-ös talaj kiszáritott állapotban.

A talajmintákat nedvességtartalmuk meghatározása és nedves állapotukban történő laborvizsgálatuk (hővezetési tényező meghatározása segédfűtőlapos berendezéssel) után, de



33. ábra: Taurus TLP 300 DTX segédfűtőlapos hővezetési tényező mérőműszer

még a szemeloszlás meghatározása előtt kiszárítottuk, de nem apróztuk fel, így azok megmaradtak az eredetivel közel azonos 180 mm x 180 mm x 40 mm-es téglatestként.

Az immáron öt minta hővezetési tényezőjének méréséhez Taurus TLP 300 DTX mérőműszert alkalmaztunk, amely a 33-as ábrán látható.

Az egyes módszerekkel számított hővezetési tényező értékeket valamint a számításhoz szükséges segédmenyiségeket a különböző módszerenként külön, táblázatosan foglaltam össze.

Minta	de Vries módszer							
	levegő rész	folyadék rész	szilárd rész	levegő λ -ja	víz λ -ja	szilárd λ -ja	F tényező	hővezetési tényező
	x_a [-]	x_f [-]	x_s [-]	λ_a W/mK	λ_f W/mK	λ_s W/mK	F [-]	λ W/mK
3. minta	0,16	0,29	0,55	0,025	0,60	2,92	0,44	1,27
4. minta	0,21	0,26	0,53				0,44	1,19
5. minta	0,38	0,12	0,50				0,44	1,00
4. minta - Szárított	0,46	0,01	0,53				0,03	0,12
5. minta - Szárított	0,50	0,00	0,50				0,03	0,10

8. táblázat: Hővezetési tényező számítása de Vries módszerrel

Minta	Módosított Johansen módszer 1.						
	hézag-térfogat	kvarc-tartalom	Agyag-tartalom	telítettségi fok	száraz térfogat-sűrűség	kvarc λ -ja	egyéb ásvány λ -ja
	n [-]	q [-]	A (Cl) m%	S_r [-]	ρ_d kg/m ³	λ_a W/mK	λ_o W/mK
3. minta	0,45	0,60	13,82	0,64	1480,08	7,70	2,00
4. minta	0,47	0,60	13,81	0,56	1415,93		
5. minta	0,50	0,82	8,39	0,24	1338,09		
4. minta - Szárított	0,47	0,60	13,81	0,03 ⁷	1415,93		
5. minta - Szárított	0,50	0,82	8,39	0,01 ⁷	1338,09		

9. táblázat: Hővezetési tényező számítása módosított Johansen módszerrel, segédmenyiségek

⁷ A kiszárított minták telítettségi foka értelemszerűen rendkívül alacsony, emiatt pedig a Johansen módszer nem képes értelmezhető végeredményt adni, mivel a Kersten szám negatív lesz.

Minta	Módosított Johansen módszer 2.			
	száraz hővezetési tényező	telített hővezetési tényező	Kersten szám	hővezetési tényező
	λ_{dry} W/mK	λ_{sat} W/mK	K_e [-]	λ W/mK
3. minta	0,20	1,77	0,81	1,47
4. minta	0,19	1,70	0,75	1,32
5. minta	0,17	1,70	0,38	0,75
4. minta - Szárított	0,19	1,70	-0,52	-0,60
5. minta - Szárított	0,17	1,86	-1,00	-1,51

10. táblázat: Hővezetési tényező számítása módosított Johansen módszerrel, eredmények

Minta	Endrizzi módszer						
	levegő rész	foladék rész	szilárd rész	levegő λ -ja	víz λ -ja	szilárd λ -ja	hővezetési tényező
	x_a [-]	x_f [-]	x_s [-]	λ_a W/mK	λ_f W/mK	λ_s W/mK	λ W/mK
3. minta	0,16	0,29	0,55	0,025	0,60	2,92	1,42
4. minta	0,21	0,26	0,53				1,30
5. minta	0,38	0,12	0,50				1,01
4. minta - Szárított	0,46	0,01	0,53				0,97
5. minta - Szárított	0,50	0,00	0,50				0,88

11. táblázat: Hővezetési tényező számítása Endrizzi módszerrel

A számítások elvégzése után az egyes módszerek eredményeit a következő oldalon található 12-es táblázatban összegzem⁸, melyben a laborban mért hővezetési tényezőket, valamint az MSZ EN ISO 13370:2008 szabványban megadott reprezentatív hővezetési tényezőket is feltüntettem.

⁸ Az eredmények összehasonlításakor a negatív hővezetési tényező helyett a módosított Johansen módszer λ_{dry} száraz hővezetési tényezőjét fogom figyelembe venni, mivel a kiszárított minták esetében nem csak a Kersten szám, hanem a telített hővezetési tényező is értelmezhetetlen, azonban a száraz érték gyakorlatilag maga a kiszárított minta hővezetési tényezője.

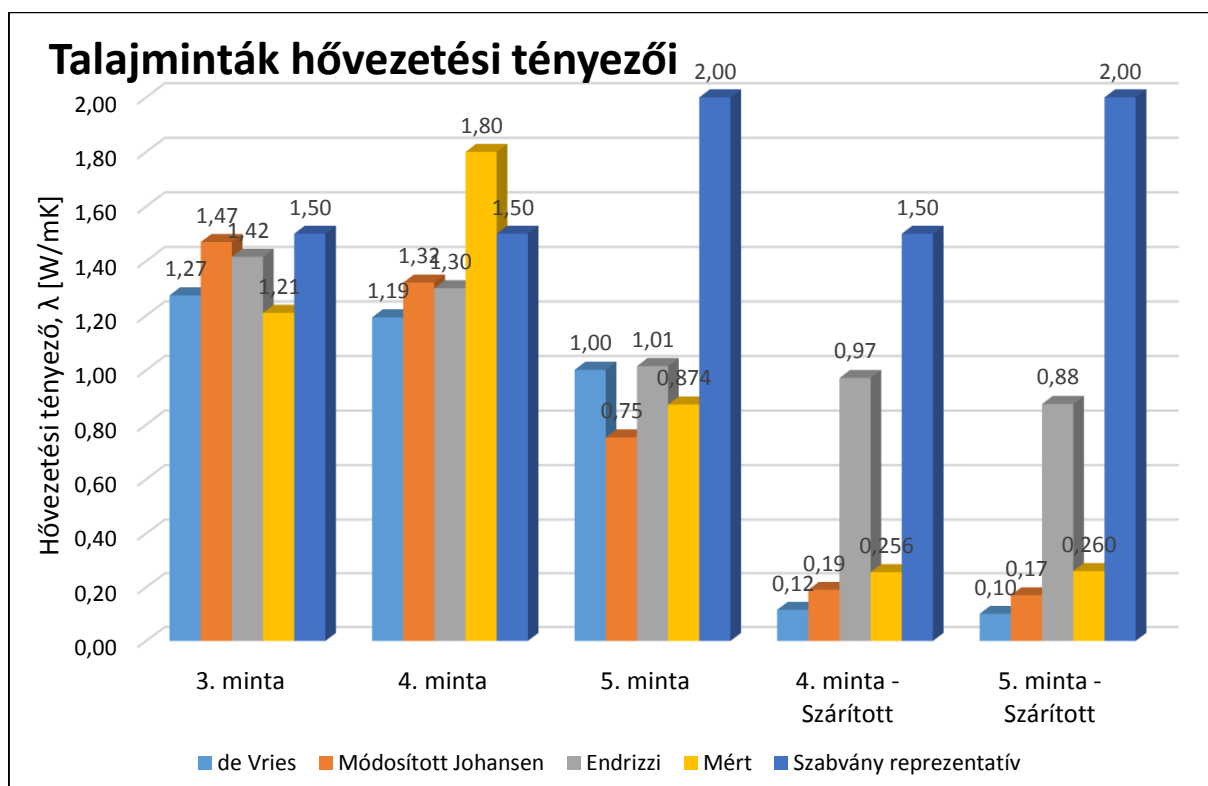
Minta	Számított			Mért	Szabvány reprezentatív
	de Vries	Módosított Johansen	Endrizzi		
	λ W/mK	λ W/mK	λ W/mK	λ W/mK	λ W/mK
3. minta	1,27	1,47	1,42	1,21	1,50
4. minta	1,19	1,32	1,30	1,80	1,50
5. minta	1,00	0,75	1,01	0,874	2,00
4. minta - Szárított	0,12	0,19	0,97	0,256	1,50
5. minta - Szárított	0,10	0,17	0,88	0,260	2,00

12. táblázat: Hővezetési tényezők összehasonlítása

A fenti táblázatban látható, hogy egyik számítási módszer sem volt képes visszaadni a mért hővezetési tényezőket, azonban a különböző módszerek az egyes talajminták esetében meg tudták közelíteni a talajminták λ -jait. A 3-as minta esetében, azaz a homokos agyagos iszap talajnál a de Vries módszer relatív hibája mindössze 4,95 %. Mind a Johansen, Endrizzi és a szabványban megadott érték is nagyobb a valóságostól. A szabvány reprezentatív értékét alkalmazva a hőtechnikai számítások során a 3-as talaj esetében a „biztonság javára” fogunk tévedni, azaz túlbecsülni a hőveszteségeket. Ennél nagyobb probléma, hogy a 4-es minta esetében mind a szabványban megadott érték, mind pedig a számítási módszerek lényegesen kevesebbnek határozzák meg a hővezetési tényezőt, mint azt a segédfűtőlapos berendezéssel mértük. A szabványos értéket alkalmazva az épület talaj irányába eláramló hőveszteségeit alul fogjuk becsülni a további számítások során.

Véleményem szerint a hiba oka az, hogy az egyes számítási módszerek nem vették figyelembe a száraz rész frakcióinak eltérő hőtechnikai tulajdonságait. A homok frakcióban ugyanis általában több kvarckristály található, mint az agyag vagy iszap frakcióban (lásd pl. a 2. táblázatot), a kvarc hővezetési tényezője pedig lényegesen magasabb, mint a többi ásványos alkotórészé. Ez pedig magyarázza a jelenséget, mivel a dolgozat 27-es és 28-as ábráján látható, hogy bár a 3-as és a 4-es talajminta is azonos elnevezést kapott, az előbbi homoktartalma körülbelül fele az utóbbinak. A két talajminta további vizsgálatára a következő pontban újabb számítási módszert közlök.

A táblázatot szemlélve megfigyelhető továbbá, hogy a szabvány reprezentatív értékei az 5-ös és a szárított 4-es és 5-ös mintánál durván túlbecsülték a mért értékeket, ez jól látható az alábbi diagramon is.



34. ábra: Talajminták hővezetési tényezői

A mért értékhez legközelebb e három talajmintánál a módosított Johansen módszer eredményei jártak. Az Endrizzi módszer alkalmazása a szárított mintáknál szintén jelentősen nagyobb hővezetési tényezőt adott meg a valóságosnál.

A vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy a talajok hővezetési tényezőjét általában a módosított Johansen módszer alkalmazásával közelíthetjük legjobban, de Vries módszere pedig a magas iszap és agyag tartalmú 3-as mintánál bizonyult a legjobbnak.

5.7. Homokos agyagos iszap minták hővezetési tényezőjének számítási lehetőségei

Az előzőekben tett 3-as és 4-es mintára vonatkozó állítást bizonyítandó vizsgáljuk a két eltérő iszap és homoktartalmú homokos agyagos iszap talajmintákat és számítsuk a hővezetési tényezőjüket a dolgozat 1. táblázatában szereplő talajtípusonkénti hővezetési tényezők (λ_{kavics} , λ_{homok} , λ_{iszap} és λ_{agyag}), és a talajminták frakciónkénti részarányaiból (K, H, I és A), feltételezve, hogy a szabványban szereplő hővezetési tényezők

tiszta frakciókra vonatkoznak. Mivel a szabvány megkülönböztet száraz és nedves homokot, a talajminták nedvességtartalma alapján mindkét esetben a nedves homoknak minősülhet a frakció, mert a talajminták nedvességtartalma 0,1923 kg/kg és 0,1818 kg/kg. A nedvességtartalom alapján pedig a táblázatban szereplő hővezetési tényezők közül az iszap és agyag esetében az alsó értéket, míg a homok esetében pedig a felső értéket fogom alkalmazni. Kavics frakció egyik mintában sem volt jelen. Ekkor az alábbi összefüggéseket és értékeket kapjuk:

$$\begin{aligned}\lambda_{3. \text{ minta}} &= K \cdot \lambda_{\text{kavics}} + H \cdot \lambda_{\text{homok}} + I \cdot \lambda_{\text{iszap}} + A \cdot \lambda_{\text{agyag}} \\ &= 0 \cdot 2,7 + 0,2329 \cdot 2,7 + 0,6289 \cdot 1,0 + 0,1382 \cdot 0,9 = 1,38 \frac{\text{W}}{\text{mK}}\end{aligned}\quad (65)$$

$$\begin{aligned}\lambda_{4. \text{ minta}} &= K \cdot \lambda_{\text{kavics}} + H \cdot \lambda_{\text{homok}} + I \cdot \lambda_{\text{iszap}} + A \cdot \lambda_{\text{agyag}} \\ &= 0 \cdot 2,7 + 0,4668 \cdot 2,7 + 0,3951 \cdot 1,0 + 0,1381 \cdot 0,9 = 1,78 \frac{\text{W}}{\text{mK}}\end{aligned}\quad (66)$$

Látható, hogy az így kapott hővezetési tényezők már követik a mérések tendenciáit, a 4-es minta esetében magasabb értéket kaptunk és szinte a segédfűtőlapos berendezéssel mért értékkel megegyezőt. A 3-as minta esetében a saját módszerrel számított érték nagyobbra adódott, mint a mért hővezetési tényező, ennek oka a minta alacsonyabb kvarctartalma lehet a szabványban megadott talajokhoz képest.

A továbbiakban az egyes frakciók esetében vegyük figyelembe azok (becsült) kvarctartalmát is, valamint a kavics és homok frakciót vonjuk össze illetve az iszap és agyag frakciót is. Erre azért van lehetőségünk, mert a szabvány alapján a kavics és homok frakciók azonos, míg az iszap és agyag frakciók közel azonos hővezetési tényezővel rendelkeznek. Az iszap és agyag összevont frakciójára alkalmazzunk 0,95 W/mK-es átlagos hővezetési tényezőt. Azonban a homok és kavics frakciók esetében nem a szabvány szerinti értéket, hanem Johansen 2,0 W/mK-es értékét használom, mivel figyelembe fogom venni a homok és kavics frakció kvarctartalmát is. A kvarc hővezetési tényezőjét 8,8 W/mK-nek veszem. Az iszap és agyag frakciónak várhatóan alacsony a kvarctartalma, de ezt sem hanyagolom el a számítás során, mivel vélhetően ezzel lehet majd „beállítani” a valós, mért hővezetési tényezőket megközelítő számított eredményeket. Az egyes frakciók és hővezetési tényezőik összegzésére az Endrizzi módszerhez hasonlóan kerül sor. A képlet a következő:

$$\lambda = \left(x_a \cdot \sqrt{\lambda_a} + x_v \cdot \sqrt{\lambda_v} + x_s \cdot (x_{K+H} \cdot \sqrt{q_{K+H} \cdot \lambda_{kvarc} + (1 - q_{K+H}) \cdot \lambda_{K+H}} + x_{I+A} \cdot \sqrt{q_{I+A} \cdot \lambda_{kvarc} + (1 - q_{I+A}) \cdot \lambda_{I+A}} \right)^2 \cdot \left[\frac{W}{mK} \right] \quad (67)$$

A módszert alkalmazva a 3-as és a 4-es talajmintára a következő táblázatokban láthatjuk a módszer eredményeit. A kavics + homok frakció kvarctartalmát a 2-es táblázat alapján 92 %-nak becsültem, míg az iszap + agyag frakció kvarctartalmát a 3. minta esetében 5 %-nak, a 4-es mintánál pedig 13 %-nak állítottam be. E két utólag becsült értékkel sikerült a mért hővezetési tényezőket közel azonosan reprodukálni.

Minta	Hővezetési tényező számítása 1.						
	kavics + homok	iszap + agyag	K + H kvarctartalma	I + A kvarctartalma	levegő rész	víz rész	szilárd rész
	x_{K+H} [-]	x_{I+A} [-]	q_{K+H} [-]	q_{I+A} [-]	x_a [-]	x_v [-]	x_s [-]
3. minta	0,23	0,77	0,92	0,05	0,16	0,29	0,55
4. minta	0,47	0,53	0,92	0,13	0,21	0,26	0,53

13. táblázat: Hővezetési tényező számítása saját módszerrel 1.

Minta	Hővezetési tényező számítása 2.					
	kvarc λ -ja	homok-kavics λ -ja	agyag-iszap λ -ja	levegő λ -ja	víz λ -ja	hővezetési tényező
	λ_{kvarc} W/mK	λ_{K+H} W/mK	λ_{I+A} W/mK	λ_a W/mK	λ_v W/mK	λ W/mK
3. minta	8,80	2,00	0,95	0,025	0,60	1,23
4. minta						1,80

14. táblázat: Hővezetési tényező számítása saját módszerrel 2.

A bemutatott számítási módszer értékeléséhez azonban további kutatások szükségesek és természetesen elengedhetetlen, hogy ismert kvarctartalmú és frakciónkénti hővezetési tényezőjű talajminták segítségével ellenőrizzük a becslés pontosságát. Kijelenthető azonban, hogy az előbb bemutatott két módszerrel a homokos agyagos iszap talajminták mért hővezetési tényezőjének egymáshoz való viszonyulása becsülhető volt.

5.8. Talajminták térfogati hőkapacitása

A térfogati hőkapacitásokat a dolgozat 4.4.2-es pontjában ismerttetett számítási módszerekkel⁹ mutatom be. A hővezetési tényezők vizsgálatához hasonlóan ezúttal is 5 mintát alkalmazok a számítások elvégzéséhez, melyek az előzőekkel megegyezők. Az egyes módszerekkel számított térfogati hőkapacitásokat valamint a számításokhoz szükséges segédmenyiségeket a különböző módszerenként külön, táblázatosan foglaltam össze.

Minta	de Vries módszer		
	víz rész	szilárd rész	térfogati hőkapacitás
	x_f [-]	x_s [-]	C_v MJ/m ³ K
3. minta	0,29	0,55	2,32
4. minta	0,26	0,53	2,15
5. minta	0,12	0,50	1,50
4. minta - Száritott	0,01	0,53	1,10
5. minta - Száritott	0,00	0,50	1,02

15. táblázat: Térfogati hőkapacitás számítása de Vries módszerrel

Minta	Farouki módszer						
	levegő rész	folyadék rész	szilárd rész	levegő C_v -je	Víz C_v -je	Szilárd Á. C_v -je	térfogati hőkapacitás
	x_a [-]	x_f [-]	x_s [-]	C_a MJ/m ³ K	C_w MJ/m ³ K	C_s MJ/m ³ K	C_v MJ/m ³ K
3. minta	0,16	0,29	0,55	0,0012	4,19	2,39	2,53
4. minta	0,21	0,26	0,53				2,36
5. minta	0,38	0,12	0,50				1,70
4. minta - Száritott	0,46	0,01	0,53				1,30
5. minta - Száritott	0,50	0,00	0,50				1,21

16. táblázat: Térfogati hőkapacitás számítása Farouki módszerrel

⁹ A számított térfogati hőkapacitások mérésel történő ellenőrzésére jelenleg a BME Magasépítési Tanszék Laboratóriumában nem volt lehetőség. Azonban megjegyzendő, hogy keverési kaloriméter beszerzésével vagy elektromos kalorimetriával lefolytatható lett volna a vizsgálat, és ilyen méréseket az MSc képzés minden hallgatója végzett Fizika MSc tantárgy gyakorlatain.

Minta	Farouki módszer nem fagyott talajokra				
	száraz térfogat- súlya	Nedvesség- tartalma	víz térfogat- súlya	Víz C_v -je	térfogati hőkapacitás
	γ_d kN/m ³	w [%]	γ_w kN/m ³	C_w MJ/m ³ K	$C_{v,U}$ MJ/m ³ K
3. minta	14,52	19,23	9,81	4,19	2,31
4. minta	13,89	18,58			2,17
5. minta	13,13	8,99			1,51
4. minta - Szárított	13,89	0,90			1,12
5. minta - Szárított	13,13	0,40			1,03

17. táblázat: Térfogati hőkapacitás számítása Farouki nem fagyott talajokra alkalmazható módszerével

Mivel a következő táblázatban bemutatott két számítási módszer a talaj illetve a víz fajhőjének konstans értékeiben tér csak el egymástól, ezeket egy táblázatban közlöm, bár az MSZ EN ISO 13370:2008 irodalomjegyzékében nem szerepel Sikora & Kossowski-ra utalás.

Minta	Sikora & Kossowski módszer					MSZ EN ISO 13370:2008 szerint		
	száraz térfogat- sűrűsége	Nedvesség- tartalma	szilárd talajok fajhője	Víz faj- hője	térfogati hőkapacitás	szilárd talajok fajhője	Víz faj- hője	térfogati hőkapacitás
	ρ_d kg/m ³	θ_w kg/kg	C_s J/kgK	C_w J/kgK	C_v MJ/m ³ K	C_s J/kgK	C_w J/kgK	C_v MJ/m ³ K
3. minta	1480,08	0,19	713	4190	2,25	1000	4180	2,67
4. minta	1415,93	0,19			2,11			2,52
5. minta	1338,09	0,09			1,46			1,84
4. minta - Szárított	1415,93	0,009			1,06			1,47
5. minta - Szárított	1338,09	0,004			0,98			1,36

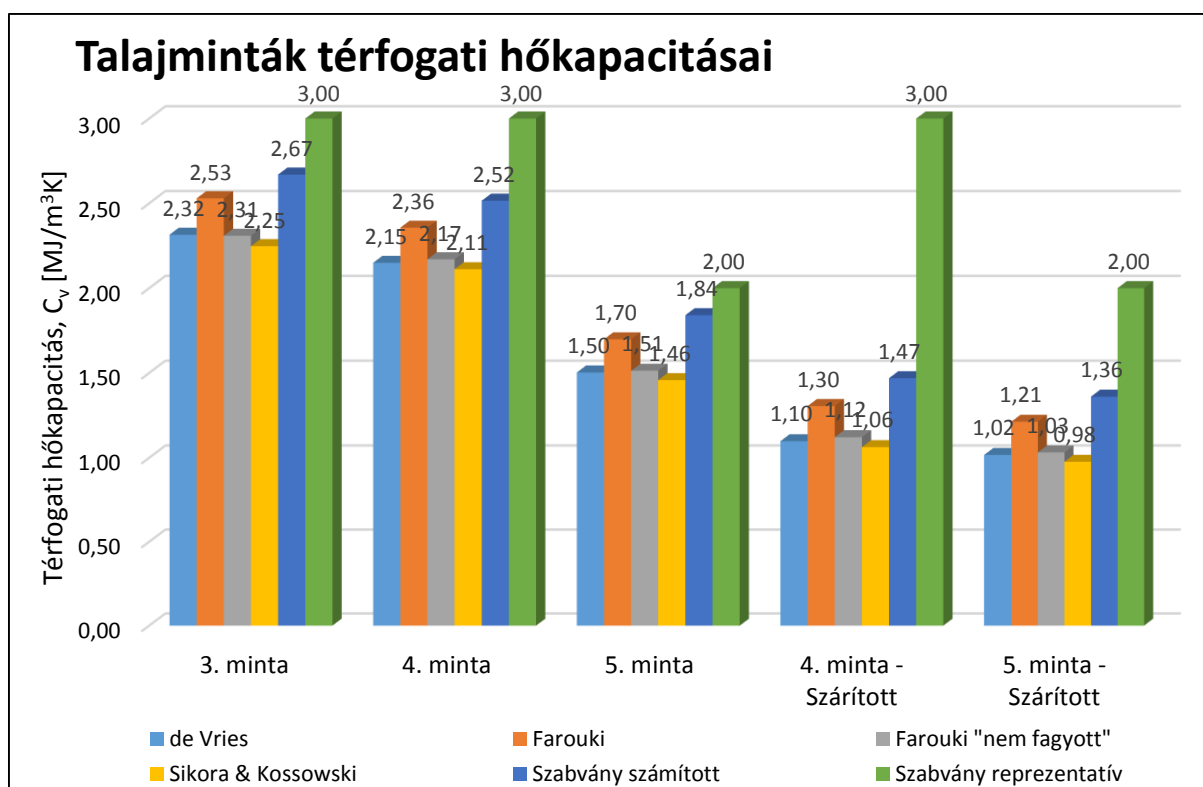
18. táblázat: Térfogati hőkapacitás számítása Sikora & Kossowski és az MSZ EN ISO 13370:2008 szerinti módszerrel

A számítások elvégzése után az egyes módszerek eredményeit a következő oldalon található 19-es táblázatban összegzem, melyben az MSZ EN ISO 13370:2008 szabványban megadott reprezentatív hővezetési tényezőket is feltüntettem.

Minta	de Vries C_v MJ/m ³ K	Farouki C_v MJ/m ³ K	Farouki "nem fagyott" $C_{v,U}$ MJ/m ³ K	Sikora & Kossowski C_v MJ/m ³ K	Szabvány számított C_v MJ/m ³ K	Szabvány reprezentatív C_v MJ/m ³ K
3. minta	2,32	2,53	2,31	2,25	2,67	3,00
4. minta	2,15	2,36	2,17	2,11	2,52	3,00
5. minta	1,50	1,70	1,51	1,46	1,84	2,00
4. minta - Szárított	1,10	1,30	1,12	1,06	1,47	3,00
5. minta - Szárított	1,02	1,21	1,03	0,98	1,36	2,00

19. táblázat: Térfogati hőkapacitások összehasonlítása

Az összehasonlító táblázatot szemlélve kijelenthetjük, hogy a szabvány reprezentatív térfogati hőkapacitásai a dolgozatban vizsgált talajminták esetén minden esetben túlbecsülték az egyéb módszerekkel számított értékeket, mely mértékéről az alábbi diagramon is meggyőződhetünk. A legjelentősebb eltérést a száraz homokos agyagos iszap esetén, azaz a 4-es szárított mintánál láthatjuk, a relatív hiba itt a szabvány számítási módszerével szemben 104 %-os, a legközelebb pedig a földnedves iszapos homok vizsgálatkor 8,7 %-os hibát tapasztalhatunk.



35. ábra: Talajminták térfogati hőkapacitásai

A de Vries módszer szinte megegyező eredményeket adott az egyes minták esetében, mint Farouki nem fagyott talajokra megadott összefüggése, holott a két képlet teljesen más talajfizikai paraméterekkel számol.

Sikora és Kossowski számítási eljárása alapján a térfogati hőkapacitások az összes többi vizsgált módszernél alacsonyabbra adódtak, ami magyarázható a módszerben a kutatók által megadott szilárd ásványokra vonatkozó, a többi eljárásban használnál alacsonyabb fajlagos hőkapacitás értékkel.

A szabvány reprezentatív értékei után a legnagyobb térfogati hőkapacitásokat a szabvány G mellékletében közölt számítási eljárást alkalmazva kaptam. Ezeket az értékeket Farouki általános egyenletét alkalmazva tudjuk megközelíteni a legjobban, az egyes mintákon tapasztalható relatív hiba 5,2 % és 11,2 % közötti.

A vizsgálatok alapján kijelenthető, hogy amennyiben a szabványos, MSZ EN ISO 13370:2008 szerinti számításhoz legközelebbi és emiatt legjobbnak mondható becslést a Farouki módszer használatával tehetjük meg. A reprezentatív értékek használatát lehetőleg kerüljük, ha van mód talajminta beszerzésére és vizsgálatára.

6. TALAJJAL ÉRINTKEZŐ SZERKEZETEK TRANZIENS NUMERIKUS HŐTECHNIKAI MODELLEZÉSE

6.1. *Tranziens hőtechnikai szimuláció bemutatása*

A dolgozat 4.3.1-es pontjában bemutatott véges differenciámódszeres numerikus számítási eljárást alkalmazó szoftverek¹⁰ közül a „HEAT3 5.0 special version”-t választottam. A továbbiakban ezzel a szoftverrel szemléltetve mutatom be a modellezési eljárást.

6.1.1. MODELLALKOTÁS

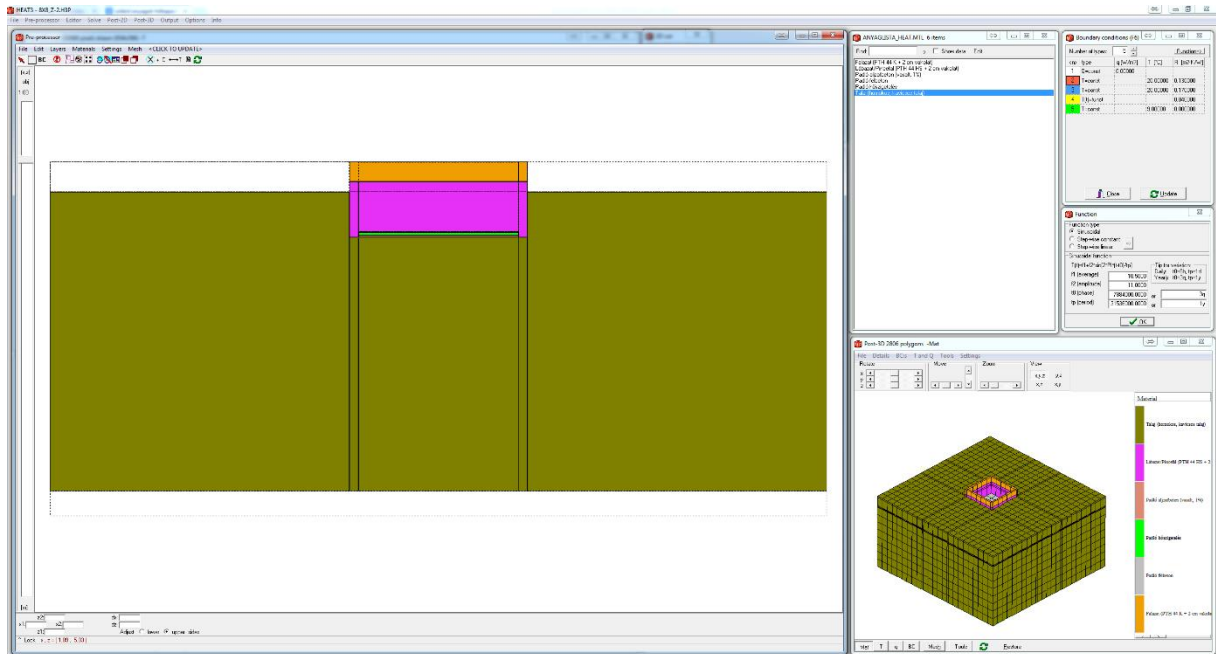
Az előttünk álló megoldandó hőtechnikai feladat, a valóság digitalizálása, a szerkezeti elemek olyan szintű leegyszerűsítése a cél, amely az eredmény szempontjából nem okoz hibákat, azonban megalkotása nem igényel túlzott erőforrásokat. A valóságot ezért stilizáljuk és modellt alkotunk. A hőtechnikai szimuláció első lépése, a modellalkotás a probléma felismerésével és tanulmányozásával kezdődik. Már a modell megalkotásakor tudnunk kell, hogy a későbbiekben milyen numerikus módszert és eljárást fogunk alkalmazni, milyen szoftverrel fogjuk a számításokat elvégeztetni.

A Heat3-ban csak a saját grafikus felületükön keresztül engedik megalkotni a modellt a felhasználó által szabadon megrajzolhatóan, az előredefiniált kitételeket betartva. A geometriai modell ugyanis csak téglatestekből állhat (ezáltal a ferde felületek lépcsőzetes megoldása vagy túlzottan időigényes, vagy kevésbé pontos eredményt nyújt). Az egyes szerkezeti elemeket külön testként kell megalkotnunk, a későbbiekben csak így tudunk hozzájuk különböző anyagi jellemzőket rendelni. A modellalkotás során továbbá minden esetben figyelniünk kell arra, hogy az egyes szerkezeti elemeket megtestesítő geometriai formák ne metsszék egymást, valamint folytonosan illeszkedjenek egymáshoz.

Amennyiben általános építőipari hőtechnikai szimulációt készítünk elő, célszerű csak a hőtechnikailag szerepet játszó rétegeket megrajzolnunk a modellünkben, ezáltal egyszerűsíthetünk és gyorsíthatunk a teljes hátralévő folyamaton. Elhanyagolhatóak

¹⁰ Többdimenziós hőtechnikai szimulációk elvégzésére alkalmas szoftverek listáját és használatuk bemutatását [Blomberg 1996] és [Nagy 2013a] tartalmazza. 3D-s tranziens VDM szimulációra ezek alapján a Heat3, PC3D és Voltra szoftverek alkalmasak.

például a vékony, nem hőszigetelő fóliák a rétegrendekből valamint a hővezetésen alapuló szimulációk esetében a nagy hővezetési tényezővel rendelkező vékony rétegek, fóliák vagy vékony lemezek is.



36. ábra: Modellalkotás Heat3-ban

A HEAT szoftverben a vizsgálatok során 1 cm-es pontosságot alkalmaztam a geometriai modell megalkotásakor és a főbb szerkezeti rétegeket modelleztem csak, e miatt a vízszigetelő rétegeket vagy egyéb technológiai rétegeket elhanyagoltam.

6.1.2. ANYAGJELLEMZŐK MEGADÁSA

A geometriai modell megalkotása közben az egyes elemekhez hozzá kell rendelnünk azon jellemző tulajdonságokat, melyek nélkülözhetetlenek az adott jelenséget leíró egyenletek megoldásához. Az állandósult állapotú hővezetés differenciálegyenletének megoldásához csak az elemek hővezetési tényezőjét kell definiálnunk, míg tranziens szimuláció esetén meg kell adnunk az anyagokra vonatkozó térfogati hőkapacitásokat is.

Az anyagtulajdonságok szilárd testek esetén anizotrópok is lehetnek, tehát a térbeli kiterjedésük mentén változhatnak. Erre a legjobb példa a fa anyagtulajdonságai, melyek rostirányra és arra merőlegesen eltérőek. A Heat3 szoftverben lehetőség van egy adott anyagnak két irányban eltérő hővezetési tényezőt beállítani. A szoftver

hátránya azonban, hogy a megadott anyagtulajdonságokat állandónak kezeli és minden berajzolt geometriai formát szilárd testként kezel.

A valóságban az anyagok hővezetési tényezője függ többek között a hőmérséklettől vagy a nedvességtartalomtól, azonban ezeket a változásokat azonban csak kevés szoftver képes kezelni jelenleg (pl. Ansys). A gázok és folyadékok anyagtulajdonságai szintén függnak a hőmérséklettől, de az áramlástan jelenségei illetve az általuk viselt nyomás, vagy akár a kiterjedésük is nagyban képes befolyásolni a viselkedési tulajdonságaikat. Fontos odafigyelnünk ezért a légrétegek tulajdonságainak helyes beállítására, ha lehetőségünk van, akkor a légréteggel vagy gáztöltéssel rendelkező szerkezeteket arra alkalmas szoftverekkel szimuláljuk (pl. Therm 7).

A szimulációk során az alábbi táblázatban összefoglalt anyagtulajdonságokat alkalmaztam.

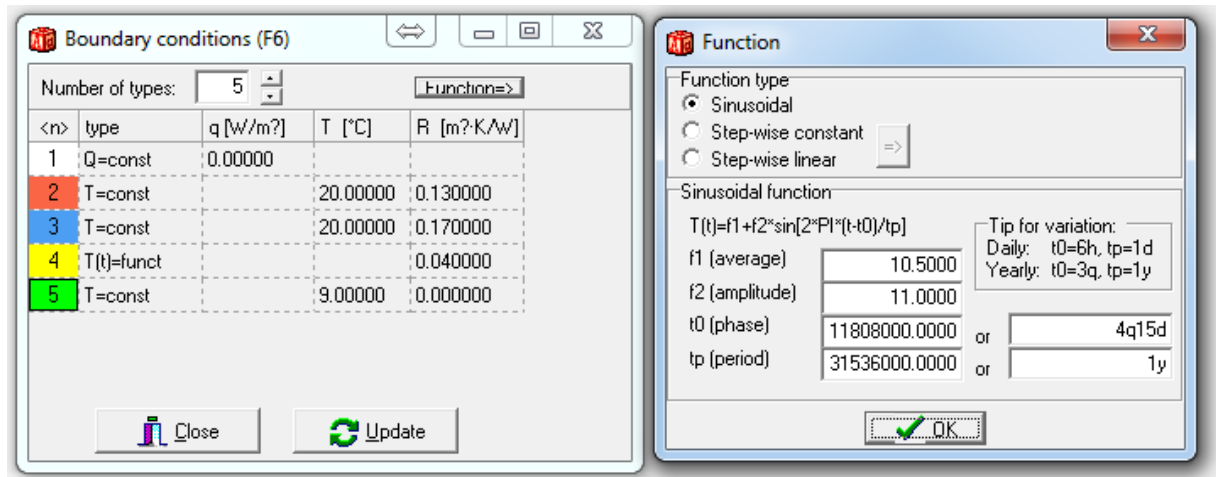
Anyag megnevezése	Jellemző vastagság [m]	Hővezetési tényező λ [W/mK]	Térfogati hőkapacitás C_v [MJ/m ³ K]
Padló felbeton - MSZ EN ISO 10456:2008	0,06	1,35	2,00
Padló hőszigetelés, EPS - MSZ EN ISO 10456:2008	0,14 (0,04)	0,04	0,03
Padló aljzatbeton (vasalt, 1%) - MSZ EN ISO 10456:2008	0,10	2,30	2,30
Talaj (Homokos, kavicsos talaj) - MSZ EN ISO 13370:2008	15	2,00	2,00
Talaj (Agyagos, iszapos talaj) - MSZ EN ISO 13370:2008	15	1,50	3,00
Falazat (PTH 44 K + 2 cm mészvakolat)	0,46	0,11	0,69
Lábazat/Pincefal (PTH 44 HS + 2 cm mészvakolat)	0,46	0,14	0,61
Falazat régi (PTH 38 N+F + 2 cm mészvakolat)	0,40	0,17	0,70
Lábazat/Pincefal régi (PTH 38 pincetégla + 2 cm vakolat)	0,40	0,26	0,71

20. táblázat: Alkalmazott anyagtulajdonságok

6.1.3. PEREMFELTÉTELEK DEFINIÁLÁSA

A peremfeltételek megadásával gyakorlatilag létrehozuk a megoldandó feladatot. Ekkor adjuk meg a szoftverekben, hogy a szerkezet mely részein milyen és mekkora mértékű terhelés jelentkezik, valamint leggyakrabban a peremfeltételek definiálása során határozzuk meg a teherrel érintkező felületek a terhelésre vonatkozó ellenállását is. Egyszerű hővezetési feladat esetében ez a felületi ellenállást jelenti, mely a szilárd testek felülete és a velük érintkező levegő között lép fel. Ez az ellenállás érték

az anyagok emissziós tulajdonságától, az érintkező levegő sebességétől, irányától valamint hőmérsékletétől függ. A vizsgált talajjal érintkező szerkezetek esetében alapvetően négyféle peremfeltételt kell megadnunk, melyek az alábbi 37. ábrán is láthatóak.



37. ábra: Peremfeltételek definiálása Heat3-ban

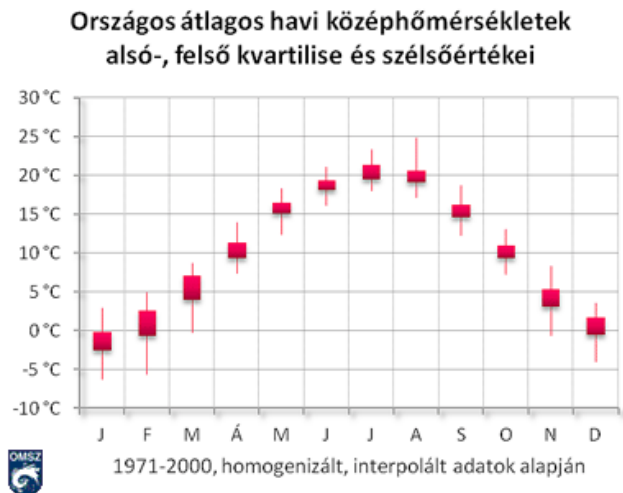
Az 1-es feltétel jelenti az adiabatikus állapotváltozást, amely során a peremfeltétel és az azzal érintkező rendszer között nem jön létre hőátadás. A 2-es feltétel a pincefal és a külső fal belső oldalára ható, állandó 20 °C hőmérsékletű levegő, melynek felületi (hőátadási) ellenállását az MSZ EN ISO 6946:2008 szabvány alapján egyszerűsített esetben 0,13 m²K/W-nak vehetjük fel. A padlóra ugyancsak 20 °C hőmérsékletű levegő hat (a belső levegő hőmérsékleti rétegződésétől eltekintünk), felületi ellenállása 0,17 m²K/W.

A Heat3 a tranziens jelenséget leíró peremfeltételeket szinuszos vagy ugrásfüggvény segítségével tudja leírni. A dolgozatban vizsgált szimulációk esetében szinuszos függvényt alkalmaztam, melynek átlaga 10,5 °C (illetve bizonyos vizsgálatoknál 9,5 °C) volt. A függvény a 37. ábra jobb oldali ablakában látható.

A függvény amplitúdója hazánkban átlagosan 11 °C-ra vehető fel. A függvény fázisául 4 hónap és 15 nap időtartamot választottam, periodusnak pedig egy évet. Ez alapján a 10,5 °C-os éves átlagos középhőmérséklet április 15 és október 15.-én fog jelentkezni, mely megfelel a hazánkban tapasztalható átlagos áprilisi és októberi havi középhőmérséklet értéknek, mely látható a 38-as ábrán.

A külső oldalon azonban tranziens esetben is csak konstans felületi ellenállást lehet beállítani a Heat 3 szoftverben, melynek $0,4 \text{ m}^2\text{K/W}$ -os értékét a hővezetési ellenállásokról szóló harmonizált Európai Uniósi hőtechnikai szabványból vettem.

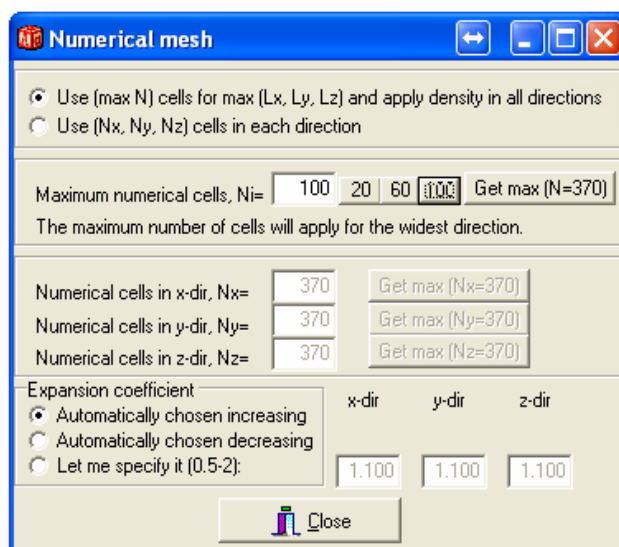
A szimuláció során a talajt 15 méteres mélységig adtam meg, ahol a magyarországi átlagos állandósult hőmérsékleti állapot található, melynek értéke 9°C -os a 13. ábra alapján (felületi ellenállás nincs). Ennél mélyebben a talaj hőmérséklete, a geotermikus gradiens alapján, hazánkban általában 20 méterenként 1°C -al nő.



38. ábra: Országos átlagos havi középhőmérsékletek alsó-, felsőkvartilise és szélsőértékei [www.met.hu]

6.1.4. HÁLÓGENERÁLÁS

A megfelelő felbontású háló beállítása az eredmények pontosságának szempontjából igen kritikus. Azonban a túlzott finomságú háló (és az ezzel együtt járó cellaszám növekedés) a számítási időt drasztikusan képes megnövelni, így a létrehozott geometriai modell felbontását optimalizálni kell.



39. ábra: Numerikus felbontás beállítása Heat3-ban

A Heat3 a globális tengelyekre merőleges hálót alkalmaz, mivel a globális tengelyekre nem merőleges elemek transzformálása nagyon bonyolulttá és memóriaigényessé illetve lassúvá tenné a feladat megoldását. A Heat3 szoftverben kétféle felbontási mód közül választhatunk, egyik esetben a beállított maximális cellaszámot a modell legnagyobb térbeli összhosszúságánál al-

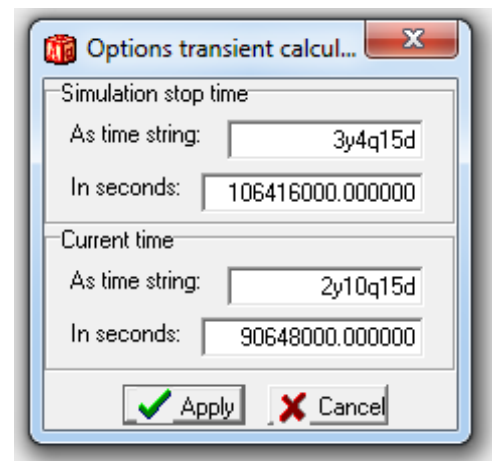
kalmazza, a további oldalaknál pedig ezen sűrűséggel osztja fel cellákra a teret. A másik esetben minden oldal irányában azonos, maximális cellaszámot alkalmaz a szoftver. Ez utóbbi akkor alkalmazható megbízhatóan, ha a geometriai modell térbeli kiterjedése közel azonos minden irányban, és így a cellák torzulásmentesek lehetnek.

A feladat megoldása során az egyes modelleknél 500 és 384.500 közötti cellaszámot alkalmaztam az egyes modellek bonyolultságától és geometriájától függően. Utóbbi cellaszám alkalmazásakor a tranziens szimuláció közel egy teljes napon át futott a 2 GHz-es Intel Core2 CPU-t és 4 Gb RAM-ot tartalmazó Épületfizikai Laboratórium számítógépén.

6.1.5. SZÁMÍTÁS ÉS EREDMÉNYEK

Tranziens szimuláció futtatása esetén legelőször be kell állítani a szimuláció jelenlegi időállapotát illetve a megállásának idejét. A kezdeti időpont alapértelmezetten 0 s. Talajjal érintkező szerkezetek esetében legalább 1,5 – 2 év szükséges a teljes geometriai tér anyagainak hőmérsékleti kondicionálásához. Az eredményeket ezért a szimuláció kezdő időpontjától számított 2 év 10 hónap és 15 nappal kezdtem rögzíteni a Heat3 beépített eredményrögzítőjével. E rögzítő képes arra, hogy a megadott időpontban a beállított, peremfeltételekkel érintkező anyagok felületén jelentkező hőmennyiségeket rögzítse. A dolgozatban a rögzítést napi időközökkel végeztem és az említett kezdeti rögzítési pillanattól számítva még 183 napot vettem. Ez a 183 nap a 7/2006. TNM Rendelet standard fűtési idényének felel meg.

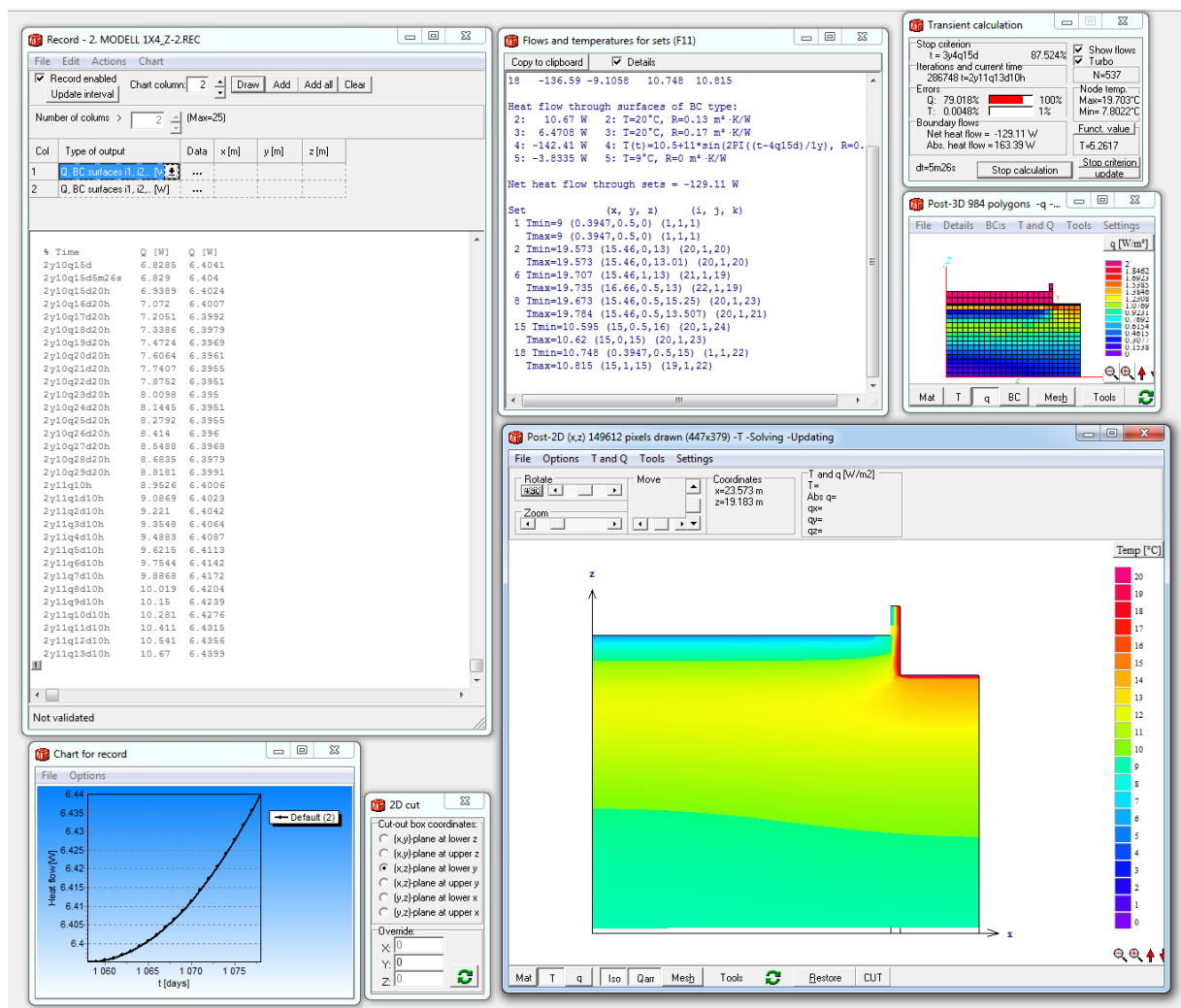
Az eredmények rögzítése során 183 db hőveszteség értéket kaptam mind a padlószerkezet mind pedig a falszerkezetek esetén, melyeket átlagolva és összeadva kaptam meg az adott modell esetében a fűtési idényben eláramló hőmennyiségeket. Ezen értékeket azonban a belső hőmérséklet és az átlagos külső hőmérséklet különbségével (a 7/2006. TNM rendelet alapján 16 K-el) le kell osztani. A hőveszteségek így az egy méteres padlóélel szimulált modellek esetében a vonalmenti hőátbocsátási tényezőt fogják megadni, míg a teljes padlót vagy pincét szimuláló modellek esetében a talajjal



40. ábra: Szimulációs idő beállítása Heat3-ban

érintkező szerkezetek hőveszteség-tényezőjét kapjuk. Ez utóbbi leosztva a padló kerületével szintén előállíthatjuk a vonalmenti hőátbocsátási tényezőök átlagos értékét.

A Heat3 szoftver nemcsak numerikus eredményeket szolgáltat, de a tranziens számítások során minden időlépésnél képes az adott tér hőmérséklet vagy hőáramsűrűség eloszlását felrajzolni.



41. ábra: Tranziens szimuláció futtatása Heat3-ban

6.2. Vizsgált modellek és paramétereik

Az előbbieken bemutatott tranziens hőtechnikai szimulációkat a 21. táblázatban összefoglalt modellekkel végeztem el.

Az 1-7. modell esetében az épület padlóéle mentén egy méteres belső hosszt vettem fel, így ezekből a modellekből az egységnyi padlóélhosszra vonatkozó

hővesztéseket kaphatjuk meg. Az 1. modell talajon fekvő padló, a 2. modell -2 méteres padlószinttel és fűtött pincével rendelkező modell, melyek esetében a határoló szerkezetek szerkezeti hőátbocsátási tényező a 1246/2013 Korm. rendelet „kölségoptimalizált” követelményszintjeit éppen teljesítik.

A 3. esetben már nem a 1246/2013 Korm. határozatnak megfelelőek a határoló szerkezetek hőátbocsátási tényezői, hanem a pincefal régebbi 38-as Porotherm pince-téglából készült, a padló pedig csupán 4 cm hőszigetelést tartalmaz. A 4-5-ös modell az 1-2-essel szerkezetileg megegyező, azonban a külső hőmérséklet átlagos értékét ez esetben 10,5 °C helyett 9,5 °C -nak vettem fel, ahogyan az a 4.12.1-es pontban bemutatott hazai éghajlati zónák esetében a második nagy zónát jelenti.

Modell	Éves átlagos hőmérséklet T_{avg} °C	Belső hossz x m	Belső szélesség y m	Mélység padló felső sík- jái z m	Hőátbocsátási tényezők			Talaj hőve- zetési ténye- zője λ_{talaj} W/mK	Talaj térfigati hőkapacitása $C_{v,talaj}$ MJ/m ³ K
					Külső fal U_{fal} W/m ² K	Lábazat / Pincefal $U_{labazat}$ W/m ² K	Padló $U_{padló}$ W/m ² K		
1	10,5	1,00	4,00	0,00	0,24	0,30	0,30	2,00	2,00
2	10,5	1,00	4,00	-2,00	0,24	0,30	0,30	2,00	2,00
3	10,5	1,00	4,00	-2,00	0,40	0,60	0,80	2,00	2,00
4	9,5	1,00	4,00	0,00	0,24	0,30	0,30	2,00	2,00
5	9,5	1,00	4,00	-2,00	0,24	0,30	0,30	2,00	2,00
6	10,5	8,00	8,00	0,00	0,24	0,30	0,30	2,00	2,00
7	10,5	8,00	8,00	-2,00	0,24	0,30	0,30	2,00	2,00
8	10,5	8,00	8,00	-2,00	0,40	0,60	0,80	2,00	2,00
9	10,5	8,00	16,00	0,00	0,24	0,30	0,30	2,00	2,00
10	10,5	8,00	16,00	-2,00	0,24	0,30	0,30	2,00	2,00

21. táblázat: Tranziens szimulációhoz használt modellek paraméterei

Az épület geometriai kialakításának hővesztésekre gyakorolt hatásait a 6-10 modelleken keresztül vizsgáltam. A 6-8 modellek az 1-3 modellek szerkezeti jellemzőivel készültek, az épület formája négyzet alapú és a padlóélek belső hossza és szélessége 8 m x 8 m-es, azaz az épület belső kerülete 32 m és a padló területe 64 m². A 9-es és 10-es modellek esetében az épület formája téglalap alakú, két oldalhossza duplája a másik két oldalhossznak, így 8 m x 16 m-es belső kerületű, 48 m kerületű és 128 m² alapterületű padlószervezettel rendelkezik.

Minden modell esetén nem csupán a közvetlenül talajjal érintkező határoló szerkezetek kerültek modellezésre. A modellek a talajszint felett 0,5 m lábazati falat és 1,0 m külső falat is tartalmaztak. A lábazati fal és a talajjal érintkező padlónál kialakuló hőhíd többlethőveszteségeit az eredmények tartalmazni fogják, azonban a felületi veszteségeket le kell vonni az eredményekből.

Az egyes szimulációkat ugyanazon geometriai modell és anyagjellemzők alkalmazásával stacioner állapotban is elvégeztem (ekkor a külső hőmérsékletet konstans 4 °C-nak feltételeztem), az eredmények összehasonlítása végett.

6.3. Vizsgálatok eredményei

A Heat3 program eredményrögzítőjéből leolvashatóak az egyes napokhoz tartozó „ Q_f ” padló hőveszteség és „ Q_w ” falak hőveszteség értékek, melyeket a 183 napos vizsgálati időtartamon átlagolva kapjuk „ $Q_{f, \text{átlag}}$ ” és „ $Q_{w, \text{átlag}}$ ”-ot. A talajjal érintkező szerkezetek 1 K egyensúlyi hőmérséklet különbség hatására kialakuló hőveszteségeit ennek ismeretében a következő egyenlettel számíthatjuk:

$$H_g = \frac{Q_f + Q_w - Q_{\text{levonás}}}{16 \text{ K}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{K}} \right] \quad (68)$$

amely képletben „ $Q_{\text{levonás}}$ ” a következő (69)-es összefüggésből adódik, és a nem közvetlenül talajjal érintkező, de a szimulációkban szereplő hőveszteségeket jelenti. Ezt a hőmennyiséget le kell vonni, mivel a nem talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségeit a hőveszteségtényező számításánál a $\Sigma A \cdot U_R$ tagban vesszük figyelembe.

$$Q_{\text{levonás}} = l_{\text{padló}} \cdot 16 \text{ K} \cdot (0,5 \text{ m} \cdot U_{\text{lábazat}} + 1,0 \text{ m} \cdot U_{\text{fal}}) \quad [\text{W}] \quad (69)$$

A vonalmenti hőátbocsátási tényezőt ezután a hőveszteségek „ $l_{\text{padló}}$ ” padlóél hosszal történő leosztásával kapjuk.

$$\psi_g = \frac{H_g}{l_{\text{padló}}} \quad \left[\frac{\text{W}}{\text{mK}} \right] \quad (70)$$

A tranziens VDM szimulációk eredményeit a következő táblázat tartalmazza.

Modell	Padló kerülete	Mélység padló felső síkjáig	Padló hőveszteségeinek átlaga	Falak hőveszteségeinek átlaga	Talajjal nem érintkező szerkezetek hőveszteségének levonása	Talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségei	Talajjal érintkező szerkezetek vonalmenti hőátbocsátási tényezője
	$l_{\text{padló}}$ m	z m	$Q_{f,\text{átlag}}$ W	$Q_{w,\text{átlag}}$ W	$Q_{\text{levonás}}$ W	H_g W/K	ψ_g W/mK
1	1	0,00	7,9571	6,3134	6,24	0,501904	0,5019
2	1	-2,00	7,0511	13,2308	6,24	0,877622	0,8776
3	1	-2,00	12,0132	24,2020	11,2	1,56345	1,5635
4	1	0,00	8,4650	6,6980	6,24	0,557683	0,5577
5	1	-2,00	7,4191	14,2361	6,24	0,963449	0,9634
6	32	0,00	156,7863	203,4823	199,68	10,03679	0,3136
7	32	-2,00	133,3283	437,3339	199,68	23,18638	0,7246
8	32	-2,00	263,6151	805,3556	358,4	44,41067	1,3878
9	48	0,00	287,1616	303,5969	299,52	18,2024	0,3792
10	48	2,00	249,0318	650,7382	299,52	37,51563	0,7816

22. táblázat: Tranziens VDM szimulációk eredményei

A modellek stacioner állapotbeli szimulációinak eredményeit az alábbi táblázat tartalmazza, amelynél megfigyelhető, hogy a falak hőveszteségei stacioner és tranziens állapotban 5%-on belüli egyezést mutatnak, míg a padló esetében az eltérések már számottevőek, akár több mint 35%-osak.

Modell	Padló kerülete	Mélység padló felső síkjáig	Padló hőveszteségei stacioner állapotban	Falak hőveszteségei stacioner állapotban	Talajjal nem érintkező szerkezetek hőveszteségének levonása	Talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségei	Talajjal érintkező szerkezetek vonalmenti hőátbocsátási tényezője
	$l_{\text{padló}}$ m	z m	$Q_{f,\text{stac}}$ W	$Q_{w,\text{stac}}$ W	$Q_{\text{levonás}}$ W	H_g W/K	ψ_g W/mK
1	1	0,00	10,83	6,27	6,24	0,678838	0,6788
2	1	-2,00	9,33	13,87	6,24	1,059969	1,0600
3	1	-2,00	15,79	24,79	11,2	1,836	1,8360
4	1	0,00	11,37	6,66	6,24	0,736713	0,7367
5	1	-2,00	9,70	14,70	6,24	1,134831	1,1348
6	32	0,00	208,17	200,88	199,68	13,08563	0,4089
7	32	-2,00	184,38	457,72	199,68	27,65125	0,8641
8	32	-2,00	359,98	835,93	358,4	52,34438	1,6358
9	48	0,00	381,11	299,19	299,52	23,79875	0,4958
10	48	-2,00	335,83	676,04	299,52	44,52188	0,9275

23. táblázat: Stacioner VDM szimulációk eredményei

Az eredmények összehasonlítását a 9. fejezetben részletesen folytatom.

7. ÚJ SZÁMÍTÁSI LEHETŐSÉG TALAJJAL ÉRINTKEZŐ SZERKEZETEK MODELLEZÉSÉRE

A következő 7-es és 8-as fejezetekben a 2013. novemberi Tudományos Diákköri Konferencián bemutatott saját, tranziens VEM szimuláción alapuló numerikus közelítő módszer ismertetése történik. A módszer a TDK dolgozathoz képest tovább bővült, a 8-as fejezetben bemutatásra kerülő szoftver immáron figyelembe veszi a padló kerülete mentén elhelyezett hőszigetelő sáv hatásait is az MSZ EN ISO 13370:2008 szabvány számítási eljárása szerint és számol a pincefal hőveszteségeivel is.

7.1. A számítási eljárás módszertana

Az eddigiekben leírtak alapján is egyértelmű, hogy csak tranziens, azaz időben változó numerikus szimuláció jöhet szóba a talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségeinek leírására, ahol a vizsgált időtartam a hazai standard fűtési idény lehet (ezt a megállapítást az eredményeket összehasonlító 9. fejezetben tovább erősítem). A tranziens számítás időlépése ennél a módszernél is egy nap, így a fűtési idényben 183 nap napi átlagos hőveszteségei alapján határozhatjuk meg a talajjal érintkező szerkezetek átlagos, fűtési idényre vonatkozó vonalmenti hőátbocsátási tényezőit.

Ez utóbbi, a vonalmenti hőátbocsátási tényező a jelenlegi 7/2006. TNM Rendelet számítási eljárásába történő implementálhatóságot hivatott biztosítani, és ezt elősegítendő a számítási eljárás ahol lehet, hasonlóan került kialakításra, mint az immáron 30 éves, jelenleg leggyakrabban alkalmazott táblázatos módszer. Azonban figyelemmel kell lennünk arra is, hogy az elmúlt három évtizedben változtak az épületfizikai követelmények, és azok megadási módja is, szemléletesebb lehet a táblázatokban is hőátbocsátási tényezők alapján keresni a megfelelő értéket, mint hővezetési ellenállások alapján, valamint a táblázat értékei a manapság alacsony energiaigényű épületek esetében előforduló, akár 40 cm vastag hőszigeteléssel készülő padlószervezetek esetében is meg kell adniuk a vonalmenti hőátbocsátási tényezőket. Nem utolsó sorban pedig a táblázatos értékeknek tartalmazniuk kell a padló és (pince)fal csatlakozásnál kialakuló hőhíd miatti többlethőveszteségeket is.

A jelenlegi két táblázat helyett (melynek egyike a padló, a másik pedig a talajjal érintkező fal hőveszteségeit adja meg) egy összesített táblázat létrehozása jelentené a legjobb megoldást, természetesen a jelenlegi számítási környezetbe való integrálhatóság megtartása mellett. A módszer jelenlegi változatában a táblázatos értékek azonban

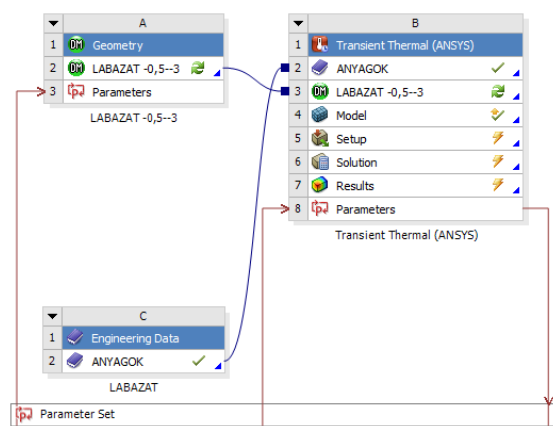
nem tartalmazzák a pincefal hőveszteségeit (utólag lettek kivonva), azok figyelembevétele a szerkezetre jellemző hőátbocsátási tényezőkkel történhet¹¹.

Elkerülhetetlen azonban a változás, mivel országunk klimatikus és helyi talajviszonyai nem állandóak, ezáltal a meghatározott táblázathoz képest korrekciós tényezők alkalmazása lesz szükséges az ország egyes pontjain, melyek segítségével pontosabbá válhat a számítás. Az eddigi módszerek továbbá nem foglalkoztak a háromdimenziós hőhidak hatásaival sem, azaz a vonalmenti hőátbocsátási tényező értékeit csupán egy kerületi hosszal szorozva kaphattuk meg a talajjal érintkező szerkezet hőveszteség-tényezőjét, azonban belátható, hogy azonos kerületi hosszhoz többféle geometria társulhat, és már a legalapvetőbb épületgeometriák esetén is eltérések jelentkezhetnek a hőveszteségek mennyiségében. Emiatt vizsgálnunk kell az épületsarok hőveszteségnövelő vagy –csökkentő hatásait is, melyet a kerületi hossz korrekciós tényezőjével veszünk majd figyelembe.

7.1.1. TRANZIENS VÉGESELEMMÓDSZER ALKALMAZÁSA

Az időben változó hőtechnikai jelenségek modellezésére tranziens szimulációt kell végeznünk. Ez a tény azonban még nem dönti el, hogy a szimuláció végeselemmódszer vagy véges differenciámódszer alkalmazásával történjen. A döntést a módszereket alkalmazó szoftverek tanulmányozásával hozhatjuk meg, lévén nincs jelenleg olyan véges differenciámódszert alkalmazó szoftver a piacon (az előzőekben bemutatott Heat3 sem), mely

képes lenne kezelni több száz vagy akár több ezer szimuláció lefuttatását, mindezt pedig úgy, hogy a geometriai modellt és a peremfeltételeket képes legyen függvény alapján vagy paraméteresen változtatni a tranziens szimuláció időtartama alatt. Végeselemmódszert alkalmazó szoftverekből azonban a nem kifejezetten épületek és



42. ábra: Tranziens szimuláció összeállítása ANSYS végeselemes szoftverben

¹¹ Erre a lépésre azért volt szükség, mert minden padlószerkezet és padló mélység esetén szimulálni a hozzá tartozó legalább 10-15 különböző pincefalat további több százezer szimulációt és legalább egy évet venne igénybe. A jellemző U'_{pincefal} számítását lásd a 7.1.2-es pontban.

épületenergetikai felhasználásra készített programokban megtalálhatóak ezek a funkciók, melyek segítségével a táblázatos értékek előállításához szükséges szimulációkat le tudjuk futtatni. A szimulációk lefuttatására az ANSYS nevű szoftvert választottam, melyben a teljes folyamatot el lehet végezni a modell megalkotásától és paraméterezésétől kezdve a peremfeltételek függvény- vagy adott időpillanatokra vonatkozó táblázatos értékein át a modellt felépítő anyagok definiálásával, az automatizált futtatásig és a tetszőleges időpillanatok közötti és tetszőleges helyen lekérdezett, időintegrált eredményekig.

A tranziens szimuláció összeállítását a 42. ábrán láthatjuk, mely képen látható a geometriai modell és az eredmények lekérdezésének paraméterezettsége is.

7.1.2. GEOMETRIAI MODELL LÉTREHOZÁSA

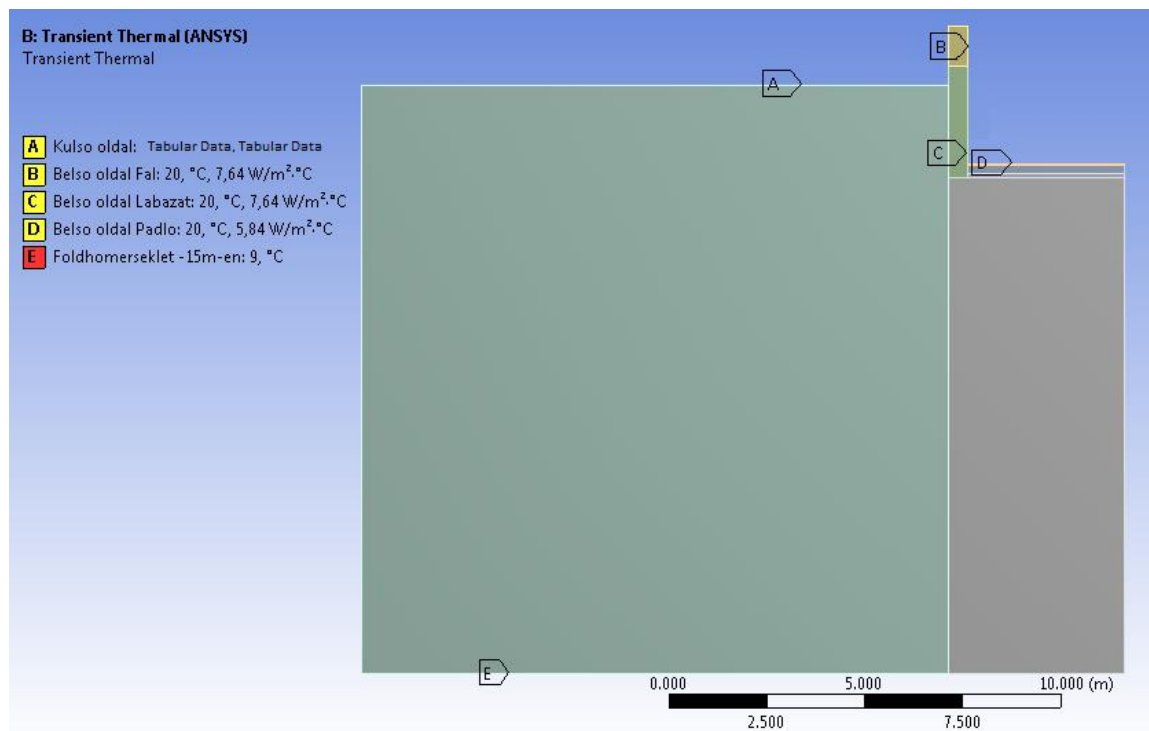
A modell létrehozásánál a 1246/2013. Korm. határozat szerinti módosított épület-határoló szerkezetekre való követelmények figyelembevétele és értelmezése szerint jártam el. E szerint a lábazati falra is létezni fog követelményérték, nem csupán a talajjal érintkező falszerkezetekre. E változás miatt tehát a külső fal és a talajjal érintkező fal mellett a lábazati fal kialakítását is meg kellett határoznom.

A modell felépítés szempontjából a valóságos, építésben előforduló tényezőket is figyelembe vettem. A lábazatot a talaj szintjétől minden esetben fél méteres magasságig modelleztem, a fölötte pedig külső falat építettem. A talajjal érintkező falat nem csupán a követelmények között említett talajszinttől egy méteres mélységig készítettem el, hanem adott esetben a pincepadló szintjéig.

Az alaptesteket azonban minden esetben elhanyagoltam a hőtechnikai szimuláció során, mivel geometriai értelemben azok kialakítása a lokális jellemzőktől, például a talaj teherbírásától is függ, a táblázatot pedig nem csupán sávalappal rendelkező épületek esetén alkalmazzák majd az épületenergetikusok (mint ahogy a jelenlegi Rendeletben szereplő táblázatot is minden épület és alapozási típus esetén alkalmazzák), hanem pontalap, lemezalap vagy akár cölöpalap megléte esetén is. Figyelembe vehetjük továbbá az MSZ EN ISO 13370 vonatkozó számítási modelljeit, ahol az alaptest és a padlószerkezet alatti fal szintén elhanyagolásra került. További indok az alaptest elhanyagolására, hogy ahogy azt majd a 17. ábrán is láthatjuk, az egyszázalékosan vasalt beton hővezetési tényezője minden esetben közel azonos, vagy nagyobb, mint a hazánkban előforduló talajoké, így gyakorlatilag ennek elhanyagolásával a „biztonság

javára” téved a modell. Amennyiben azonban az alaptest szigetelten kerül a valóságban kialakításra, lehetőség van az MSZ EN ISO 13370:2008 melléklete szerinti, a dolgozat 4.6.4.3-as pontjában is bemutatott függőlegesen elhelyezett hőszigetelés vonalmenti hőátbocsátási tényezőös korrekcióját figyelembe venni a hőveszteség-tényező számításakor.

A geometriai modell újdonsága a modell paraméterezésében és a padlószerkezet kezelésében rejlik. A padlószerkezet hővezetési ellenállásának növeléséhez növelnünk kell a padlószerkezetbe beépítésre kerülő hőszigetelő réteg vastagságát is (mivel annak hővezetési ellenállása csak egy bizonyos végletig növelhető). Ez azt jelenti, hogy az egyes padlószerkezetek különböző hőátbocsátási tényezőihez természetesen különböző vastagságú padlószerkezet rendelhető hozzá, mely kihatással lesz a szimuláció



43. ábra: Az egyik geometriai modell, a peremfeltételek jelölésével

eredményeire is. Egy geometriai modellt a fenti, 43. ábrán láthatunk, mely $z = -2$ m-ben került felvételre, a hőszigetelő réteg vastagsága pedig közel 20 cm-es.

A hőszigetelő rétegek „h” vastagságát a padlólemez rétegtervi hőátbocsátási tényezőjéből számíthatjuk vissza a következő egyenlettel:

$$h = \lambda_{h\acute{o}szi\acute{g}} \cdot \left(\frac{1}{U} - R_{si} - \frac{d_{felbeton}}{\lambda_{felbeton}} - \frac{d_{alaplemez}}{\lambda_{alaplemez}} \right) \quad (71)$$

ahol a kutatás során „h” vastagság és „U” hőátbocsátási tényezőkön kívül, melyeket a 24. táblázatban láthatunk, a többi tag konstans értékkel került meghatározásra, amelyek láthatóak a 18. ábrán.

A hőszigetelő réteg vastagságának változtatása nem csupán a padlószerkezet vastagságának változását befolyásolja, hanem közvetetten a tranziens szimuláció során a talajba jutó hőmennyiséget is, melyet a talaj adott esetben tárolni tudna, illetve a hőszigetelő réteg vastagsága döntően befolyásolja a hőáramok irányát is a padlószerkezettel és a hozzá csatlakozó falszerkezettel érintkező földben is.

A jobb oldalon található táblázatból látható, hogy a modellek padlószerkezete 0,1 W/m²K-ig került meghatározásra, ez közel 40 cm-es hőszigetelő réteg vastagsággal érhető el, ha a hőszigetelő anyag hővezetési tényezője 0,04 W/mK.

A falszerkezetek geometriai méretei a 1246/2013. Korm. határozatban foglalt követelményértékek miatt 46 cm-es szélességben kerültek modellezésre, mivel ilyen vastagságú, hazai piacon kapható kvázi homogén falazatból lehet teljesíteni a határozatban foglalt követelményeket. A falazatok magassága szintén paraméterezett, azonban minden esetben vagy a külső talajszinthez képest 1,5 m-el magasabban végződik, vagy a belső padlószinthez képest magasabb 1,5 m-el. A 43. ábrán az előbbi helyzet adódott.

A talaj a 0 szinttől -15 méteres mélységig és a falazat külső síkjától szintén 15 méter hosszon került modellezésre.

U [W/m ² K]	h [cm]
nincs	-
2	1,25
1	3,25
0,75	4,58
0,5	7,25
0,4	9,25
0,3	12,58
0,25	15,25
0,2	19,25
0,15	25,91
0,1	39,25

24. táblázat: A padló U értékei és a hozzá tartozó hőszigetelő réteg vastagságok

7.1.3. ANYAGTULAJDONSÁGOK KIVÁLASZTÁSA

A modellgeometria megalkotása után az egyes szilárd testekhez anyagtulajdonságokat kell rendelnünk. Míg a stacioner hővezetési feladat megoldásához elegendő egy anyag geometriai formájának és hővezetési tényezőjének ismerete, addig a tranziens vizsgálatokhoz az egyes anyagok sűrűsége és fajhője (mely jelen vizsgálaton állandó nyomáson értelmezett) is szükséges. Az anyagtulajdonságokat az MSZ EN ISO 13370:2008 valamint az MSZ EN ISO 10456:2008 szabványok alapján határoztam meg, melyek minden esetben általános felhasználású tervezési értékek. Abban az esetben,

ha egy anyagnak a szabványokban csak a térfogatra vonatkoztatott hőkapacitása (térfogati hőkapacitása) volt megadott, úgy ebből az értékből 1000 J/kgK-es fajhő feltételezése mellett határoztam meg a sűrűségét. Az egyszerűsítés azonban nem befolyásolja a szimulációt, mivel az egyenletek összeállítása során gyakorlatilag ez a két érték mindig szorzatösszegként szerepel.

A szimuláció futtatásához alkalmazott ANSYS szoftver a hőmérsékletfüggő anyagmodelleket képes kezelni, azonban a nedvességváltozás miatti anyagtulajdon-ság változást már nem, ezért az anyagjellemzőket konstansnak tekintettem a vizsgálat hőmérsékleti tartományában.

Anyagtulajdonságok					
Réteg megnevezése	Vastagság [m]	Hővezetési tényező λ [W/mK]	Sűrűség ρ [kg/m ³]	Fajhő c_p [J/kgK]	Térfogatkapacitás $\rho \cdot c_p$ [MJ/m ³ K]
Talaj (Homokos, kavicsos talaj) - MSZ EN ISO 13370:2008	15	2,00	2000,00	1000,00	2,00
Padló felbeton - MSZ EN ISO 10456:2008	0,06	1,35	2000,00	1000,00	2,00
Padló aljzatbeton (vasalt, 1%) - MSZ EN ISO 10456:2008	0,10	2,30	2300,00	1000,00	2,30
Padló hőszigetelés, EPS - MSZ EN ISO 10456:2008	Paraméterfüggő	0,04	20,00	1460,00	0,03
Falazat (PTH 44 K + 2 cm mészvakolat)	0,46	0,11	779,57	881,74	0,69
Lábazat (PTH 44 HS + 2 cm mészvakolat)	0,46	0,14	693,48	881,74	0,61

25. táblázat: Anyagtulajdonságok

A 25. táblázat szerinti értékeket rendeltem a modell egyes szilárd testeikhez. A talaj a standard vizsgálat során homokos, kavicsos talajként került meghatározásra. A felbeton közepes sűrűségű vasalatlan beton, míg az aljzatbeton 1%-os vashányaddal vasalt beton. A padlószerkezetben helyet kapó hőszigetelés hővezetési tényezője a szabványos EPS hab hővezetési tényezőjével egyenlő, melynél a valóságban akár 25%-al kisebb hővezetési tényezőjű anyagokat is beépíthetünk, azonban az építetők választhatnak nagyobb hővezetési ellenállású hőszigetelő réteget is. Az általam választott érték standardnak mondható a hőszigetelő anyagok között, azonban a sűrűsége megfelel a padlószerkezetekben elhelyezésre szánt EPS hab táblákéinak.

A falazatot és a lábazati falat PoroTherm falazóblokkból készítettem, mely során olyan falazóelemeket választottam, amelyek 1 – 1 cm vakolat felhordásával pontosan teljesítik a 1246/2013. Korm. határozatban előírt $U_{fal} = 0,24$ W/m²K és $U_{lábazat} = 0,3$ W/m²K követelményértékeket. A választásom azért esett a kvázi homogén falszerkezeti kialakításra, mert ennél kisebb hővezetési ellenállással rendelkező, ám külső oldalon szigetelt falazatok nagyobb hasznos hőtároló tömeggel rendelkeznek, így a jelen vizsgálat során kedvezőbb eredményeket kaphattunk volna. A kutatás során azonban már láthattuk, hogy mérlegelendő döntés esetén mindig a kedvezőtlenebb, úgymond biztonság javára tévedés megoldását választottam, ezáltal általánosabban szélesebb körben és biztonságosan felhasználhatóvá téve a kapott eredményeket.

7.1.4. KÜLSŐ HŐMÉRSÉKLETFÜGGVÉNY MEGALKOTÁSA, PEREMFELTÉTELEK

7.1.4.1. Külső oldali peremfeltételek

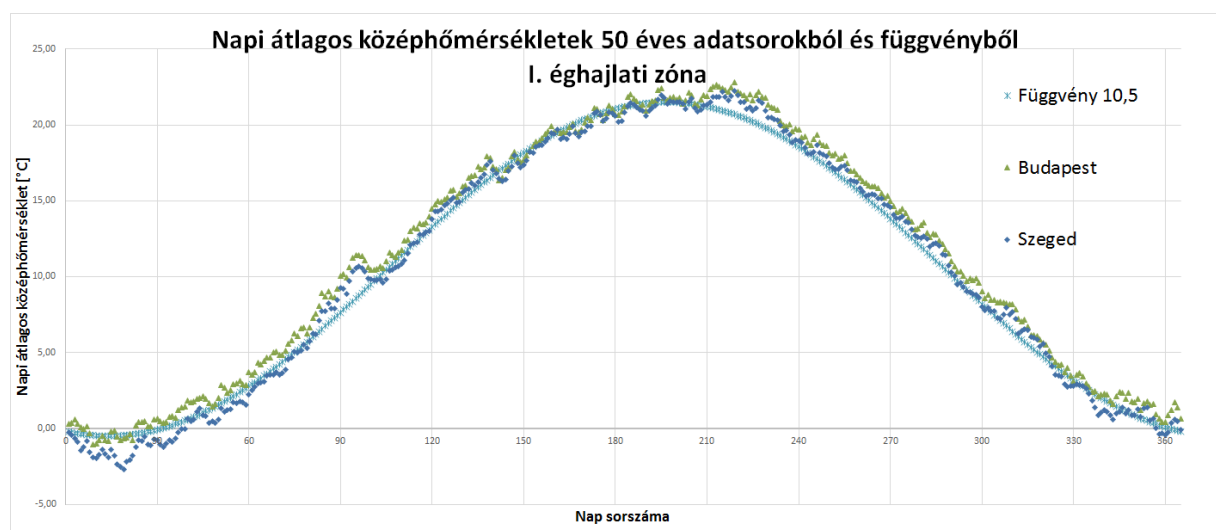
A geometriai modell külső oldalán a 43. ábrának megfelelően hőmérsékleti és felületi hőátadási tényezőre vonatkozó peremfeltételt helyeztem el, mely szintén függ a külső hőmérséklettől. A dolgozat 4.11.1-es pontjában láthattuk, hogy hazánk túlnyomó részén két hőmérsékleti tartomány található, a nagyobb területen a 10 °C - 11 °C-ot míg kisebb részben pedig 9 °C – 10 °C közötti értékeket mérhetünk. E miatt két éghajlati zónát különböztet meg a kutatás során, melyek egyike 10,5 °C-os éves átlagos középhőmérséklet és 22 °C-os hőingás mellett, míg a II. zóna 9,5 °C-os éves átlagos középhőmérséklet és szintén 22 °C-os éves hőingás mellett került meghatározásra.

A TDK-ban az I. éghajlati zóna hőmérsékletét leíró függvény, melyet Graph és Wolfram Alpha Pro használatával határoztam meg, a következő:

$$T = T_m + T_r \cdot \cos\left(2,9 + \frac{2 \cdot \pi \cdot X}{365}\right) [^{\circ}\text{C}] \quad (72)$$

ahol „T_m” az éves átlagos középhőmérséklet, mely az I. éghajlati zónában 10,5 °C, „T_r” az éves átlagos hőingás fele, azaz 11 °C, „X” pedig az év adott napja, amelyen a napi középhőmérsékletet meg szeretnénk határozni.

A hőmérsékletfüggvény helyességét az alábbi ábra szemlélteti:



44. ábra: Napi átlagos középhőmérsékletek 50 éves adatsorokból és függvényből, I. éghajlati zóna

A 44. ábrán az adott hőmérsékleti zónára jellemző, két magyarországi város 50 éves napi középhőmérsékleteiből (1950-2000-ig) átlagolt napi átlagos középhőmérsékletek láthatóak, melyekhez adatokat az Országos Meteorológiai Szolgálat online adat-tárában találtam. Az ábrán látható továbbá a „Függvény 10,5” elnevezésű (72)-es egyenlettel meghatározott hőmérsékletfüggvény, mely igen jó egyezést mutat.

A kutatás szempontjából érdekes tartomány azonban a standard fűtési idény, avagy az Október 15. és Április 15.-e közötti időszak. A létrehozott „Függvény 10,5” hőmérsékleti függvény a 7/2006. TNM Rendelet szerinti fűtési idény átlaghőmérsékletét egy tizedes pontossággal megközelíti (3,52 °C-ra adódik a Rendelet éghajlati adataiból következő 3,6 °C helyett), így a további vizsgálatok során a függvények felhasználhatóak, az eredmények illeszthetők.

A hőmérsékletfüggvény alapján meghatározhatóak a napi átlagos középhőmérséklet alapján változó felületi ellenállások a következő képlet segítségével, mely az MSZ EN ISO 6946 szabvány alapján:

$$R_{se} = \frac{1}{4 + 4 \cdot v + \varepsilon \cdot 4 \cdot \sigma \cdot (T + 273,15)^3} \quad (73)$$

ahol „v” a szélesebséget jelöli m/s-ban, és hazánkban a 4.11.2.-es pont alapján 3 m/s-nak tekinthető, „ε” a felület emissziós tényezője, melyet az MSZ EN ISO 6946 alapján általánosan 0,9-nek vehetünk fel. Továbbá „σ” a Stefan-Boltzmann állandó, melynek értéke $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, „T” pedig a (72)-es egyenlet szerint meghatározott napi átlagos középhőmérséklet.

7.1.4.2. Belső oldali peremfeltételek

A belső oldalon a 7/2006. TNM Rendelet szerinti egyszerűsített számítás alapján konstans 20 °C-os hőmérsékletet határoztam meg. A belső oldali felületi ellenállás:

$$R_{si} = \frac{1}{h_{ci} + \varepsilon \cdot 4 \cdot \sigma \cdot (T + 273,15)^3} \quad (74)$$

ahol a (73)-as egyenlethez képest a változást „h_{ci}” konvekciós hőátadási tényező értéke jelenti, amely vízszintes irányú hőáramlás esetén (függőleges falaknál) 5 W/m²K, míg lefelé irányuló hőáramlás esetén (padló felületén) 0,7 W/m²K.

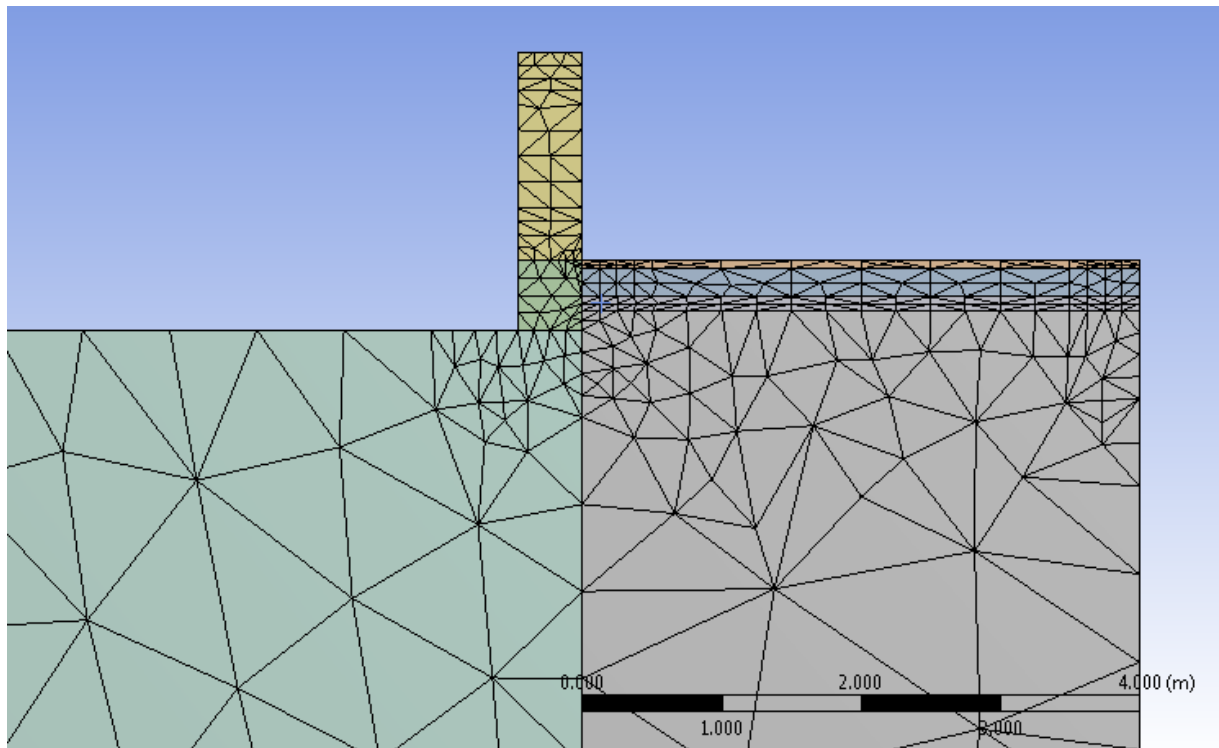
A (74)-es egyenlet felhasználásával számított belső, konstans hőátadási tényezők (melyek a felületi ellenállások reciprokok értékei) a 43-as ábrán feltüntetésre kerültek.

7.1.4.3. Talajhőmérséklet

Mivel a talajt nem áll módunkban végtelen mélységig és kiterjedéssel modellezni, így azt egy hőmérsékleti peremfeltétel megadásával tudjuk helyettesíteni, mely során a korábban szereplő 13. ábra értelmében hazánkban átlagosan 15 m mélységben a talaj hőmérséklete állandó $9\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nak tekinthető. Természetesen ez az érték függ a talaj fizikai paramétereitől és a lokálisan eltérő geotermikus gradiens értékétől is, de a kutatás során ezek területi eloszlását nem vizsgáltam a továbbiakban, hanem az említett átlagértéket vettem figyelembe.

7.1.5. A VÉGESELEMES HÁLÓ

A geometriai modell végeselemes felbontását szintén az ANSYS szoftver segítségével végeztem el. A geometriai modell térbeli kiterjedéséről eddig nem esett szó, de az eredmények lekérése szempontjából szükséges, és a térbeli kiterjedés a hálófelbontást is befolyásolja. Míg 2D-s vizsgálat esetén a legegyszerűbb, úgynevezett szimplex elemnek a háromszög tekinthető, addig 3D-s esetben a szimplex a tetraédert jelenti.



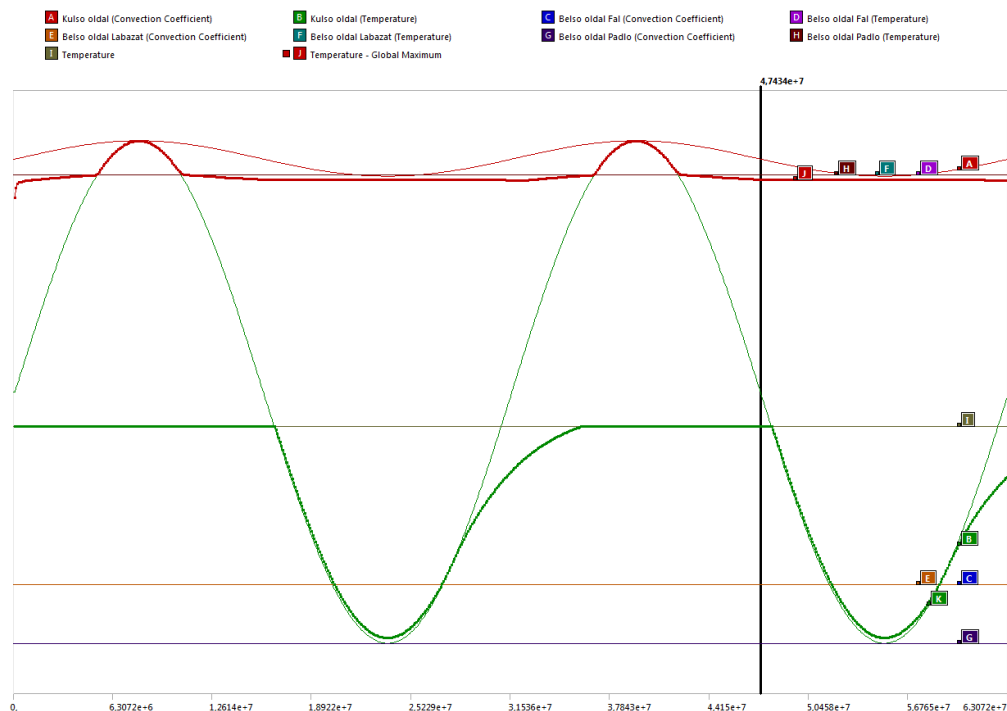
45. ábra: Geometriai modell végeselemes felbontása

A modell térbeli kiterjedése 10 cm vastagságú a z tengely mentén, mely vastagság azért került kiválasztásra, hogy minél kisebb modellméret mellett (minél kisebb térbeli kiterjedés kevesebb csomópontot is jelent a hálón, ezáltal gyorsabb számíthatóságot), de még a háló torzulása nélküli felbontást tudjunk kialakítani tetraéderes elemek felvétele mellett.

A 45. ábrán látható, hogy a végeselemes felbontást a hőáramlás szempontjából legfontosabb sarokcsatlakozásnál és a padlószerkezet alatt, valamint az ábrán nem látható módon a padló és falszerkezetek felületén, a teljes modellen alkalmazott hálóhoz képest besűrítettem. Az egyes modellek esetében átlagosan 6000 elemmel kerültek kialakításra az egyes végeselemes hálók. A lekérdezések az egyes szerkezetek peremfelétellel érintkező reakciói lesznek a későbbiekben.

7.1.6. A SZIMULÁCIÓK FUTTATÁSA ÉS EREDMÉNYEI

A szimuláció összeállítását az ANSYS Workbench programjában készítettem el, ezt a felületet a 42. ábra mutatta be. A tranziens szimuláció beállításait és paramétereit az alábbi ábra szemlélteti, melyen már a lefuttatott eredmények közül vastag piros vonallal a globális maximum-, vastag zöld vonallal pedig a globális minimum hőmérséklet látható.

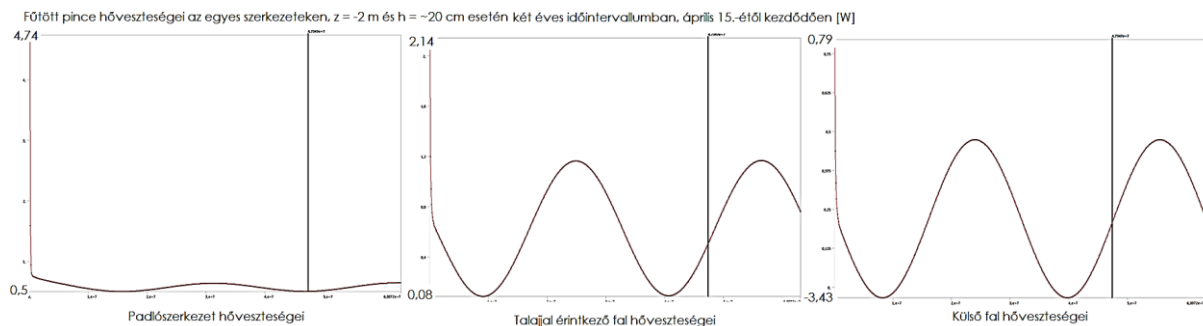


46. ábra: Tranziens szimuláció változói és beállításai

Az ábrán látható továbbá vékony zöld vonallal a külső hőmérsékletfüggvény változása, vékony piros vonallal pedig a külső oldali hőátadási tényező változása. A többi érték konstans és szintén feltüntetésre került az ábrán. Megfigyelhető, hogy a globális minimum és maximum hőmérséklet bizonyos helyeken eltér a külső hőmérséklettől, ez a tranziens vizsgálat során számításba vett anyagok hőtárolási képessége miatt van. Ez okozza azt is, hogy a függőleges fekete vonaltól jobbra lévő, vizsgált 183 napos időintervallumban valóban nem alkalmazhatunk állandósult állapotot, mivel a maximum és minimum hőmérséklet ebben az időtartamban sem korrelál a külső hőmérsékletváltozással, azaz az átlagértékei nem a hőmérsékletfüggvény átlagértékei szerint változnak.

A vizsgálatot tehát a 47-es ábrán látható módon 730 nap hosszúságban, 1 napos (86400 s) időlépésként végeztem el minden egyes modell esetében, az eredmények lekérdezését pedig az utolsó 183 nap, azaz a standard fűtési idényre végeztem el. A lekérdezések időtartama előtti 547 nap az elemek hőmérsékletének és az eltárolt hőmennyiségeknek a beállása miatt szükséges, mivel a modellt 10,5 °C-os kezdő hőmérsékletről indítottam. A hőmérséklet beállítását a hőveszteségek is jelzik az alábbi, 47. ábrán a kezdeti szakaszon.

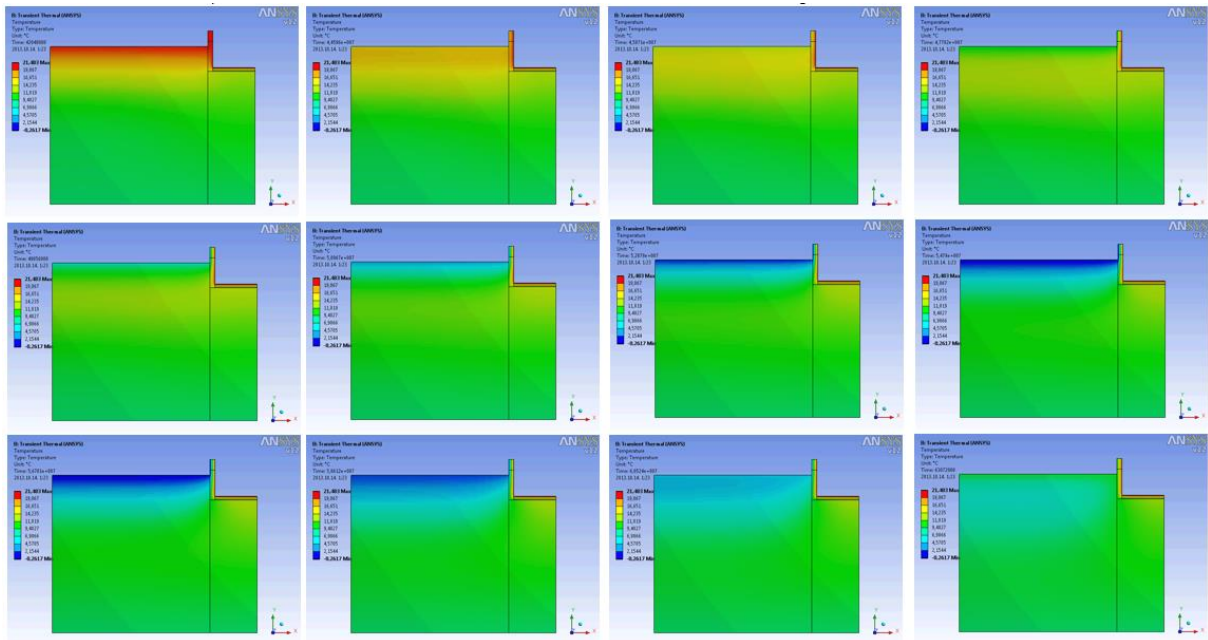
A szimuláció során egy modell eredményeit az alábbi ábra szemlélteti, melyen külön került ábrázolásra a padlószerkezet, a lábazati (és talajjal érintkező) fal valamint a külső fal hőveszteségei.



47. ábra: Hőveszteségek egy modell esetében szerkezetenként

A fenti ábrán látható, hogy az egyes szerkezetek hőtárolási képességük, illetve talajjal való érintkezésük jelentőségének függvényében eltérő nagyságú hőveszteségeket szenvednek el a vizsgált időtartamban, alapvetően azonban a hőveszteségek követik a peremfeltételek cosinusosan változó tendenciáit.

A 183 napos fűtési időnyre meghatározott hőmérséklet eloszlásokat 12 különböző időpillanat segítségével, a 48. ábrán bemutatott modell alkalmazása esetén az alábbi ábrán tekinthetjük meg.



48. ábra: Hőmérséklet eloszlás a talajban és a kapcsolódó szerkezetekben a fűtési időny alatt

7.1.7. A VONALMENTI HŐÁTBOSZTÁSI TÉNYEZŐK SZÁMÍTÁSA

Az egyes modellek szerkezeteinek fűtési időny időtartamában, naponta lekérdezett átlagos hőveszteségeit a 183 napos időtartamra átlagolva kapjuk meg „L_{3D}” szimulált szerkezeti hőveszteségeket, melyek segítségével a vonalmenti hőátbocsátási tényezők számíthatóak az alábbi összefüggéssel:

$$\psi_t = \frac{\sum(L_{3D,i} [W] \cdot 10)}{1 \text{ m} \cdot 16,48 \text{ K}} - A \cdot U_{R,fal} - A \cdot U_{R,lábazat} \quad (75)$$

ahol a 10-es szorzó az egy folyóméterre való felszorzás miatt, a 16,48 K pedig az 1 K egyensúlyi hőmérsékletre történő osztás miatt szerepel. Továbbá a külső fal és a lábazat (talajjal érintkező fal) felületi hőveszteségei is levonásra kerülnek, tehát a vonalmenti hőátbocsátási tényező csak a padló felületi hőveszteségeit, a szerkezetek csatlakozásainál kialakuló többlet hőveszteségeket, valamint a talaj hatásait fogja tartalmazni a talajjal érintkező fal és a padló szerkezet esetében is. A teljes hőveszteség megkapásához a talajjal érintkező pincefal hőveszteségeit hozzá kell majd adni.

Talajjal érintkező padlószervezetek vonalmenti hőátbocsátási tényezői [W/mK]														
z [m]	U _{padló} [W/m ² K]													
	4	2	1	0,75	0,5	0,4	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1			
-3	0,69	0,58	0,40	0,33	0,23	0,18	0,11	0,07	0,02	-0,04	-0,10			
-2	0,91	0,79	0,59	0,51	0,40	0,34	0,27	0,22	0,17	0,11	0,05			
-1,5	1,03	0,90	0,68	0,60	0,48	0,42	0,34	0,29	0,24	0,18	0,11			
-1	1,17	1,02	0,77	0,68	0,56	0,49	0,41	0,36	0,30	0,24	0,17			
-0,75	1,23	1,08	0,82	0,73	0,60	0,53	0,44	0,39	0,33	0,27	0,19			
-0,5	1,32	1,14	0,86	0,76	0,63	0,55	0,47	0,41	0,35	0,29	0,21			
-0,25	1,40	1,21	0,91	0,81	0,66	0,59	0,49	0,44	0,38	0,31	0,23			
0	1,51	1,31	0,98	0,87	0,71	0,63	0,53	0,47	0,40	0,33	0,25			
0,25	1,65	1,42	1,05	0,93	0,77	0,68	0,55	0,49	0,42	0,35	0,26			
0,5	1,51	1,31	1,00	0,89	0,74	0,65	0,55	0,50	0,43	0,36	0,27			
0,75	1,41	1,23	0,96	0,85	0,72	0,64	0,53	0,47	0,42	0,34	0,26			
1	1,34	1,18	0,92	0,82	0,68	0,61	0,52	0,46	0,40	0,33	0,26			
1,5	1,23	1,09	0,87	0,78	0,65	0,58	0,50	0,44	0,39	0,32	0,25			
2	1,15	1,02	0,82	0,74	0,62	0,56	0,48	0,43	0,37	0,31	0,24			
3	1,04	0,92	0,76	0,68	0,58	0,52	0,45	0,41	0,36	0,30	0,23			

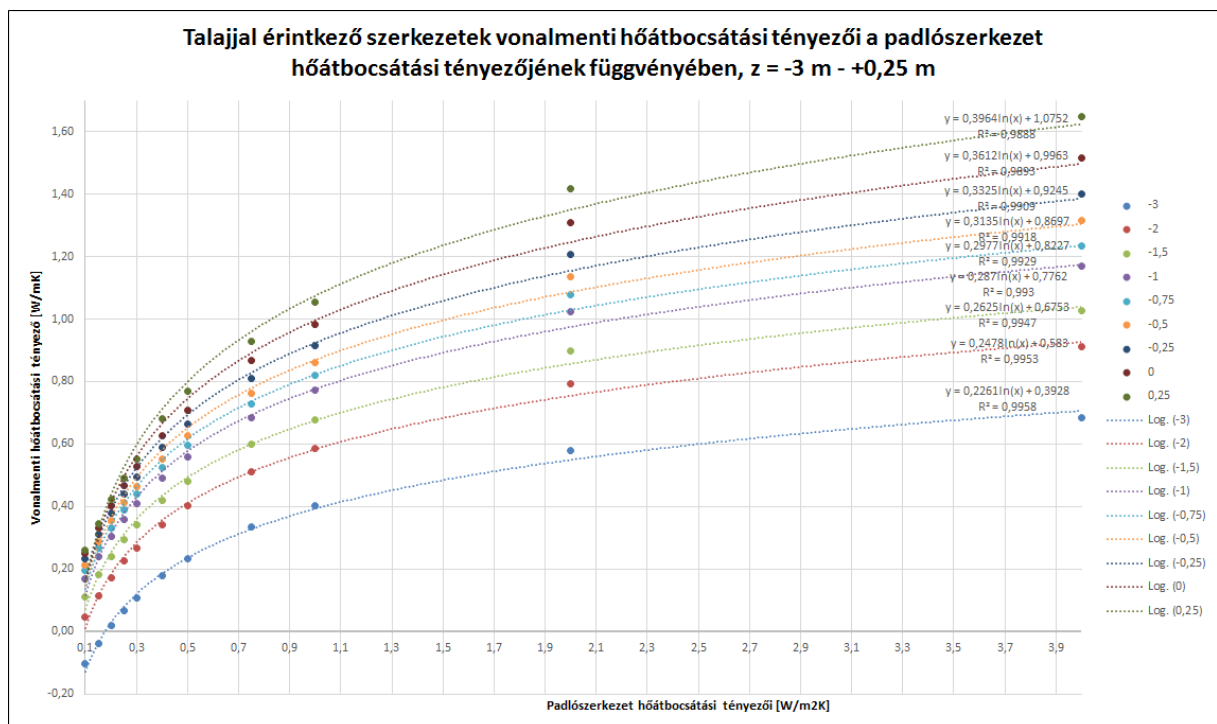
A táblázat tartalmazza a padlószervezet felületi hővesztéseit valamint a 1246/2013. (IV.30.) Korm. Határozat szerinti falazat és lábazati fal (talajjal érintkező fal) követelményértékeivel számított csatlakozások vonalmenti hővesztésgéteit (hőhidakat). A táblázatban nem szereplő értékek számításához a közötti értékek bilineáris interpoláció alkalmazható. A pincefalak hővesztéseit a táblázat értékei nem tartalmazzák, azokat szerkezeti hőátbocsátási tényezőjük és felületük nagysága alapján számítsuk a hővesztés-tényezőhöz.

49. ábra: Talajjal érintkező padlószervezetek vonalmenti hőátbocsátási tényezői

Az előző oldalon a padlószervezetek számított vonalmenti hőátbocsátási tényezők összefoglaló táblázatát találhatjuk. A táblázat értékei a (75)-ös összefüggés segítségével kerültek kiszámításra, és 165 db különböző modellen végzett tranziens végelelemes szimuláció fűtési idényre történt három épülethatároló szerkezetének 90 585 hőveszteség adatának feldolgozásából álltak össze.

7.1.8. A VONALMENTI HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐK ÖSSZEFÜGGÉSE

Az előző oldalon található, táblázatba szedett eredmények között azokat grafikusán ábrázolva összefüggés figyelhető meg. Az egyes padló hőátbocsátási tényezők esetén a pontokat ábrázolva azokra igen jó illeszkedéssel illeszthető logaritmikus egyenlet. A pontokat a $z = -3$ m és $z = 0,25$ m tartományban ábrázolva az alábbi, 50. ábrán találhatjuk.

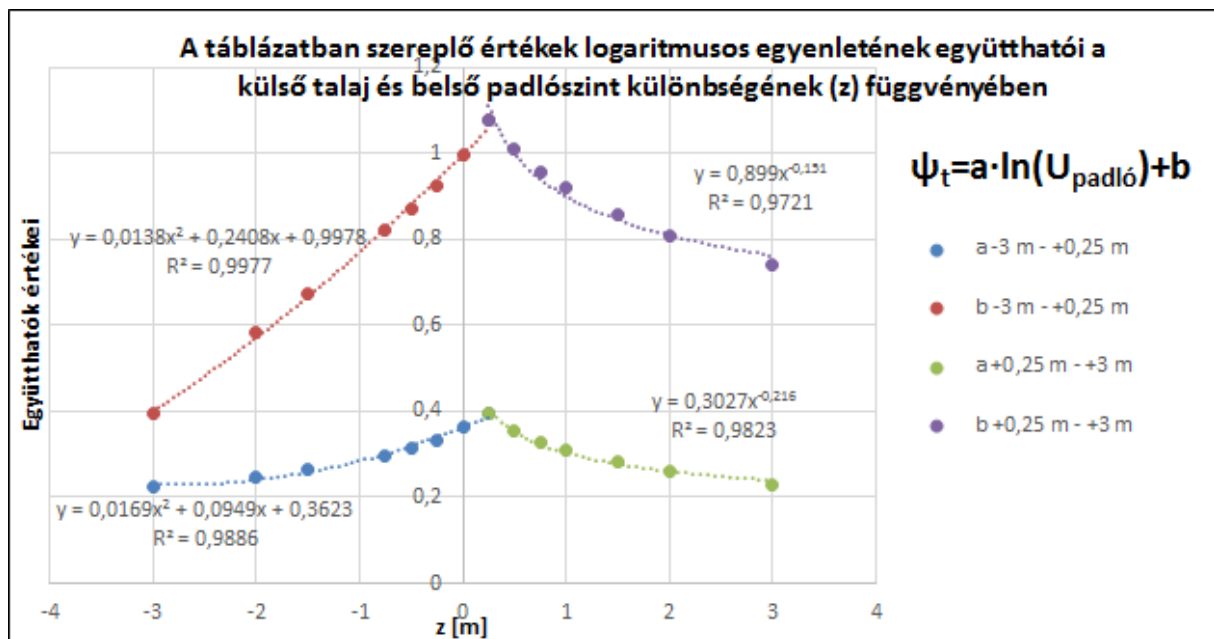


50. ábra: Logaritmikus összefüggés a szimulált értékek között $z = -3$ m és $+0,25$ m között.

A táblázatos értékek alapján is megfigyelhető, azonban a logaritmikus egyenletek együtthatóinak vizsgálatakor is látszik, hogy a táblázatos értékek $z = 0,25$ m és $z = 0,5$ m talajszinthez viszonyított padlószint esetén csökkenni kezdenek. Ekkor ugyanis a belső oldalonról nézve a lábzatai fal nem szerepel a vonalmenti hőátbocsátási tényezőben, mivel a padlószint magasabban van, mint a külső talaj szintje és a lábzatot fél méteres magasságig, vagy a padlószintig modelleztük.

Ahhoz, hogy az egyes padlószervezetek hőátbocsátási tényezőinek függvényében meghatározhassunk egy egyenletet, mely leírja a táblázatban szereplő értékeket, meg kell vizsgálnunk, hogy a logaritmikus egyenletek „a” illetve „b” együtthatói hogyan változnak a z értékek függvényében.

A táblázatban szereplő értékek logaritmikus egyenletének együtthatóváltozását a 51. ábrán láthatjuk, mely pontokra illeszkedő függvények alapján felírhatjuk a táblázat értékeit visszaadó egyenleteket.



51. ábra: A logaritmikus összefüggés együtthatóinak változása „z” függvényében

A fenti ábrán látható, hogy két egyenlettel tudjuk visszaadni a táblázat értékeit, mivel nem illeszthető egyszerű egyenlet a teljes ponthalmazra, azonban két szakaszra bontva, az együtthatók $z = 0,25$ m-ig illetve $z = 0,25$ m-től vizsgálva megoldható a függvényillesztés. Az előbbi szakaszon másodfokú polinomot tudunk illeszteni a két együttható pontjaira, míg utóbbi szakaszon exponenciális összefüggés figyelhető meg.

Az együtthatók változását leíró függvényeket beillesztve a logaritmikus függvényekbe kaphatjuk meg a táblázatos értékeket visszaadó összefüggéseket:

Ha $z < 0,25$ m, akkor:

$$\psi_t = (0,0169 \cdot z^2 + 0,0949 \cdot z + 0,3623) \cdot \ln(U_{padló}) + (0,0138 \cdot z^2 + 0,2408 \cdot z + 0,9978)$$

(76)

Ha $z \geq 0,25 \text{ m}$, akkor:

$$\psi_t = 0,3027 \cdot z^{-0,216} \cdot \ln(U_{padló}) + 0,899 \cdot z^{-0,151} \quad (77)$$

7.1.9. KORREKCIÓS TÉNYEZŐK SZÜKSÉGESSÉGE

A 49-es ábra táblázatos értékei, valamint az 7.1.8-as pontban közölt egyenletek azt az esetet írják le, amikor az épület az I. éghajlati régióban, homokos és/vagy kavicsos talajon fekszik, a felbeton alatt, de a padlólemez felett elhelyezett hőszigetelő réteggel rendelkezik és a padló belső hossza 4 m. Az értékek e kondíciók mellett egy folyóméterre vonatkoznak, melyet a belső padló kerülete mentén számíthatunk.

Azonban felmerülhet a kérdés, hogyan alakulnak a vonalmenti hőátbocsátási tényezői a talajjal érintkező szerkezeteknek, ha más a külső hőmérséklet, a talaj-összetétel, a padló szerkezeti kialakítás vagy a padlóhossz kevesebb, mint 4 m.

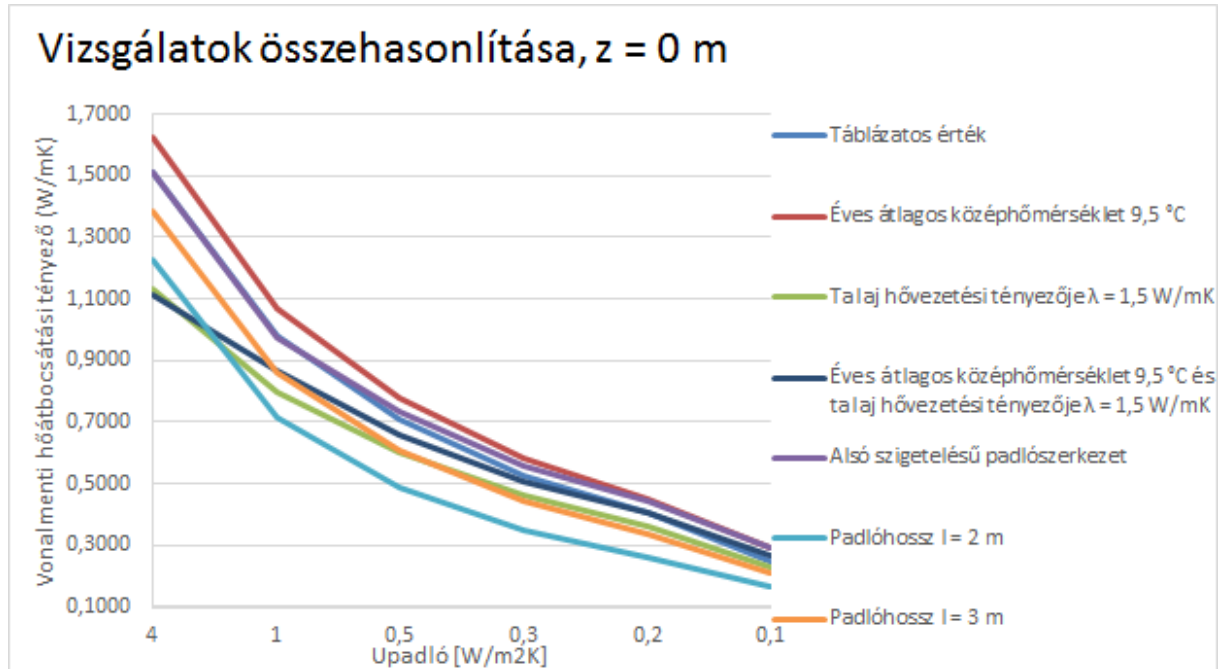
Ahelyett, hogy minden változó kondíció esetén újabb táblázatot kelljen alkalmazni, az előbbiekben bemutatott táblázatban szereplő értékekhez rendelünk korrekciós tényezőket. A korrekciós tényezők azonban nem szorzótényezők lesznek, hanem az egyes kondícióváltozás hatásait az eredeti értékekhez hozzá fogjuk adni (vagy negatív, tehát csökkenő vonalmenti hőátbocsátási tényező esetén levonni).

A korrekciós tényezők meghatározásához végzett szimulációs vizsgálatokról $z = 0 \text{ m}$ szintkülönbség esetén az alábbi táblázatban találhatunk információt:

Vizsgálat megnevezése	z [m]	Talajjal érintkező szerkezetek vonalmenti hőátbocsátási tényezői, ψ_t [W/mK]					
		$U_{padló}$ [W/m ² K]					
		4	1	0,5	0,3	0,2	0,1
Táblázatos érték	0	1,5143	0,9828	0,7093	0,5267	0,4033	0,2501
Éves átlagos középhőmérséklet 9,5 °C	0	1,6280	1,0669	0,7771	0,5832	0,4520	0,2890
Talaj hővezetési tényezője $\lambda = 1,5 \text{ W/mK}$	0	1,1343	0,7989	0,6000	0,4595	0,3599	0,2309
Éves átlagos középhőmérséklet 9,5 °C és talaj hővezetési tényezője $\lambda = 1,5 \text{ W/mK}$	0	1,1098	0,8672	0,6570	0,5083	0,4030	0,2666
Alsó szigetelésű padló szerkezet	0	1,5143	0,9767	0,7317	0,5595	0,4426	0,2940
Padlóhossz $l = 2 \text{ m}$	0	1,2283	0,7122	0,4857	0,3464	0,2604	0,1622
Padlóhossz $l = 3 \text{ m}$	0	1,3838	0,8598	0,6044	0,4406	0,3341	0,2068

26. táblázat Korrekciós vizsgálatok eredményeinek összehasonlítása $z = 0 \text{ m}$ esetén

A fenti táblázatban az eredeti, 24-es ábrán szereplő táblázatos értékekhez viszonyított, megváltozott feltételekkel és jellemzőkkel szimulált értékek találhatók meg. A táblázat értékeinek egymáshoz képesti viszonyát grafikusan az 52-es ábra szemlélteti.



52. ábra: A vizsgálatok eredményei grafikusan ábrázolva

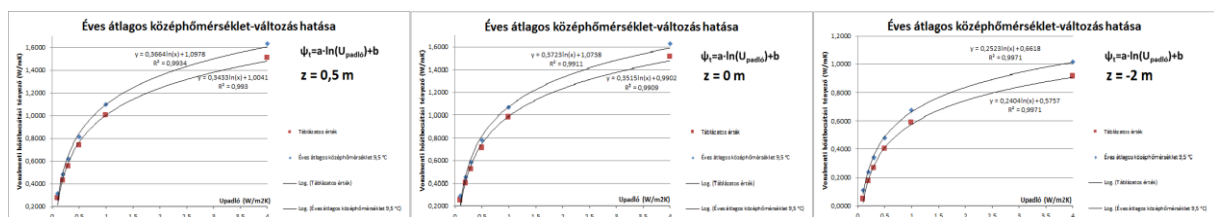
Az összeadás jelen esetben azért célszerűbb a szorzótényezők helyett, mivel a hőhidas részekben a hőhídhatás nem szuperponálható. Két tulajdonság megváltoztatásával a jelenség nem lesz azonos a két tulajdonság hatásának sem szorzatával, sem pedig összegével. A hatás ráadásul a z és a padló hőátbocsátási tényezőjének függvényében változik, ezért az egyes korrekciós tényezők meghatározásához a táblázatos értékhez képesti különbséget leíró egyenletekre lesz szükségünk.

7.1.10. KORREKCIÓS TÉNYEZŐK SZÁMÍTÁSA

A korrekciós tényezők meghatározását, mivel azt a kutatás keretén belül hat vizsgálatnál is elkészítettem, a felesleges módszertani ismételések helyett egyszer és általánosságban mutatom be. Mivel a korrekciós tényezők tulajdonképpen szabadon meghatározhatóak bármilyen a táblázatos értékek szimulációjától eltérő, de hasonló jellegű szimuláció esetén és az eredeti táblázatos értékeket korrigálhatjuk velük, így tulajdon-

képpen a jelen dolgozatban és a TDK-ban is szereplő tényezők csupán annak lehetőségét hivatottak bemutatni, hogy a táblázatos értékek megfelelő korrekció esetén bárhol és bármilyen kondícióváltozás esetén alkalmazhatóak.

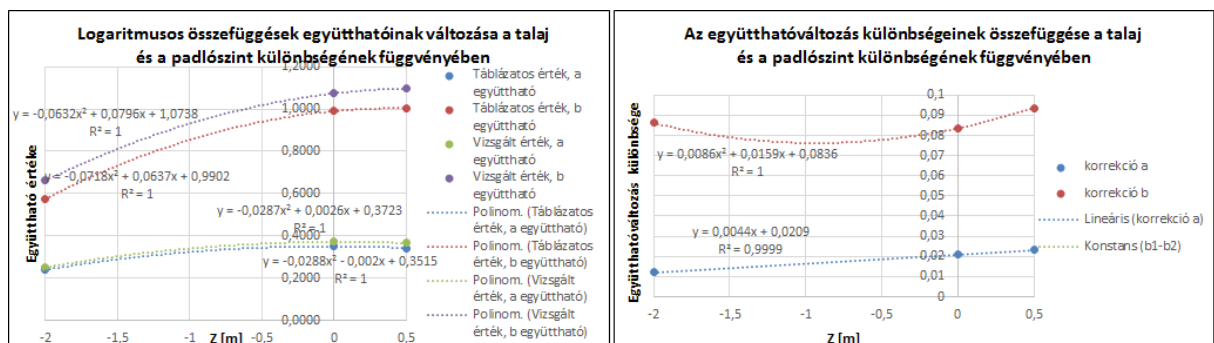
A korrekciós tényezőket leíró egyenletek meghatározásához a padlószerkezet hőátbocsátási tényezőjének függvényében ábrázolhatjuk az értékeket, mely így az előbbieken is látott logaritmikus tendenciát fogja követni. A kérdéses korrekciós tényező tehát a táblázatban szereplő logaritmikus egyenlet és az adott eltérő tulajdonságokkal vizsgált talajjal érintkező szerkezet vonalmenti hőátbocsátási tényezőjének különbségét kell előjelhelyesen visszaadnia a táblázatos értékhez képest.



53. ábra: Az éves átlagos középhőmérséklet 1 K-el való csökkenése esetén az értékek növekednek

A fenti ábrán a külső hőmérsékleti korrekció segítségével szemléltetve a vizsgálatok eltéréseit a táblázatos értékektől megfigyelhető, hogy ha a külső hőmérséklet átlagos 1 K-el kevesebb az év folyamát, a vonalmenti hőátbocsátási tényezők is magasabbak lesznek, de a különbség természetesen mind a padlószerkezet hőátbocsátási tényezőjétől, mind pedig a talaj és a padlószint helyzetének különbségétől függ.

A logaritmikus egyenletek együtthatóit ábrázolva azok különbözetének összefüggése adja meg azon „a” illetve „b” együttható értékét, melyeket alkalmazva a különbözetet leíró függvényt kapjuk meg előjelhelyesen.



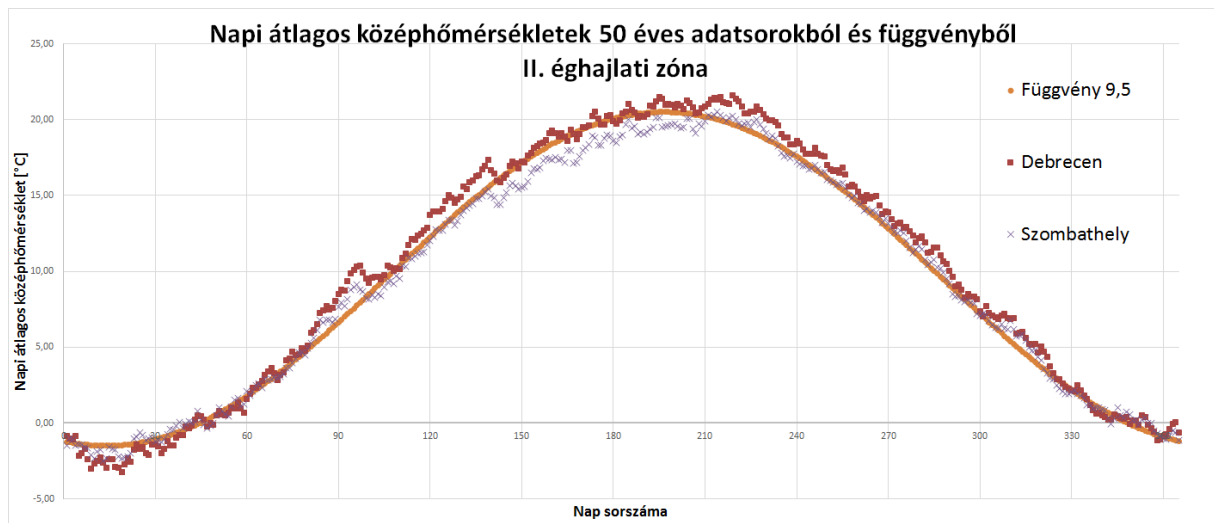
54. ábra: Korrekciós tényező számításához szükséges vizsgálatok

A korrekciós tényezőket az épületek esetében leggyakoribban előforduló z tartományban, $z = 0,5$ m és $z = -2$ m között vizsgáltam, és e tartományban határoztam meg a korrekciós tényezőket megadó egyenleteket is. A további tartományok esetében is lehetőség van a korrekciós tényezők meghatározására, azonban ez további szimulációk futtatása szükséges, azaz tulajdonképpen külön táblázatot is készíthetnénk.

7.1.10.1. Külső hőmérsékleti korrekció

A dolgozat 4.11.1-es pontjában bemutatásra került Magyarország területén megfigyelhető éves átlagos hőmérsékletek eloszlása. Ez alapján az 7.1.4.1-es részben két éghajlati zónára osztottam fel hazánk területét, mely során az I. éghajlati zónára jellemző hőmérsékletfüggvényt alkalmaztam a táblázatos értékek szimulációja során.

Azonban ha az épület a II. éghajlati zónában található, az éves átlagos középhőmérséklet és (a hőmérsékletfüggvény jellege miatt) a fűtési idény átlagos középhőmérséklete is $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal kevesebb lesz. A hőveszteség-tényező elviekben 1 K hőmérsékletkülönbségre adja meg a hőveszteségek értékét, azonban ez a szemlélet akkor alkalmazható csupán, ha a számítások során szereplő hőfokhíd érték változik az éghajlati zónáknak megfelelően.



55. ábra: II. éghajlati zóna és a hőmérsékletet jellemző „Függvény 9,5”

Mivel a 7/2006. TNM Rendelet hazánkat éghajlati szempontból (is) egységesen kezeli, ezért az előírt számítási módszer alkalmazásával a hőveszteségek pontos meghatározását csak úgy tehetjük meg, ha a ténylegesen kialakuló belső és külső hőmérséklet különbsége helyett (mely $2,52\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os külső hőmérséklet esetén és $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os belső hőmérséklet esetén a fűtési idényben $17,48\text{ K}$ lenne) az előbbieken is alkalmazott $16,48\text{ K}$ -

el osztjuk a szimulált hőveszteségeket. Ez által az éghajlati zónaváltozás hatása a vonalmenti hőátbocsátási tényezőkben fog megjelenni.

A II. éghajlati zónára meghatározott függvény megegyezik az I. éghajlati zónáéval, azaz a (72)-es összefüggésben közölttel, a különbség „T_m” éves átlagos középhőmérséklet értékében határozható meg, mely a II. éghajlati zónában 9,5 °C. A függvény és az éghajlati zónában található két város 50 éves napi középhőmérsékleteinek átlaga az 55-ös ábrán volt látható.

Az 7.1.10-es pontban ismertetett lépések segítségével a vizsgálat során a „Függvény 9,5” szerinti külső hőmérsékleteket felhasználva a korrekció értékeit az alábbi összefüggés segítségével írhatjuk fel a $z = 0,5 \text{ m} - z = -2 \text{ m}$ tartományban:

$$\gamma_{mt} = (0,0044 \cdot z + 0,0209) \cdot \ln(U_{padló}) + 0,0086 \cdot z^2 + 0,0159 \cdot z + 0,0836 \quad (78)$$

7.1.10.2. Talaj-összetételi korrekció

Magyarország területén nem csak az éghajlati zónák között lehet eltérés, de a vonalmenti hőátbocsátási tényezők értékét jelentősen befolyásoló, a talajon fekvő padló szerkezetek alatt vagy a talajjal érintkező pincefal mellett található talajok hőtechnikai tulajdonságai között is.

Az MSZ EN ISO 13370:2008 szabvány egyszerűsített esetben három különböző kategóriát ad meg a talajok reprezentatív hővezetési tényezőjére és térfogati hőkapacitására. Magyarország területén ebből a három kategóriából kettő valóban gyakran elő is fordul és e két kategória segítségével az országunk talaj-összetételét a szinte teljes egészében le is fedhetjük.

A 49-es ábrán szereplő táblázatos értékek a homokos, kavicsos talajokra jellemző hőtechnikai tulajdonságok alapján kerültek modellezésre, a talaj-összetételi korrekció tehát az agyagos, iszapos talajok esetén fogja megadni a különbözetet.

Az 1. táblázat alapján előre tudható, hogy agyagos talaj esetén kedvezőbben alakulnak a vonalmenti hőátbocsátási tényezők értékei, mivel e talajok hővezetési tényezője kisebb, azonban a térfogati hőkapacitásuk nagyobb, mint a homokos, kavicsos talajoké. Ezáltal gyakorlatilag jobban szigetelnek és több energiát is képesek eltárolni a nyári időszakról.

A talaj-összetételi korrekció értékeit, melyek jelen esetben negatív értékek lesznek, az alábbi összefüggés segítségével írhatjuk fel a $z = 0,5 \text{ m} - z = -2 \text{ m}$ tartományban:

$$\gamma_g = (0,0078 \cdot z^2 + 0,0013 \cdot z - 0,1) \cdot \ln(U_{padló}) + 0,006 \cdot z^2 + 0,0008 \cdot z - 0,2075 \quad (79)$$

7.1.10.3. Külső hőmérséklet és talaj-összetételi korrekció

Abban az esetben, ha az épület egyidejűleg esik a II. éghajlati zónába és agyagos, iszapos talajon áll, az alkalmazandó korrekciós tényezőt $z = 0,5 \text{ m} - z = -2 \text{ m}$ tartományban a következő összefüggéssel jellemezhetjük:

$$\gamma_{mt,g} = (0,0313 \cdot z^2 + 0,0454 \cdot z - 0,1136) \cdot \ln(U_{padló}) + 0,0429 \cdot z^2 + 0,064 \cdot z - 0,1795 \quad (80)$$

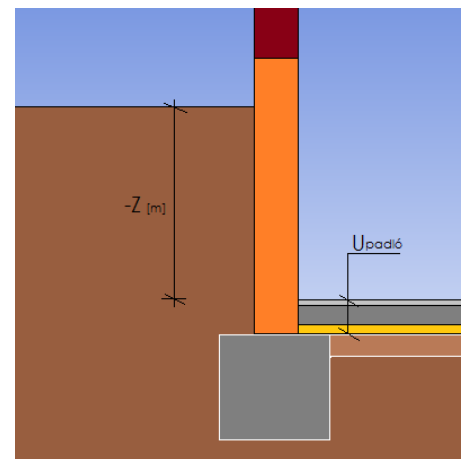
A korrekció alkalmazása gyakorlatilag elhanyagolható, ha $U_{padló} < 0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$, mivel az egyenlőtlenség teljesülése esetén a két összeadódó változtatás hatása szinte kiegyenlíti egymást. E jelenséget az 52. ábrán is láthattuk.

7.1.10.4. Padló szerkezet felépítése miatti korrekció

Az eddigi értékek minden esetben olyan padló szerkezeti modellre lettek meghatározva, ahol a hőszigetelőanyag a padlólemez és a felbeton között helyezkedett el. Azonban a padló hőszigetelését helyezhetjük a padlólemez alá is. Ez esetben azonban vastagabb padlólemez kialakítása is szükséges.

A korrekciós tényező meghatározásakor tehát a padló szerkezet legalsó rétege lesz a hőszigetelés, felette helyezkedik el az immáron 20 cm vastagságú vasalt beton padlólemez, majd erre 6 cm felbeton kerül. Az anyagtulajdonságok a vizsgálat során nem módosultak, továbbra is az MSZ EN ISO 10456:2008 szabványban szereplő, tervezési értékeket alkalmaztam.

A hőszigetelő anyag azonban a valóságban ilyen kialakítás esetén természetesen valamilyen zártcellás gyártmány, de ezek tervezési hővezetési tényezője közel azonos



56. ábra: Alsó szigetelésű padló felépítésének modellje $z = -2 \text{ m}$ esetén

az általam alkalmazott $\lambda_{\text{hőszig}} = 0,04 \text{ W/mK}$ -hez. Ennél kisebb hővezetési tényezőjű szigetelést alkalmazva a vonalmenti hőátbocsátási tényezők kis mértékben a „biztonság javára” tévednek.

Az alsó szigetelésű padló szerkezetek esetében alkalmazandó korrekciós tényezőt $z = 0,5 \text{ m} - z = -2 \text{ m}$ tartományban a következő összefüggéssel írhatjuk fel:

$$\gamma_f = (-0,0029 \cdot z - 0,0143) \cdot \ln(U_{\text{padló}}) + 0,0129 \cdot z^2 + 0,0262 \cdot z + 0,0114 \quad (81)$$

A korrekciós tényező értéke szigetelt padló szerkezetek esetében pozitív érték, a vizsgálat alapján tehát kedvezőbb közbenső szigetelésű padló szerkezetet kialakítani.

7.1.10.5. Padlóhossz változás miatti korrekció

Az alapértékek 4 m padlóhosszúsággal kerültek modellezésre az MSZ EN ISO 10211:2008 erre vonatkozó 10.4-es pontja szerint. A szabvány leírja továbbá, hogy a 4 m-nél hosszabb (vagy más geometriai értelmezés szerint szélesebb) belső padlók esetén, mely a 8 m-nél hosszabb belső padlóhosszal rendelkező épületek esetén lehetséges, a 4 m-hez tartozó értékek alkalmazhatóak.

Azonban abban az esetben, ha az épület belső értelemben véve keskenyebb, mint 8 m széles, a tényleges belső hossz felével kell elvégezni a szimulációt, hogy megkapassuk a vonalmenti hőátbocsátási tényezőt.

E miatt a kutatás során két padlóhosszúságot is megvizsgáltam, egyik esetben $l = 3 \text{ m}$, míg másik esetben $l = 2 \text{ m}$ belső padlóhosszal végeztem el a szimulációkat. Ennél kisebb méretek esetében már az épület jellege valószínűleg nem indokolja az épületenergetikai számítást, mivel egy 4 méter átlagos belső hosszal rendelkező épület is csupán 16 m^2 -es. Azonban az eredmények szempontjából érdekes, hogyan változik a vonalmenti hőátbocsátási tényező abban az esetben, ha az épület méretei kisebbek lesznek. A változás nemlineáris voltát a fal (külső fal vagy lábazati fal) és a padló csatlakozásánál kialakuló szerkezeti hőhíd jelensége okozza.

A padlóhossz $l = 4 \text{ m}$ helyett $l = 2 \text{ m}$ -es kialakítása esetében alkalmazandó korrekciós tényezőt $z = 0,5 \text{ m} - z = -2 \text{ m}$ tartományban a következő összefüggéssel írhatjuk fel:

$$\gamma_{fw,2} = (-0,0053 \cdot z^2 - 0,0123 \cdot z - 0,0554) \cdot \ln(U_{\text{padló}}) - 0,0093 \cdot z^2 - 0,0235 \cdot z - 0,2394 \quad (82)$$

míg $l = 3$ m esetében hasonló tartományban az alábbi egyenletet alkalmazhatjuk:

$$\gamma_{fw,3} = (-0,002 \cdot z - 0,0242) \cdot \ln(U_{padló}) - 0,0033 \cdot z - 0,1108 \quad (83)$$

Megfigyelhető, hogy a két eltérő padlóhossz esetében az együtthatókra illeszthető függvények is eltérnek. Ez alapján kijelenthető, hogy míg $l = 2$ m esetében még dominánsan jelen van a padló és falcsatlakozás miatti hőhíd többlet hővesztesége, s emiatt az összefüggés együtthatói nemlineárisan alakulnak, addig ez $l = 3$ m estében már kevésbé játszik szerepet, az összefüggés együtthatói pedig lineárisan közelíthetők.

7.1.10.6. További korrekciós tényezők lehetőségei

Az előbbieken bemutatott korrekciók és korrekciós tényezőkön kívül természetesen adódhatnak további hatások is, melyeket lehetőségünk van korrekciós tényezővel figyelembe venni.

Ezek vizsgálatát azonban TDK dolgozat már nem tartalmazta. Azonban példaként és említés szintjén alkalmazhatnánk akár eltérő szélesség miatti korrekciós tényezőt (melynek hatása valószínűleg nem lenne túl jelentős), figyelembe vehetnénk a külső peremfeltétel esetében a nap sugárzását a talaj felszínén, vagy akár a belső peremfeltételek esetében is elképzelhető lenne változás, melyek hatásait korrekciós tényezőkkel le tudnánk írni a táblázatos érték különbözetében. További érdekes vizsgálat lehetne, ha padlófűtési rendszert tartalmazó padlószerkezet esetén szimulálnánk a hőveszteségeket, vagy figyelembe vennénk a belső tér hőmérsékleti rétegződését is.

7.1.11. VONALMENTI HŐÁTBocsÁTÁSI TÉNYEZŐ KORRIGÁLT ÉRTÉKÉNEK SZÁMÍTÁSA

Az adott vizsgált épületek esetében tehát a helyi környezetnek és lokális tényezőknek megfelelő vonalmenti hőátbocsátási tényezőket a táblázatos érték (vagy az értékeket leíró egyenletek alkalmazása) és a lokálisan eltérő hatást leíró korrekciós tényező összege jelenti:

$$\psi_{padló} = \psi_t + \gamma_i \quad (84)$$

7.1.12. BELSŐ KERÜLET HOSSZÁNAK KORREKCIÓJA

A talajjal érintkező szerkezetek transzmissziós hőveszteség-tényezőjét úgy kapjuk meg a korrigált vonalmenti hőátbocsátási tényező felhasználásával, hogy azt megszorozzuk a szerkezet kerületével. A kerület értelmezését az új módszer esetében a belső, padló és falcsatlakozás élénél értelmezzük, ezáltal a számítás itt sem válik el attól a logikától, mely a hazai épületenergetikai rendeletet jellemzi.

A kerület számítás során azonban a pozitív sarkoknál gyakorlatilag kétszer számítunk hőveszteségeket, míg a negatív sarkok esetében egy zónát kihagyunk a számításból. Könnyen belátható például, hogy egy 32 m belső kerületi hosszal rendelkező, négyzet alapú épület esetében a hőveszteségeket a pozitív sarkoknál egymásra lapolódás miatt kétszer vesszük számításba.

E jelenség kiküszöbölésére, de a sarkokon kialakuló, a sarok háromdimenziós geometriai hőhídjának többlet hőveszteségét figyelembe veendően megállapíthatunk egy olyan korrigált belső élhosszúságot az egyes sarkok esetében, mely alkalmazásával nem becsüljük sem jelentősen túl, sem pedig alul az épület hőveszteségeit.

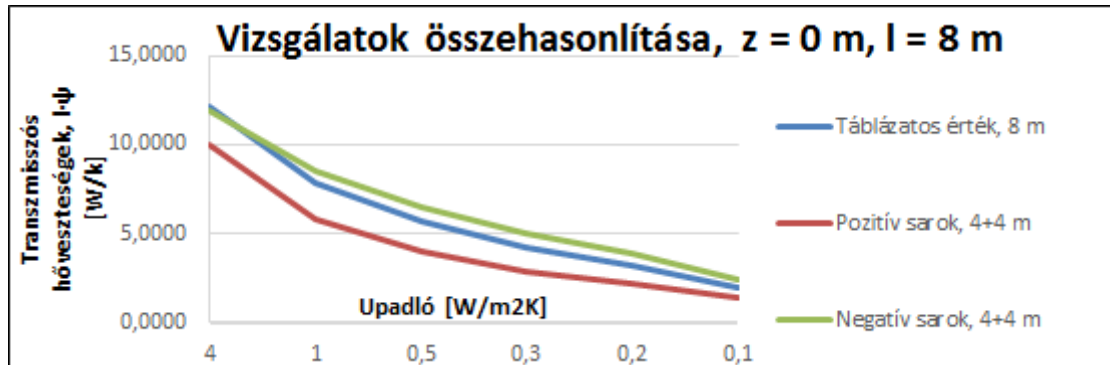
Az alábbi 27. táblázatban látható, hogy minként alakulnak a talajjal érintkező szerkezetek transzmissziós hőveszteségei $z = 0$ m esetén, ha egy azonos hosszúságú padlóél egyenes szakaszon vett 8 m, pozitív sarokban vett 8 m valamint negatív sarokban vett 8 m szerint szimuláltuk.

Vizsgálat megnevezése	l [m]	z [m]	Talajjal érintkező szerkezetek transzmissziós hőveszteségei, t_{ψ} [W/k]					
			$U_{padló}$ [W/m ² K]					
			4	1	0,5	0,3	0,2	0,1
Táblázatos érték, 8 m	8	0	12,1141	7,8626	5,6748	4,2136	3,2262	2,0008
Pozitív sarok, 4+4 m	8	0	10,0378	5,8083	3,9793	2,8831	2,2009	1,4243
Negatív sarok, 4+4 m	8	0	11,8493	8,4809	6,4745	4,9822	3,8773	2,3806

27. táblázat: Talajjal érintkező szerkezetek transzmissziós hőveszteségei a geometria függvényében

A táblázatos értékek között leginkább a pozitív sarokra és a táblázatos érték közötti különbségre figyeljünk. Abban az esetben, ha a táblázatos értéket szorozzuk meg 8 m hosszal egy pozitív sarok belső padlóélhossza szerint, $z = 0$ m esetén a padló szerkezet hőátbocsátási tényezőjének függvényében 20 % - 40 %-al becsüljük túl az ott ténylegesen kialakuló hőveszteséget. Negatív sarok esetén pedig akár 20%-al számítunk kevesebbet, mint kellett volna.

A 27. táblázatban szereplő értékeket grafikusán ábrázolva szemléletesebben láthatjuk a sarkok geometriai kialakításától függően kialakuló transzmissziós hőveszteségeket.

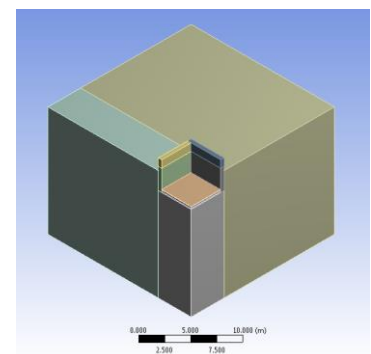


57. ábra: Transzmissziós hőveszteségek grafikusán ábrázolva

Ahhoz, hogy mindig a lehető legpontosabb eredményt kaphassuk, a legkézenfekvőbb megoldás az, hogy létrehozunk egy padlóélhossz korrekciós szorzótényezőt, mellyel a belső kerület számítása esetén az egymásra lapoló részeken (tehát alapesetben 8 m-es hosszúságon) a kerület hosszát megszorozva egy olyan csökkentett vagy negatív sarok esetén megnövelt hosszúságot fogunk kapni, mellyel figyelembe vehetjük a pozitív vagy negatív sarkok hőtechnikai hatását is.

7.1.12.1. Pozitív sarok

A korrekciós tényező előállítása az 7.1.10-es részben közöltekhez hasonló, azonban mivel ebben az esetben szorzótényező előállítását tűztem ki célul, ezért a transzmissziós hőveszteségek logaritmikus összefüggésében (a vonalmenti hőátbocsátási tényezők logaritmikus tendenciája természetesen megmarad, mivel csak egy „konstanssal” szorozzuk őket) a táblázatos érték segítségével számolt és az új, háromdimenziós geometriai modell felhasználásával számított értékek együtthatóinak hányadosát leíró egyenletet keressük. Ezt legegyszerűbben úgy kaphatjuk meg, ha a két logaritmikus egyenlet együtthatói esetében keressük az azok egyenlőségéhez szükséges harmadik egyenletet.



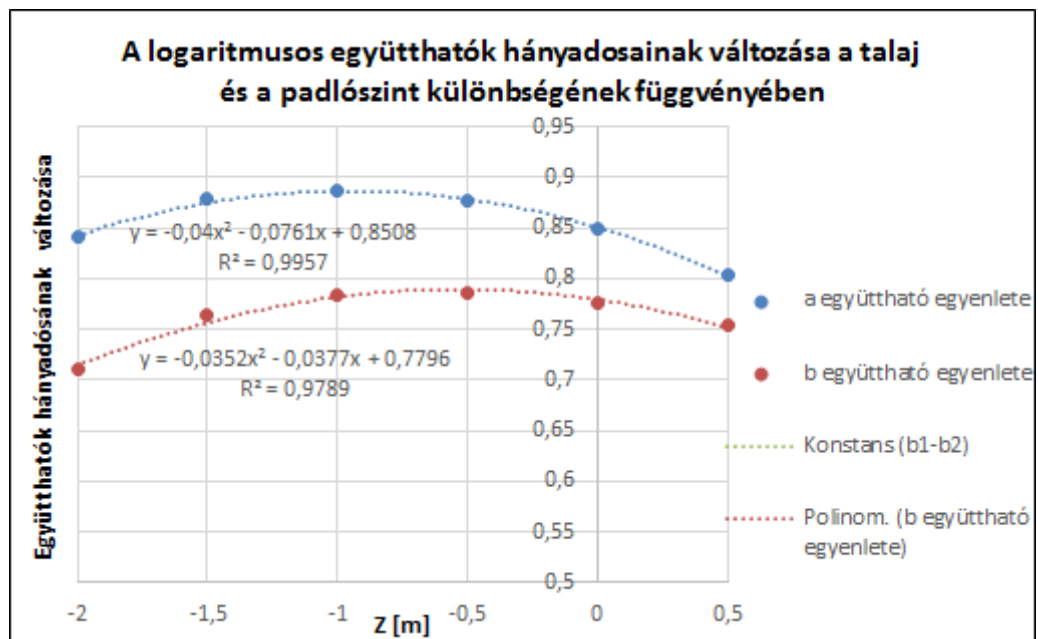
58. ábra: 8 m-es belső kerületű pozitív sarok geometriai modellje

Például a pozitív sarok transzmissziós hőveszteségeit leíró egyenlet „a” együtthatójának és a táblázatos érték „a” együtthatójának a hányadosa:

$$y = \frac{-0,3004 \cdot z^2 - 0,2144 \cdot z + 2,39}{-0,2299 \cdot z^2 - 0,0155 \cdot z + 2,8119} \quad (85)$$

mely „y” tehát megadja az adott z esetében azt a számot, mellyel szorozva a táblázatos értékkel számított transzmissziós hőveszteség logaritmikus egyenletének „a” együtthatóját megkapjuk azt az egyenletet (természetesen b együtthatót is hasonlóan a vonatkozó szorzótényezővel beszorozva), mellyel a pozitív sarok hőveszteségei írhatóak le.

Az egyes z értékek függvényében ábrázolva az együtthatók hányadosait (59. ábra) a pontokra illeszthetünk egyszerűbb, másodfokú egyenlettel leírható görbét, mely még jól közelíti az együtthatók szorzótényezőjének egyenletét.



59. ábra: Logaritmikus összefüggések hányadosainak változása

Ahhoz azonban, hogy a táblázatos értékeket leíró logaritmikus összefüggésekhez alkalmazható szorzótényezőket kapjunk, a pozitív sarok hőveszteségeit leíró egyenletet el kell osztanunk a táblázatos értékeket leíró egyenletekkel. E lépések miatt egy igen hosszú képlettel tudjuk majd csak felírni a korrekciós szorzótényezőt és mivel

a táblázatos érték esetében két egyenletet kell alkalmaznunk a z értékétől függően, ez a korrekciós szorzótényező esetében is hasonlóan fog alakulni.

Az összefüggés, amellyel megkapjuk „ $\gamma_{c,p}$ ” kerületi hossz korrekciós szorzótényezőt pozitív, 8 m-es belső élhosszúságú sarok esetében a következő:

Ha $z < 0,25$ m, akkor:

$$\gamma_{c,p} = [(-0,04 \cdot z^2 - 0,0761 + 0,8508) \cdot (0,0169 \cdot z^2 + 0,0949 \cdot z + 0,3623) \cdot \ln(U_{padló}) + (-0,0352 \cdot z^2 - 0,0377 \cdot z + 0,7796) \cdot (0,0138 \cdot z^2 + 0,2408 \cdot z + 0,9978)] / [(0,0169 \cdot z^2 + 0,0949 \cdot z + 0,3623) \cdot \ln(U_{padló}) + (0,0138 \cdot z^2 + 0,2408 \cdot z + 0,9978)] \quad (86)$$

Ha $z \geq 0,25$ m, akkor:

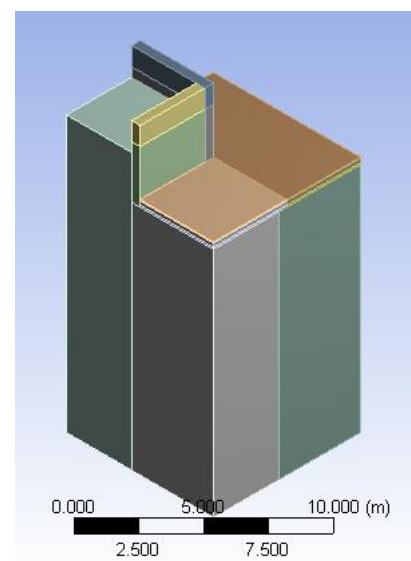
$$\gamma_{c,p} = [(-0,04 \cdot z^2 - 0,0761 + 0,8508) \cdot (0,3027 \cdot z^{-0,216}) \cdot \ln(U_{padló}) + (-0,0352 \cdot z^2 - 0,0377 \cdot z + 0,7796) \cdot (0,899 \cdot z^{-0,151})] / [0,3027 \cdot z^{-0,216} \cdot \ln(U_{padló}) + 0,899 \cdot z^{-0,151}] \quad (87)$$

7.1.12.2. Negatív sarok

Az általános és egyszerűbb épületformák a pozitív sarok korrekciós tényezőjének ismeretében már számíthatóak, azonban az összetettebb formákhoz, legyen az L vagy akár U alakú, a negatív sarok okozta többlet hőveszteségek ismerete szükséges.

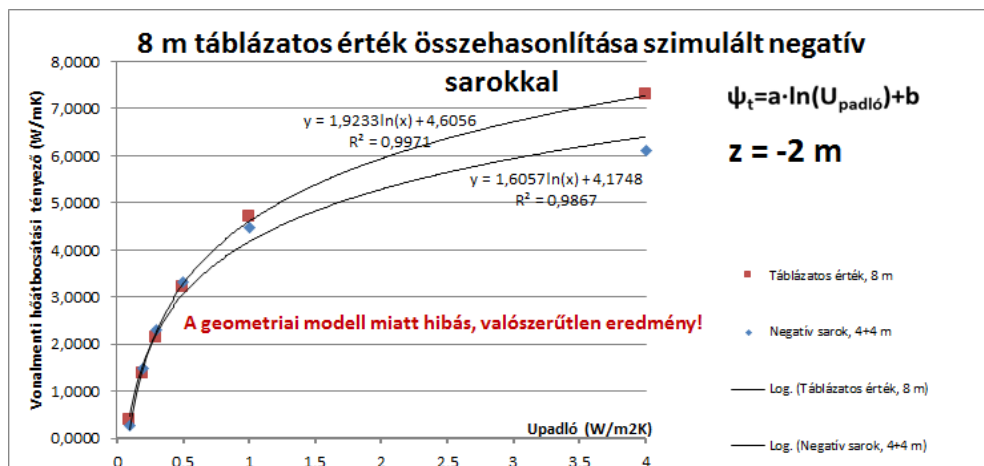
Míg a pozitív sarkok esetében ha a belső padlóél hosszával számoltunk, úgy több hőveszteséget számítottunk az átlapolás miatt, addig a negatív sarok esetében a padlófelület kétharmadát vesszük csak figyelembe, s kevesebb hőveszteséget számítunk.

Azonban a negatív sarok modellezése a 60-as ábrán látható módon nem alkalmas arra, hogy a korrekciós szorzót létrehozzuk, mivel a külső oldalon lévő talajból túl kis részt tudunk a modellen figyelembe venni. Ez a modell pedig fűtött pince esetén már olyan anomáliához vezet, hogy a negatív sarok hővesztesége a korrigálatlan táblázatos érték alatt



60. ábra: 8 m-es belső kerületű negatív sarok geometriai modellje

marad (lásd 65. ábra), amely pedig nem lehet valóságos eredmény.



61. ábra: Negatív sarok hőveszteségeinek hibája

Ahhoz, hogy a negatív sarkok hatását szimulálni tudjuk, vagy rendkívül, ezzel együtt irreális modellt kellene építeni, ahol a belső padlóél mindkét irányban legalább 15-20 méter hosszú, vagy az épületet teljes egészében lenne szükséges felépíteni. Ezeknek a modelleknek a megoldására azonban a kutatásban már nem kerül sor.

7.2. A számítás menete

7.2.1. PINCEFAL JELLEMZŐ HŐÁTBOSZTÁSI TÉNYEZŐJÉNEK SZÁMÍTÁSA

Mivel a 49-es táblázatban látható értékek a 1246/2012. Korm. határozat 0,3 W/m²K-es követelményértékét alkalmazva lettek számítva, majd a vonalmenti hőátbocsátási tényezőkből ez az érték kivonásra került. Fűtött pincék hőveszteségeinek számításakor azonban szükséges, hogy a pincefal hőveszteségeit is ismerjük, amihez a pincefal jellemző hőátbocsátási tényezőjének ismeretére van szükség. Ezt a pincefal szerkezeti hőátbocsátási tényezőjének, a szimulált 0,3 W/m²K-es pincefalnak a szerkezeti és a tényleges, ám stacioner állapotban¹² számított (de a föld ellenállását már tartalmazó) hőátbocsátási tényezője valamint az adott pincefal tényleges hővezetési ellenállásával számított stacioner hőátbocsátási tényezőnek a kombinációja. Ez utóbbi

¹² Stacioner állapotot a pincefal hőátbocsátási tényezőjének meghatározására a 47. ábrán láthatóak miatt van lehetőség. A dolgozat 22. és 23-as táblázatában továbbá látható, hogy a falak hőveszteségei közel azonosak tranziens és stacioner VDM szimulációk esetén, ezzel is bizonyítva, hogy a pincefalak esetében a stacioner modellezés megengedhető.

számításához Latta és Boileau [1969] elméletét használtam, azaz a pincefal melletti talaj ellenállását a talaj külső szintjéig vezetett negyedkör mentén vettem figyelembe. A pincefal szerkezeti hőátbocsátási tényezője nagyobb, mint a tényleges, mivel a szerkezeti esetén a föld ellenállását nem vesszük figyelembe, azonban a képletben azért szerepel, hogy a tényleges pincefal és padlószerkezet csatlakozásánál kialakuló hőhíd miatti többlethővesztést közelíteni tudjuk.

Az alkalmazandó egyenlet tehát a következő:

$$U'_{pincefal} = \frac{U_{pincefal} + 0,3 - \frac{1}{\frac{1}{0,3} + \frac{\pi \cdot |z|}{2 \cdot \lambda_{talaj}}} + \frac{1}{\frac{1}{U_{pincefal}} + \frac{\pi \cdot |z|}{2 \cdot \lambda_{talaj}}}}{2} \quad \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (88)$$

ahol $|z|$ a padlószint és a talajszint különbsége pozitív értékkel. Az egyenletet a konstans tagok egyszerűsítése, a talaj 2,0 W/m²K-es hővezetési tényezőjének beírása és átrendezés után az alábbi formában javaslok alkalmazni:

$$U'_{pincefal} = 0,5 \cdot \left(0,3 + U_{pincefal} + \frac{1}{\frac{1}{U_{pincefal}} + 0,39 \cdot |z|} - \frac{1}{3,33 + 0,39 \cdot |z|} \right) \quad (89)$$

7.2.2. TALAJJAL ÉRINTKEZŐ SZERKEZETEK HŐVESZESÉGE

A transzmissziós hővesztéseket a következő képlet segítségével számíthatjuk:

$$H_g = \sum (\psi_{padló} + \psi_e) \cdot \gamma_{c,i} \cdot l_i + l_l \cdot |z| \cdot U'_{pincefal} \quad \left[\frac{W}{K} \right] \quad (90)$$

ahol „ $\psi_{padló}$ ” meghatározható a 49-es ábrán szereplő táblázat vagy a (76) és (77)-es egyenlet alkalmazásával, a megfelelő lokális környezetre jellemző korrekciós tényező hozzáadásával. A padló kerülete mentén elhelyezett hőszigetelő sáv hatását „ ψ_e ” hozzáadásával vehetjük figyelembe, melyet a dolgozat 4.6.4.3. pontja szerint számíthatunk. Geometriai változás esetén, például az épület sarkainak környezetében a belső padló „ l_i ” élhosszúságát korrigálni kell „ $\gamma_{c,i}$ ” korrekciós szorzótényezővel. Zavartalan egyenes szakaszon $\gamma_{c,i} = 1,0$.

8. TALAJJAL ÉRINTKEZŐ SZERKEZETEK HŐVESZTESÉGEIT SZÁMÍTÓ SZOFTVER BEMUTATÁSA

8.1. A szoftver leírása

Az előző fejezetben olvasható összefüggések létrehozásakor nyilvánvalóvá vált az a tény, hogy egy kerületi hossz korrekció kézi számítását a legkevésbé sem lehet elvárni a számítási eljárást alkalmazó épületenergetikusoktól. Szükség van egy olyan, egyszerűen kezelhető alkalmazásra, melyet a lehető legtöbben tudnak futtatni, és az egyenletek és a számítási módszer jó algoritmizálhatósága végett a szoftver számítja helyettük a pontosabb eredményeket.

A programot „Microsoft Excel 2013”-ban készítettem, a számításokat VBA makrók alkalmazásával oldottam meg. Az Excel alkalmazása azért célszerű, mert a potenciális felhasználó közönség nagy valószínűséggel alkalmaz valamilyen táblázatkezelő szoftvert a számítógépén. Azonban az Excel révén nem csupán a személyi számítógépeken futtathatjuk a számító programot, hanem akár okostelefonokon vagy táblaszámítógépeken is. Az eszközökön futó különböző operációs rendszerek sem jelentenek problémát, mivel gyakorlatilag az összes elterjedt platformra létezik már makrókat tartalmazó táblázatokat megnyitni képes táblázatkezelő szoftver.

Ez tehát egy „szoftver a szoftverben”, mely alapján azonban akár a meglévő épületenergetikai szoftverekbe, akár új számító szoftverekbe lehet integrálni a talajjal érintkező padlószerkezetek tranziens hőtechnikai szimulációján alapuló számítási eljárást. Az alkalmazás rendszerkövetelményei megegyeznek a táblázatkezelő szoftverek követelményeivel.

Az alkalmazás beépített hőátbocsátási tényező számító táblázattal készült, ezáltal a teljes folyamatot, mely a vonalmenti hőátbocsátási tényező illetve a vonalmenti transzmisszió hőveszteségtényező megkapásához vezet, elvégezhetjük benne.

A számítások során a program a dolgozatban is szereplő és a számítási módszerhez kapcsolódó, a szimulációs eredményeket közelítő egyenletek alapján számol, emiatt eredményei kis mértékben eltérhetnek a közvetlenül a 49-es ábrán szereplő táblázatról leolvasható eredményekről, azonban köztes, a táblázatban szereplő értékeket akár pontosabban is visszaadhat, mint a táblázat esetén szükségszerűen alkalmazandó bilineáris interpolációs eljárás (melyet valószínűleg kevesen végeznének el szívesen).

8.2. A kezelőfelület

Talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségtényezője

Számítás rendben!

Talajon fekvő padló hőátbocsátási tényezője

Réteg	Anyag neve	Vastagság [cm]	Hővezetési tényező [W/mK]	Hővezetési ellenállás [m²K/W]
R _{si}	Belső fűtött levegő, 20 °C	-	-	0,17
1	Felbeton	6	1,35	0,04
2	Hőszigetelés	20	0,04	5,00
3	Aljzatbeton	10	2,3	0,04
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

Adatok és korrekciók megadása

Talajon fekvő padló szerkezet és Z [m] értelmezése

Z értéke +3 m és -3 méter között tetszőlegesen megadható.

Padló kerülete mentén elhelyezett hőszigetelő sáv:

Hőszigetelő sáv hossza (D): m

Hőszigetelő sáv vastagsága (d_n): cm

Hőszigetelő sáv anyaga (λ): W/mK

Padló melletti fal vastagsága (w): cm

U_{padló} W/m²K

Követelményértéknek

U_{pincefal}: W/m²K

Padlóél belső kerülete (l): m

A külső talajszint és a belső padló felső síkja közötti távolság (z): m

Vonalmenti hőátbocsátási tényező korrekciói (γ_i):

Belső padlóélhossz többdimenziós hatások miatti korrekciója (γ_{r,n}):

SZÁMÍTÁS
TÖRÖL

Talajjal érintkező szerkezetek hővesztesége:

ψ_t számított [W/mK]	γ_i [W/mK]	Hőveszteségtényező, H _g [W/K]
0,1728	0,0000	26,4879
ψ_e [W/mK]	$\psi_{padló}$ [W/mK]	
-0,0143	0,1728	
$\gamma_{c,p}$ [-]	U' _{pincefal} [W/m²K]	
0,4172	0,3808	

$H_g = \sum (\psi_{t, számított} + \gamma_i + \psi_e) \cdot \gamma_{c,p} \cdot l_i + l_i \cdot |z| \cdot U'_{pincefal}$

© 2013 NAGY Balázs BME-MET

62. ábra: Talajjal érintkező szerkezetek vonalmenti hőátbocsátási tényezőjét számító szoftver

8.2.1. HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐ SZÁMÍTÁSA

A szoftverben lehetőség van a padlószerkezet hőátbocsátási tényezőjének számítására, abban az esetben, ha a belső levegő állandó 20 °C-os. A peremfeltételt az MSZ EN ISO 6946:2008 alapján határoztam meg. Ez egyben a módszerrel való kompatibilitást is hivatott biztosítani. A padló maximálisan 10 rétegből állhat, melyeknek tartalmazniuk kell a hőtechnikailag releváns összes épített réteget. Az anyagokat nevük, cm-ben mért vastagságuk és hővezetési tényezőjük alapján számíthatjuk, azonban lehetőség van közvetlenül a hővezetési ellenállás megadására is, vagy akár kombinált megadási módra is.

Talajon fekvő padló hőátbocsátási tényezője				
Réteg	Anyag neve	Vastagság [cm]	Hővezetési tényező [W/mK]	Hővezetési ellenállás [m²K/W]
R _{si}	Belső fűtött levegő, 20 °C	-	-	0,17
1	Felbeton	6	1,35	
2	Hőszigetelés	20	0,04	
3	Aljzatbeton	10	2,3	
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				

63. ábra: Hőátbocsátási tényező számítása

8.2.2. ADATOK MEGADÁSA ÉS A KÖVETELMÉNYEK KIVÁLASZTÁSA

Abban az esetben, ha a padlószerkezet hőátbocsátási tényezőjét számítás helyett magunk szeretnénk megadni, az adatok megadásánál választhatjuk a „megadott” $U_{\text{padló}}$ opciót, mely esetében közvetlenül megadhatjuk az alkalmazni kívánt értéket (Ezt választva a hőátbocsátási tényezőt számító táblázat el is sötétül).

Lehetőségünk van továbbá a hőátbocsátási tényező értékét ellenőriztetni a szoftverrel, hogy megfelel-e a 7/2006 TNM Rendelet vagy akár a 1246/2013. Korm. határozat követelményértékeinek.

$U_{\text{padló}}$	Számított	0,19	W/m²K
Követelményértéknek	7/2006. TNM Rend.	Megfelel	
U_{pincefal}	7/2006. TNM Rend.		
	1246/2013. Korm. Hat.	0,40	W/m²K
Padlóél belső kerülete (l):	32,00	m	
A külső talajszint és a belső padló felső síkja közötti távolság (z):	-2,00	m	

64. ábra: Adatok megadása és követelményértékek kiválasztása

Ugyancsak ebben a keretben adhatjuk meg a pincefal „szerkezeti” hőátbocsátási tényezőjét, valamint itt adhatjuk meg a padlóél belső kerületének hosszát, és a külső talajszint valamint a belső padló felső síkja közötti „z” távolságot is, mely értelmezését ábra is segíti. Ha a „z” érték nemnegatív, azaz nincs talajjal érintkező „pincefal”, a program a pincefal megadási helyét elsötétíti.

8.2.3. KORREKCIÓS KÖRÜLMÉNYEK BEÁLLÍTÁSA

Az alapvető adatok megadása után a program már képes arra, hogy korrekciók nélkül megadja a vonalmenti hőátbocsátási tényezőt vagy a vonalmenti hőveszteségtényező értékét. A korrekciók alkalmazásával azonban pontosabb eredményeket kaphatunk.

A korrekciókat legördülő menüből választhatjuk ki. Belső padlóélhossz korrekciót azonban csak abban az esetben alkalmazhatunk, ha a vonalmenti hőátbocsátási tényezőt nem korrigáljuk, illetve téglalap alakú padlószerkezettel rendelkező épületet számítunk, mivel egyéb lehetőségekre nem terjed ki a jelen kutatás.

65. ábra: Korrekciós tényezők beállítása

8.2.4. PADLÓ KERÜLETE MENTÉN ELHELYEZETT HŐSZIGETELŐ SÁV FIGYELEMBEVÉTELE

A hőszigetelő sáv hőveszteségcsökkentő hatását a szoftver az MSZ EN ISO 13370:2008 mellékletében szereplő számítások integrálásával biztosítja. A hőszigetelő

66. ábra: Hőszigetelő sáv figyelembevétel

sáv hosszának és vastagságának megadásával, a hőszigetelés anyagának definiálásával valamint a padló melletti falvastagság ismeretében a hőszigetelő sáv vonalmenti hőátbocsátási tényezője számítható. Ez az érték negatív, mivel mind a vízszintesen, mind pedig az alaptest mellett függőlegesen elhelyezett hőszige-

telés csökkenti a talajjal érintkező szerkezetek esetében a hőveszteségeket. A hőszigetelő sáv által kiszorított talaj hővezetési tényezőjét a szoftver a korrekciós körülmények figyelembevételével automatikusan állítja.

8.2.5. A SZÁMÍTÁS ELVÉGZÉSE ÉS EREDMÉNYEK

A számítás elvégzéséhez a korrekciók opcionális beállítása után a „SZÁMÍTÁS” gombra kell kattintani. Az eredmények ezután válnak láthatóvá. A számított eredményeket a „TÖRÖL” gomb segítségével törölhetjük.

A számítás során a szoftver elvégzi a hőátbocsátási tényező számítását és a követelményértékkel történő összehasonlítását, valamint a megadott adatok és korrekciók alkalmazásával számítja a vonalmenti hőátbocsátási tényezőt, a hőszigetelő sáv hatását leíró vonalmenti hőátbocsátási tényezőt és a hőveszteségtényezőt. Az eredmények a szürke cellákban jelennek meg.

Talajjal érintkező szerkezetek hővesztesége:		
$\psi_{t, számított}$ [W/mK]	γ_i [W/mK]	Hőveszteségtényező, H_g [W/K] $H_g = \sum (\psi_{t, számított} + \gamma_i + \psi_e) \cdot \gamma_{c,p} \cdot l_i + l_i \cdot z \cdot U'_{pincefal}$
0,1728	0,0000	
ψ_e [W/mK]	$\psi_{padló}$ [W/mK]	
-0,0143	0,1728	
$\gamma_{c,p}$ [-]	$U'_{pincefal}$ [W/m ² K]	26,4879
0,4172	0,3808	

67. ábra: Eredmények

8.2.6. A SZOFTVER ELLENŐRZŐ FUNKCIÓI

A szoftverbe bevitt adatok valóság-tartalma illetve alkalmazhatósága ellenőrzésre kerül. Amennyiben a felhasználó valótlán adatokat adna meg, az adott cella piros színűre változik. Ilyen valótlán adatnak számít például a hőátbocsátási tényezők számítása esetén megadott nulla, vagy

$U_{padló}$	Megadott	-2,00	W/m ² K
Követelményértéknek	7/2006. TNM Rend.		
$U_{pincefal}$			
Padlóél belső kerülete (l):		-2,00	m
A külső talajszint és a belső padló felső síkja közötti távolság (z):		8,00	m

68. ábra: Adatok ellenőrzése

negatív értékű vastagság, hővezetési tényező vagy hővezetési ellenállás. Továbbá a nem pozitív megadott hőátbocsátási tényező, a zérus vagy negatív padlóél kerület is.

A „z” értékének megadását a szoftver a számítási módszer miatt -3 m és +3 m között engedélyezi, a korrekciók alkalmazására -2 m és +0,5 m között van lehetőség, a további esetekben a legördülő menüben a „Nem meghatározott” felirat olvasható.

Az épület padlóját a szoftver alapvetően téglalap alakúnak feltételezi, így a 28 m-nél kisebb kerülettel rendelkező épületek esetén szintén nem elérhető a padlóélhossz korrekció (ezen épületek nettó alapterülete nem is lehetne 50 m² felett). Egyéb esetekben a szoftver 4 sarkot feltételez, melyekre alkalmazza a sarok korrekciós szorzótényezőjét, a maradék kerületi hosszat pedig a korrigálatlan értékkel számítja, így a felhasználónak nem kell az egyes hosszakat külön figyelembe véve számítania.

8.3. A szoftver futása és eredményei

A szoftver a már említett módon, a „SZÁMÍTÁS” gombra történő kattintással fut le, az eredmények megegyeznek az összefüggések kézi számítása esetén kapható eredményekkel. A program alkalmazása célszerű, mivel a beépített ellenőrző funkciók révén figyelmeztet, illetve nem engedi a nem megfelelő korrekciók alkalmazását.

Az alkalmazással történő számítás természetesen lényegesen gyorsabb és egyszerűbb a kézi számításnál, így felhasználása a módszer esetében javasolt.

9. EREDMÉNYEK ÖSSZEHAISONLÍTÁSA

A dolgozat 6. fejezetében bemutatott tranziens VDM szimulációk eredményeit az ugyanabban a fejezetben szereplő stacioner szimulációkkal, valamint a 40/2012. BM Rendelettel módosított 7/2006. TNM Rendelet, az MSZ EN ISO 13370:2008 szabvány és az előző két fejezetben bemutatott saját közelítő eljárással számított eredményekkel hasonlítom össze.

9.1. 7/2006 TNM Rendelettel számított eredmények

A 6. fejezetben vizsgált 10 modell hőveszteségeit a 40/2012. BM Rendelettel módosított (bővített) 7/2006. TNM Rendelet táblázataival számítva az alábbi táblázatban foglaltam össze.

Modell	Padló kerülete $l_{\text{padló}}$ m	Mélység padló felső síkjáig z m	Padló hővezetési ellenállása R_f $\text{m}^2\text{K/w}$	Pincefal hővezetési tényezője U_w $\text{m}^2\text{K/w}$	Talajon fekvő padló vonalmenti hőátbocsátási tényezője $\psi_{\text{padló}}$ W/mK	Pincefal vonalmenti hőátbocsátási tényezője ψ_{pincefal} $\text{W/m}^2\text{K}$	Talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségei H_g W/K
1	1	0,00	3,33		0,7		0,7
2	1	-2,00	3,33	0,3	0,7	0,55	1,25
3	1	-2,00	1,25	0,8	1,05	0,85	1,9
4	1	0,00	3,33		0,7		0,7
5	1	-2,00	3,33	0,3	0,7	0,55	1,25
6	32	0,00	3,33		0,7		22,4
7	32	-2,00	3,33	0,30	0,7	0,55	40
8	32	-2,00	1,25	0,80	1,05	0,85	60,8
9	48	0,00	3,33		0,7		33,6
10	48	2,00	3,33	0,30	0,7	0,55	60

28. táblázat: 7/2006. TNM Rendelet szerinti eredmények

Az 1-5 modell esetében a hőveszteség értékek egységnyi padlóhosszra vonatkoznak. A padló területét a belső méretek szerint alkalmaztam.

9.2. MSZ EN ISO 13370:2008 szabvány szerint számított eredmények

A szabvány szerinti számítás nem végezhető el egységnyi padlóhossz esetén, mert a B' segédmenyiség megkapásához szükséges a padló területének és kerületének ismerete. Emiatt a jelenleg szabványos számítási eljárással a 6-10 modelleket vizsgálhatjuk csak. Nem értelmezhető továbbá a szabvány esetén a vonalmenti hőátbocsátási tényező, mivel a módszer felületek hőveszteségeit számítja ki, így a későbbiekben az összehasonlítások során a hőveszteségeket tudjuk majd egymáshoz viszonyítani. Az eredményeket ezúttal is táblázatosan számítottam, a hőveszteségek és a számításhoz szükséges segédmenyiségek az alábbi táblázatokban láthatóak.

Modell	Padló terület A m	Padló kerülete P m	Mélység padló felső síkjáig z m	Talaj hővezetési tényezője λ W/mK	Külső fal vastagsága w m	Padló hővezetési ellenállása R_f m ² K/w	Pincefal hővezetési ellenállása R_w m ² K/w
6	64,00	32,00	0,00	2,00	0,46	3,33	3,33
7	64,00	32,00	-2,00	2,00	0,46	3,33	3,33
8	64,00	32,00	-2,00	2,00	0,40	1,25	1,67
9	128,00	48,00	0,00	2,00	0,46	3,33	3,33
10	128,00	48,00	-2,00	2,00	0,46	3,33	3,33

29. táblázat: Szabványos számításhoz szükséges adatok

Modell	B' segédmenyiség B' [-]	Egyenértékű padlóvastagság d_t m	Egyenértékű falvastagság d_w m	Hővezetési tényezők			Talajjal érintkező szerkezetek hővesztesége H_g W/K
				Padló U_f W/m ² K	Pincefal U_{bf} W/m ² K	Pincefal U_{bw} W/m ² K	
6	4	7,47		0,22			13,77
7	4	7,47	7,01		0,19	0,22	26,70
8	4	3,24	4,08		0,33	0,33	42,37
9	5	7,47		0,20			25,85
10	5	7,47	7,47		0,18	0,21	43,70

30. táblázat: Szabványos számítás eredményei

9.3. Tranziens modellezésen alapuló táblázatos módszer szerinti eredmények

A modellek hőveszteségeit a 2013. novemberi TDK-n bemutatott számítási módszerrel is meghatároztam. A talajon fekvő padló vonalmenti hőátbocsátási tényezőit a 49-es táblázat segítségével határoztam meg. A 4-5 modellek esetében környezeti korrekció alkalmazása szükséges, mivel a külső éves átlagos középhőmérséklet alapján a padló a II. éghajlati zónában helyezkedik el. A növelő tényezőket a (78)-as összefüggés segítségével számítottam. A 6-10 modellek esetében a többdimenziós hatások miatt kellett korrigálni a padló területének hosszát. A 6-os és 9-es modellhez a (86)-os összefüggést, a 7-8 és 10-es modell esetében pedig a (87)-es összefüggést alkalmazhatjuk. A korrekciós szorzókat mindkét esetben a 4 db sarok 4+4 méteres szakaszán, azaz összesen a terület mentén 32 m-ig alkalmazzuk. A pincefalak jellemző hővezetési tényezőjét a (89)-es egyenlettel határoztam meg.

A talajjal érintkező szerkezetek hőveszteségei, melyeket a (90)-es egyenlet segítségével táblázatosan számítottam, a következők:

Modell	Padló kerülete $l_{\text{padló}}$ m	Mélység padló felső síkjáig z m	Hővezetési tényezők			Talajon fekvő padló vonalmenti hőátbocsátási tényezője $\psi_{\text{padló}}$ W/mK	Környezeti hatások miatti korrekció (éghajlati zóna) γ_{mt} W/mK	Padló-hossz korrekció (pozitív sarok) $\gamma_{\text{c,p}}$ [-]	Talajjal érintkező szerkezetek hővesztesége H_g W/K
			Padló $U_{\text{padló}}$ W/m ² K	Pincefal U_{pincefal} W/m ² K	Jellemző Pincefal U'_{pincefal} W/m ² K				
1	1	0,00	0,3			0,53		1,0000	0,53
2	1	-2,00	0,3	0,3	0,300	0,27		1,0000	0,87
3	1	-2,00	0,8	0,6	0,533	0,526		1,0000	1,59
4	1	0,00	0,3			0,53	0,0584	1,0000	0,53
5	1	-2,00	0,3	0,3	0,300	0,27	0,0716	1,0000	0,94
6	32	0,00	0,3			0,53		0,7243	12,28
7	32	-2,00	0,3	0,3	0,300	0,27		0,5823	24,22
8	32	-2,00	0,8	0,6	0,533	0,526		0,7009	45,89
9	48	0,00	0,3			0,53		0,7243	20,76
10	48	-2,00	0,3	0,3	0,300	0,27		0,5823	36,34

31. táblázat: Tranziens modellezésen alapuló táblázatos módszer eredményei

9.4. Az eredmények összehasonlítása stacioner és tranziens VDM szimulációval

A dolgozat második felében található hőveszteség számítások eredményeit az alábbi, 32-es táblázatban foglaltam össze.

Modell	7/2006. TNM	MSZ EN ISO Szabvány	Tranziens TDK módszer	Stacioner VDM	Tranziens VDM
	H_g W/K	H_g W/K	H_g W/K	H_g W/K	H_g W/K
1	0,70	-	0,53	0,68	0,50
2	1,25	-	0,87	1,06	0,88
3	1,90	-	1,59	1,84	1,56
4	0,70	-	0,59	0,74	0,56
5	1,25	-	0,94	1,13	0,96
6	22,40	13,77	12,28	13,09	10,04
7	40,00	26,70	24,23	27,65	23,19
8	60,80	42,37	45,49	52,34	44,41
9	33,60	25,85	20,76	23,80	18,20
10	60,00	43,70	36,34	44,52	37,52

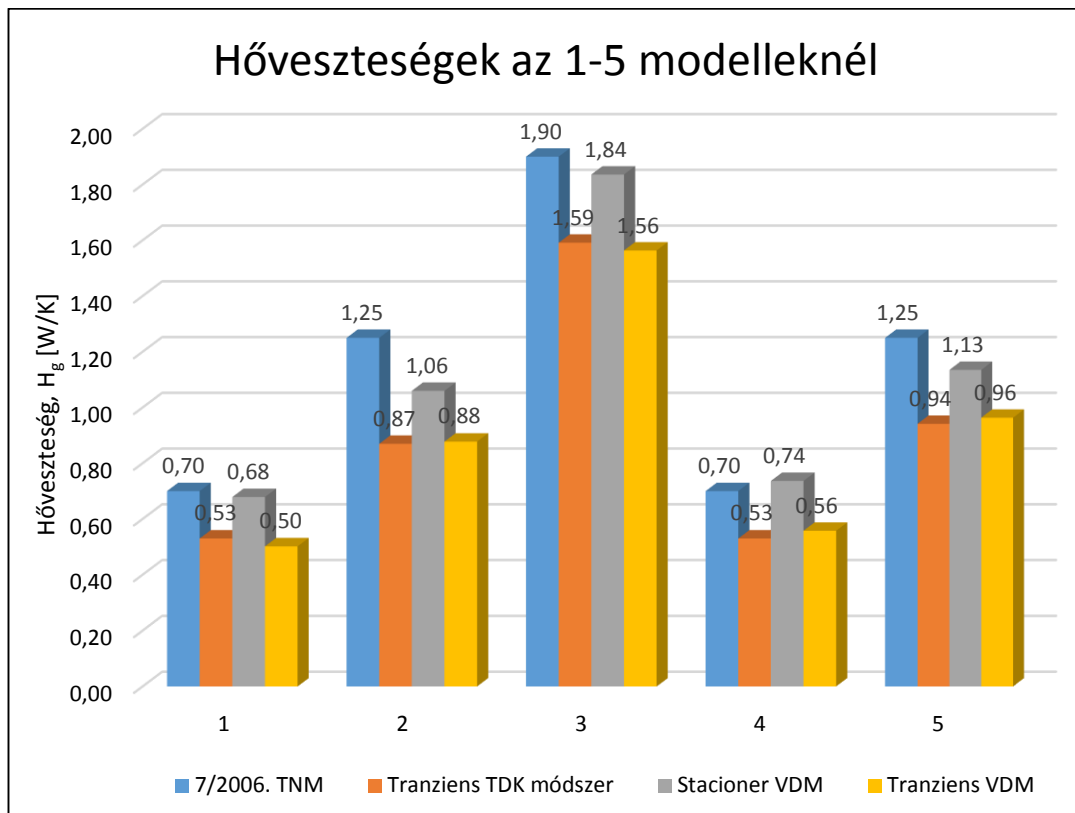
32. táblázat: Eredmények összefoglalva

Az összefoglaló táblázatban látható, hogy a 7/2006. TNM Rendelet táblázatos módszere az egységnyi hosszra vonatkozó 1-5 modellek esetében a stacioner VDM szimuláció eredményeihez áll a legközelebb, a tranziens módszerekénél 21,8 % - 42,05 %-al ad nagyobb hőveszteséget és minden esetben a legnagyobb értékeket produkálta.

A diplomamunka 7. fejezetében is bemutatott tranziens közelítő módszer minden esetben a legközelebbi és legpontosabb eredményt adta a tranziens szimulációhoz viszonyítva, melyet az összehasonlítás során a pontos megoldásnak tekintek. Az 1-5 modellek esetében a relatív hiba a tranziens TDK módszer és a tranziens VDM szimulációk között 1 % és 6 % közötti. A TDK módszer a 2-es és 5-ös modell esetén 0,01 és 0,02 W/K-el becsült kevesebb hőveszteséget a szimulálnál, a többi modell esetében nagyobb értékeket kaptam, melyek „a biztonság javára” közelítenek.

A 32. táblázatban látható eredmények alapján az 1-5 modell eredményeit vizsgálva kijelenthető, hogy a tranziens végesdifferencia módszert alkalmazó, Heat3 szoftverrel szimulált értékekhez a tranziens TDK módszer eredményei álltak a legközelebb.

mely állítást a következő 69. ábrán, oszlopdiagramokon keresztül is megismerhetünk.



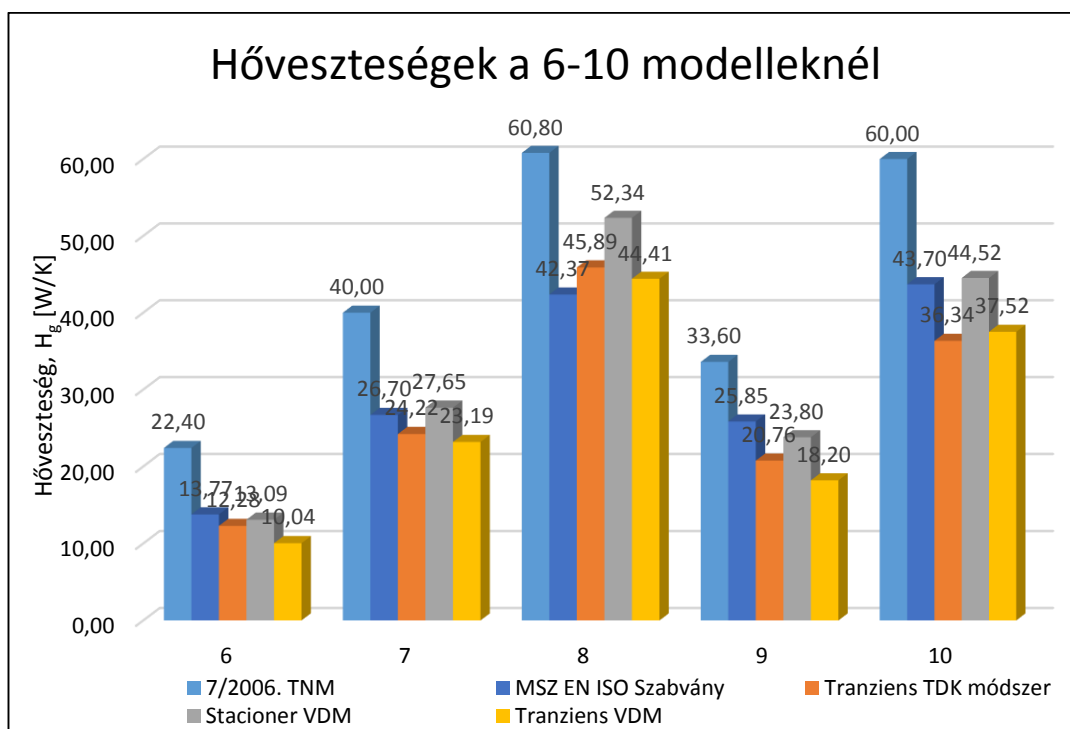
69. ábra: Hőveszteségek az 1-5 modellek esetében

A 7/2006. TNM számítási módszere a 6-10 modelleknél minden esetben a legnagyobb hőveszteségeket adta, a 6-os modell esetén 123%-os pozitíveltéréssel, ami rendkívül nagy pontatlanságnak mondható. A jelenleg érvényben lévő rendelet számítási módszere egyik modell esetében sem került még 30%-os hiba alá sem, a legkisebb eltérés a 8-as modell esetében 36,9 %-os, azaz a módszer nem tudja kezelni az épületek geometriai formájából adódó hőveszteség változást, és az egységnyi hosszra vonatkozó értékeknél nagyobb hibával közelíti a valósághoz közeli tranziens szimuláció eredményeit.

Az MSZ EN ISO 13370:2008 jelenleg is érvényben lévő szabványos számítási eljárás a 6-8-as modellek esetében közel tudott kerülni a tranziens módszerek eredményeihez, azonban a 9-10-es modellek esetében nagyobb hibákat kaptam. A módszer az eredmények alapján a négyzetes alapú épületek hőveszteségeinek számítására lett kidolgozva, a téglalapforma esetében az eredmények a stacioner VDM szimulációkhoz

állnak közel. Amennyiben a két jelenlegi szabványos módszer között kell állást foglalni, a harmonizált európai uniós szabványok eredményei közelebb állnak a tranziens szimuláció eredményeihez, így e módszer alkalmazása javasolt.

Azonban mind a 32. táblázat értékeiből, mind pedig az alábbi 70-es ábra diagramjaiból látszik, hogy a tranziens TDK módszer eredményei a 6-10 modell esetében is a legjobb közelítést adták, mind a négyzet alapú, mind pedig a 8 m x 16 m belső méretekkel rendelkező téglalap alapú épület esetén.



70. ábra: Hővesztések a 6-10 modellek esetében

A 10-es modell esetében az eltérés –3,14 %-os, ennél a modellenél a közelítő módszer alulbecsli a hővesztéseket, míg a többi esetben a biztonság javára közelít. A legnagyobb eltérést ez esetben a 6-os modellenél tapasztaljuk, mely 22,31 %-os relatív hibát ad a tranziens szimulációhoz képest. Ez jelentős hiba, azonban a vizsgált módszerek közül ez esetben is a legkisebb. A 70-es ábrán látható, hogy a stacioner és a tranziens VDM módszerek eredményei között is jelentős az eltérés, mely a 6.3-as pontban bemutatott 22 és 23-as táblázat alapján elsősorban a padlószerkezet hővesztéseinek eltéréseiből adódik.

A vizsgált 10 modell alapján a tranziens VDM szimuláció eredményeit a legkisebb hibákkal a 2013. novemberi TDK-ban bemutatott tranziens közelítő módszer adta vissza.

10. ÖSSZEGZÉS

A diplomamunka írása közbeni megállapításokat és eredményeket, az ezekre épülő javaslatokat a következő pontokban foglalom össze. A talajvizsgálatok alapján a következő megállapításokat tettem:

- A nemzetközi szakirodalomban található talajok hővezetési tényezőinek közelítő számítását lehetővé tevő eljárásokat három hazai talajmintán keresztül labormérési eredményekkel hasonlítottam össze. A vizsgálatok alapján a talajok hővezetési tényezője a módosított Johansen módszer alkalmazásával közelíthető legjobban a magasabb homoktartalmú minták esetében, de Vries módszere pedig a magas iszap és agyag tartalmú mintánál bizonyult a legpontosabbnak.
- A hővezetési tényező számítására saját módszert is kidolgoztam, mellyel a homokos agyagos iszap minták esetében a mérést értékekkel közel azonos eredményeket kaptam, a jelenlegi módszereknél pontosabb becsléssel.
- A talajminták mért vagy számított hővezetési tényezői minden esetben eltértek az MSZ EN ISO 13370:2008 szabványban megadott reprezentatív értékektől, ezért abban az esetben, ha talajmechanikai vizsgálat készült, a talajminta alapján szükséges megállapítani a talaj hővezetési tényezőjét.
- A talajok térfogati hőkapacitásának vizsgálata során arra az eredményre jutottam, hogy a szabványos, MSZ EN ISO 13370:2008 szerinti számításhoz legközelebbi és emiatt legjobbnak mondható becslést Farouki módszerének használatával érhetjük el. A szabvány reprezentatív értékeinek használatát lehetőleg kerüljük, ha van mód talajminta beszerzésére és vizsgálatára.

A hőveszteségek számításának bemutatása és az eljárások összehasonlítása során a következő megállapításokat tettem:

- A hatályos TNM Rendelet nem felel meg a 2010/31/EU irányelv azon iránymutatásának, mely szerint az épületek energiahatékonyságát mind nemzeti, mind pedig regionális szinten differenciálni kellene, s a klimatikus és helyi feltételek figyelembe kellene vennünk a számítások során. A Rendelet az országunkat egységes éghajlattal és egységes helyi feltételekkel, környezeti jellemzőkkel kezeli.

- A nemzetközi kutatói publikációkban évtizedek óta fellelhető tranziens hőtechnikai modellezés a Magyarországon elterjedt számítási módszerekben nem honosodott meg, a hazai eljárások az állandósult állapotra történő egyszerűsítés alapján, az elmúlt 30 évben szinte változatlan formában vannak jelen, a számítási eljárások és táblázatok nem tartalmazzák a szerkezeti hőhidak miatti többlethővesztéseket.
- A talajjal érintkező szerkezetek számítási eljárásait vizsgálva, azok egyikében sem található meg a padlószerkezet rétegvastagsága, mint befolyásoló tényező. A padlószerkezetet az eddigi számítási eljárások annak hővezetési ellenállásával jellemzik, mely azonban a padlószerkezet vastagságának változtatása nélkül csak bizonyos mértékben változtatható meg.
- A földhő, mely minden esetben egy bizonyos mélységben állandónak tekinthető (illetve a geotermikus gradiens szerint változik), nem játszik található meg egyik jelenleg alkalmazott számítási eljárásban sem.
- Magyarország külső hőmérséklet szempontjából az elmúlt 50 év napi hőmérsékleti adatait vizsgálva két éghajlati zónára bontható, melyek éves átlagos középhőmérséklete 10,5 °C és 9,5 °C. A kutatás során létrehozott külső napi középhőmérsékletet leíró függvények alapján a standard fűtési idénybeli átlaghőmérséklet 3,52 °C és 2,52 °C.
- A hazai épületfizikai számítások során $v = 3$ m/s-os szélsősebesség alkalmazása volna megfelelő az Európai Unió harmonizált szabványokban meghatározott 4 m/s helyett.
- 10 modell tranziens és stacioner hőtechnikai szimulációja során megállapítottam, hogy a standard fűtési idényre vizsgálva az épületszerkezetek közül azok, melyek nem rendelkeznek jelentős hőtároló tömeggel valamint nem érintkeznek jelentős hőtároló tömegű anyagokkal (pl. külső fal), valamint a pincefal, melyet 2 méteres mélységig vizsgáltan, stacioner számítási módszerrel jól közelíthetőek. Azonban a talajjal érintkező padlószerkezetek hővesztései jelentősen eltérnek a stacioner állapotban feltételezettektől, így ezek csak tranziens számításokkal modellezhetőek.
- 2013-as TDK kutatásom és a diplomamunka írása során létrehozott új számítási módszer a talajjal érintkező szerkezetek esetében tranziens végeselemes szimuláció alapján a 1246/2013. Korm. rendelet követelményértékeit és a vonatkozó Európai Unió szabványok figyelembevételével készült, a jelenlegi számítási módszereknél

a valóságot jobban közelítő geometriai- és épületfizikai modellek alapján. Az új számítási módszer figyelembe veszi a padló hőátbocsátási tényezőjének változása-kor a padlószerkezet vastagságának változását valamint a tranziens szimulációból eredően mind a szerkezetek, mind pedig a talaj hőtároló kapacitását.

- A módszer segítségével megalkotott, a szimulációs eredményeket tartalmazó táblázatos értékek tartalmazzák a padlószerkezet hőveszteségeit, valamint a padló és falcsatlakozásnál kialakuló szerkezeti hőhíd hatásait és a talajjal érintkező fallal érintkező földtömeg hőtechnikai hatásait is. A padlók kerülete mentén elhelyezett hőszigetelő sáv számítására az MSZ EN ISO 13370:2008 számítási módszerét integráltam, míg a pincepadlók hőveszteségeinek figyelembevételére közelítő számítási eljárást dolgoztam ki. A tranziens TDK módszer szimulációs eredmények alapján nem csak táblázatos formában, hanem a táblázatos értékeket visszaadó közelítő összefüggések formájában is elérhető.
- A kutatás során a környezeti és lokális hatásokat figyelembe vevő korrekciós tényezőket készítettem, melyek alkalmazásával figyelembe vehetőek például az eltérő külső hőmérsékletből származó megnövekedett hőveszteségek, vagy a talajösszetétel változásából eredő hőveszteség csökkenés is. A korrekciós tényezők megalkotása során megállapítottam, hogy az felbeton alatt, és az aljzatbeton között elhelyezett hőszigetelő rétegű padlószerkezet kedvezőbb kialakítású a hőveszteségek tekintetében, mintha a hőszigetelő anyag a padlólemez alatt kerülne elhelyezésre.
- Az épületek alapvető geometriai formáit figyelembe vevő, a pozitív sarkok háromdimenziós hőtechnikai hatásai miatti korrekciós szorzótényezőket készítettem, melyek segítségével a téglalap alapú épületek hőveszteségei pontosabban modellezhetőek és számíthatóak.
- A diplomamunka készítése során készítettem egy MS Excel alapú szoftvert, mely-lyel az új, tranziens TDK módszer alkalmazása egyszerű, gyors és megbízható.
- A diplomamunkában a már említett 10 modell hőveszteségeit a 7/2006. TNM Ren-delet, az MSZ EN ISO 13370:2008, stacioner és tranziens véges differenciámódsze-res szimuláció és a tranziens TDK módszer alapján is kiszámítottam. Az eredmé-nyeket összehasonlítva megállapítható, hogy a valóságot leginkább visszaadó tran-ziens VDM szimulációval kapott eredményeket a saját, tranziens TDK módszerem eredményei közelítették a legpontosabban.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Szeretném megköszönni konzulenseimnek, Dr. Csanaky Judit Emília egyetemi adjunktusnak, Dr. Tóth Elek DLA ny. egyetemi docensnek és Dr. Tompai Zoltán egyetemi adjunktusnak a dolgozat elkészítéséhez elengedhetetlen szakmai tanácsaikat és segítségüket.

Szeretném továbbá megköszönni Dr. Medgyasszay Péter egyetemi docensnek az általa nyújtott információkat, valamint Kotek Szabolcsnak, az Épületfizika Labor munkatársának és Némethy Ferencnek, a Talajmechanikai Laboratórium technikusának a segítségét.

Köszönöm a 2013. novemberi kari TDK konferencia zsűrijének és bírálóimnak a dolgozat egyes részeinek alapjául szolgáló TDK munkához fűzött észrevételeit, kérdéseit és megjegyzéseit.

Nem utolsó sorban pedig szeretném megköszönni a BME Geotechnikai Tanszékének, a BME Építőanyagok és Mérnökgeológia Tanszékének és a BME Magasépítési Tanszékének, hogy eszközeiket használhattam a kutatásaim során.

Budapest, 2013.12.20.

Nagy Balázs

FORRÁSOK

1. *A belügyminiszter 40/2012. (VIII.13.) BM rendelete az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról szóló 7/2006. TNM rendelet módosításáról.* Magyar Közlöny 2012. évi 107. szám, Magyar Közlöny Lap- és Könyvkiadó, Budapest.
2. *A Kormány 1246/2013. (IV. 30.) Korm. határozata az épületek energiahatékonyságának követelményeiről és az épületek energiahatékonyságáról szóló 2010. május 19-i 2010/31/EU európai parlamenti és tanácsi irányelv szerinti költségoptimalizált követelményszint eléréséről.* Magyar Közlöny 2013. évi 71. szám, Magyar Közlöny Lap- és Könyvkiadó, Budapest.
3. *A tárca nélküli miniszter 7/2006. (V.24.) TNM rendelete az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról.* Magyar Közlöny 2006. évi 62. szám, Magyar Közlöny Lap- és Könyvkiadó, Budapest.
4. Adjali, M.H.; Davies, M.; Rees, S.W.; Littler, J. (2000): *Temperatures in and under a slab-on-ground floor: two- and three-dimensional numerical simulations comparison with experimental data.* Building and Environment volume 35, issue 7, Elsevier Inc, Philadelphia, USA. ISSN 0360-1323, 655-662. oldal
5. Adjali, M.H.; Davies, M.; Riain, C. Ni; Littler, J.G. (2000): *In situ measurements and numerical simulation of heat transfer beneath a heated ground floor slab.* Energy and Building volume 33, issue 1, Elsevier Inc, Philadelphia, USA. ISSN 0378-7788, 75-83. oldal
6. *Az Európai Parlament és a Tanács 2010/31/EU irányelve az épületek energiahatékonyságáról.* Az Európai Unió Hivatalos Lapja L 153, EU Publications Office Kiadó
7. Blomberg, Thomas (1996): *Heat conduction in two and three dimensions, Computer Modelling of Building Physics Applications.* Doctorate thesis, Department of Building Physics, Lund University, Lund, Sweden. ISBN 91-88722-05-8
8. Claesson J.; Hagentoft C.E. (1991): *Heat loss to the ground from a building – I. General theory.* Building and Environment volume 26, issue 2, Elsevier Inc, Philadelphia, USA. ISSN 0360-1323, 195-208. oldal
9. Davies, G.R. (1979): *Thermal analysis of earth covered buildings.* Fourth National Passive Solar Conference, Kansas City, USA

10. de Vries, D. A. (1963): *Thermal properties of soil*. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society volume 90, issue 386: Physics of Plant Environment (editor: W.R. Van Wijk.), North-Holland Publishing Co., Amsterdam, Holland. 210-235. oldal
11. Delsante A.E. (1988): *Theoretical calculation of the steady-state heat loss through a slab-on-grade floor*. Building and Environment volume 23, issue 1, 11 ISSN 0360-1323, 11-17. oldal
12. dos Santos, Gerson H.; Mendes, Nathan (2006): *Simultaneous heat and moisture transfer in soils combined with building simulation*. Energy and Building volume 38, issue 4, Elsevier Inc, Philadelphia, USA. ISSN 0378-7788, 303-314. oldal
13. Dr. Csanaky Judit Emília (2013): *Épületfizika és –kémia előadásjegyzet, 4. előadás: A számítás gyakorlati lépései részletes számítási mód esetén-II*. BME Magasépítési Tanszék, Budapest.
14. Dr. Mahler András (2013): *Talajazonosítás – Szemcsés és Szerves talajok azonosítása*, Talajmechanika előadásdiák, BME Geotechnikai Tanszék, Budapest.
15. Dr. Mecsi József (2009): *Talajmechanika*. Egyetemi jegyzet, PTE Infrastruktúra és Mérnöki Geoinformatika Tanszék, Pécs.
16. Dr. Möller Károly (1934): *Építési zsebkönyv I. kötet*. Királyi Magyar Egyetemi Nyomda, Budapest. 20.317/1934, 301-350. oldal
17. Dr. Varga Csaba (2008): *A talaj fizikai tulajdonságai*. Talajtan előadásdiák, NYF Tájgazdálkodási és Vidékfejlesztési Tanszék, Nyíregyháza.
18. Endrizzi S.; Quinton W. L.; Marsh P. (2011): *Modelling the spatial pattern of ground thaw in a small basin in the arctic tundra*. The Cryosphere Discuss volume 5, Copernicus Publications GmbH, Göttingen, Germany. eISSN 1994-0440, 367-400. oldal
19. Farouki, Omar T. (1981): *Thermal properties of soils*. CRREL Monograph 81-1, United States Army Corps of Engineers, Cold Regions Research and Engineering Laboratory, Hanover, New Hampshire, USA.
20. Fricke, B.A.; Misra, A.; Becker, B.R.; Stewart, W.E. Jr. (1992): *Soil Thermal Conductivity: Effects of Saturation and Dry Density*. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings V International Conference, Clearwater Beach, Florida, USA.
21. Gisbert, Stoyan; Galina, Takó (2002): *Numerikus Módszerek I*. Typotex Elektronikus Kiadó Kft, Pécs. ISBN 963-9326-20-8

22. Hadjidimos, A. (2000): *Successive overrelaxation (SOR) and related methods*. Journal of Computational and Applied Mathematics 123, Elsevier B.V., Amsterdam, Netherlands. ISSN: 0377-0427, 177-199. oldal
23. Konkolyiné Bihari Zita; Lakatos Mónika; Szalai Sándor (2008): *Magyarország éghajlatáról. Változás, változékonyság térben és időben*. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest.
24. Kusuda T.; Bean J.W. (1984): *Simplified methods for determining seasonal heat loss from uninsulated slab-on-grade floors*. ASHRAE Transactions volume 90, part 1B, Amer. Soc. Heating, Ref. Air-Conditioning Eng. Inc., ISSN: 0001-2505, 611-632. oldal
25. Kusuda T.; Achenbach P.R. (1963): *Numerical analysis of the thermal environment of occupied underground spaces with finite cover using a digital computer*. ASHRAE Transactions volume 69, Amer. Soc. Heating, Ref. Air-Conditioning Eng. Inc., ISSN: 0001-2505, 439-452. oldal
26. Latta J.K.; Boileau G.G. (1969): *Heat losses from house basements*. Canadian Builders volume 19, issue 10, 39-42. oldal
27. 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*. Magyar Szabványügyi Testület, Budapest.
28. MSZ EN ISO 10211:2008 *Hőhidak az épületszerkezetekben. Hőáramok és felületi hőmérsékletek. Részletes számítások (ISO 10211:2007)*. Magyar Szabványügyi Testület, Budapest.
29. MSZ EN ISO 10456:2008 *Építési anyagok és termékek. Hő- és nedvességtechnikai tulajdonságok. Táblázatos tervezési értékek, eljárások a minősítési és tervezési hőtechnikai értékek meghatározására (ISO 10456:2007)*. Magyar Szabványügyi Testület, Budapest.
30. MSZ EN ISO 13370:2008 *Épületek hőtechnikai viselkedése. Hőátvitel a talajban. Számítási módszerek (ISO 13370:2007)*. Magyar Szabványügyi Testület, Budapest.
31. MSZ EN ISO 14683:2008 *Hőhidak az épületszerkezetekben. Vonal menti hőátbocsátási tényező. Egyszerűsített módszerek és felülírható kiindulóértékek (ISO 14683:2007)*. Magyar Szabványügyi Testület, Budapest.

32. MSZ EN ISO 14688-2:2004 *Geotechnikai vizsgálatok. Talajok azonosítása és osztályozása. 2. rész: Osztályozási alapelvek.* Magyar Szabványügyi Testület, Budapest.
33. MSZ EN ISO 6946:2008 *Épületszerkezetek és épületelemek. Hővezetési ellenállás és hőátbocsátás. Számítási módszer (ISO 6946:2007).* Magyar Szabványügyi Testület, Budapest.
34. MSZ-04-140/3:1978 *Épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számításai. Fűtési hőszükségletszámítás.* Építésügyi és Városfejlesztési Minisztérium, Budapest
35. MSZ-04-140/3:1987 *Épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számításai. Fűtési hőszükségletszámítás.* Építésügyi és Városfejlesztési Minisztérium, Budapest
36. MSZ-04-140-2:1991 *Épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számításai. Hőtechnikai méretezés.* Környezetvédelmi és Területfejlesztési Minisztérium, Budapest
37. MSZE CEN ISO/TS 17892-4:2006 *Geotechnikai vizsgálatok. Talajok laboratóriumi vizsgálata. 4. rész: A szemeloszlás meghatározása (ISO/TS 17892-4:2004).* Magyar Szabványügyi Testület, Budapest.
38. Nagy Balázs (2011): *A szoláris nyereségek pontosítása a hazai épületenergetikai számításoknál.* TDK dolgozat, BME Magasépítési Tanszék, Budapest.
39. Nagy Balázs (2012): *Éghajlatfüggő tényezők pontosítása a hazai épületenergetikai számításokban.* Épületgépész I. évfolyam 3. szám, Magyar Épületgépészek Szövetsége, Budapest. 44-45. oldal
40. Nagy Balázs (2013a): *Többdimenziós hőáramlás modellezés összehasonlító elemzése.* Szakmérnöki szakdolgozat, BME Épületenergetikai és Épületgépészeti Tanszék, Budapest.
41. Nagy Balázs (2013b): *Talajjal érintkező szerkezetek hőtechnikai modellezésének lehetőségei.* TDK dolgozat, BME Magasépítési Tanszék, Budapest.
42. Peters-Lidard, C. D.; Blackburn, E.; Liang X.; Wood, E. F. (1998): *The effect of Soil Thermal Conductivity Parameterization on Surface Energy Fluxes and Temperatures.* Journal of the Atmospheric Sciences volume 55, issue 7, American Meteorological Society, Boston, Massachusetts, USA. ISSN 0022-4928, 1209-1224. oldal

43. Rees, S.W.; Adjali, M.H.; Zhou, Z.; Davies, M.; Thomas, H.R. (2000): *Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures*. Renewable and Sustainable Energy Reviews volume 4, issue 3, Elsevier Inc, Philadelphia, USA. ISSN 1364-0321, 213-265. oldal
44. Rees, S.W.; Zhou, Z.; Thomas, H.R. (2001): *The influence of soil moisture content variations on heat losses from earth-contact structures: an initial assesment*. Building and Environment volume 36, issue 2, Elsevier Inc, Philadelphia, USA. ISSN 0360-1323, 157-165. oldal
45. Rees, S.W.; Zhou, Z.; Thomas, H.R. (2007): *Ground heat transfer: A numerical simulation of a full-scale experiment*. Building and Environment volume 42, issue 3, Elsevier Inc, Philadelphia, USA. ISSN 0360-1323, 1478-1488. oldal
46. Sikora E.; Kossowski J. (1993): *Thermal conductivity and diffusivity estimations of uncompacted and compacted soils using computing methods*. Polish Journal of Soil Science volume 26 issue 1, Institute of Agrophysics (Polish Academy of Science in Lubin), Lubin, Poland. ISSN 0079-2985, 19-26. oldal
47. Sterling, Raymond L. (1992): *Assessment of Apparent Soil Thermal Conductivity*. Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings V International Conference, Clearwater Beach, Florida, USA.
48. Thomas, H.R.; Rees, S.W. (1998): *The thermal performance of ground floor slabs – a full scale in-situ experiment*. Building and Environment volume 34, issue 2, Elsevier Inc, Philadelphia, USA. ISSN 0360-1323, 139-164. oldal
49. Usowicz, Boguslaw; Usowicz, Lukasz (2004): *Thermal conductivity of soils – comparison of experimental results and estimation methods*. Eurosoil 2004 congress, Freiburg, Germany.
50. Westermann, Sebastian (2010): *Sensitivity of permafrost*. Doktori disszertáció, Combined Faculties for the Natural Sciences and for Mathematics of the Ruperto-Carola University of Heidelberg, Germany
51. Zhong, Zhipeng; Braun, James E. (2007): *A simple method for estimating transient heat transfer in slab-on-ground floors*. Building and Environment volume 42, issue 3, Elsevier Inc, Philadelphia, USA. ISSN 0360-1323, 1071-1080. oldal

MELLÉKLETEK

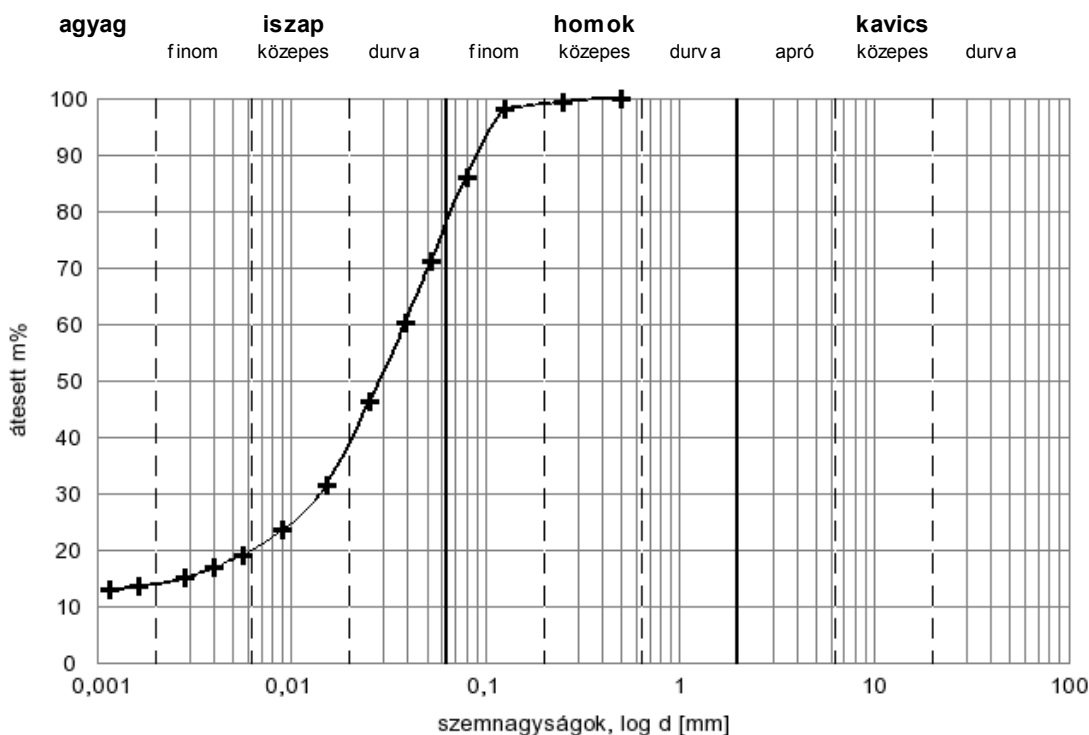
A CD mellékleten a dolgozat pdf formátumú változata mellett megtalálhatóak a nyomtatott mellékleteken kívül a vizsgált talajminták osztályozásához és fizikai féleléseinek azonosításához készített ábrák nagyfelbontású változatai. A mellékleten szerepel továbbá a diplomamunkában fellelhető összes számítás egy összesített excel táblázatban, mely a tranziens hőtechnikai szimulációk napi bontású adatait is tartalmazza. A 8. fejezetben bemutatott szoftver is rákerült a CD-re, valamint a 2013. novemberi TDK dolgozat eredményeit és kutatásait összefoglaló excel fájl is.

A nyomtatott mellékletek között a következő oldalakon a dolgozat 5. fejezetében vizsgált talajminták szemeloszlási vizsgálatának jegyzőkönyvei (3 db A/4 oldal) és hővezetési tényezőinek mérési jegyzőkönyvei (5 db A/4 oldal) találhatóak változatlan formában közölve.

VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV

Geotechnikai vizsgálatok. Talajok laboratóriumi vizsgálata. 4. rész: A szemeloszlás meghatározása (ISO/TS 17892-4:2004) MSZE CEN TS/ISO 17892-4:2006

Munka száma:	290/2013	Jegyzőkönyv száma:	16/12/2013
Megrendelő:	BME Geotechnikai Tanszék	Minta érkezési dátuma:	2013.12.04
Minta származási helye:	DIPLOMA - Nagy Balázs	Vizsgálat dátuma:	2013.12.04
Minta jele:	3.minta	Minta típusa:	zavart



Talajt alkotó frakciók		
Kavics	K (Gr)	0,00 m%
Homok	H (Sa)	23,29 m%
Iszap	I (Si)	62,89 m%
Agyag	A (Cl)	13,82 m%

A szemeloszlási görbe jellemző pontjai		
90%-hoz tartozó szemmagyság	D_{90}	0,095 mm
60%-hoz tartozó szemmagyság	D_{60}	0,039 mm
30%-hoz tartozó szemmagyság	D_{30}	0,014 mm
10%-hoz tartozó szemmagyság	D_{10}	mm
Egyenlőtlenégi mutató	C_u	
Görbületi mutató	C_c	
Természetes víztartalom	w	0,9 %
Szemcsesűrűség	ρ_s	2,67 g/cm ³

Megjegyzés a vizsgálattal kapcsolatban:

Mérőeszközök: Mérleg (KERN PLJ 4000-2M), Szitasor (BÉTI 200 mm / 0,063-63 mm), Szitarázó (PASCALL ENG. 12404), Hidrométer (ANDREAS KFT. 68)

Budapest, 2013.12.04

Vizsgálatot végezte
Némethy Ferenc

P.H.

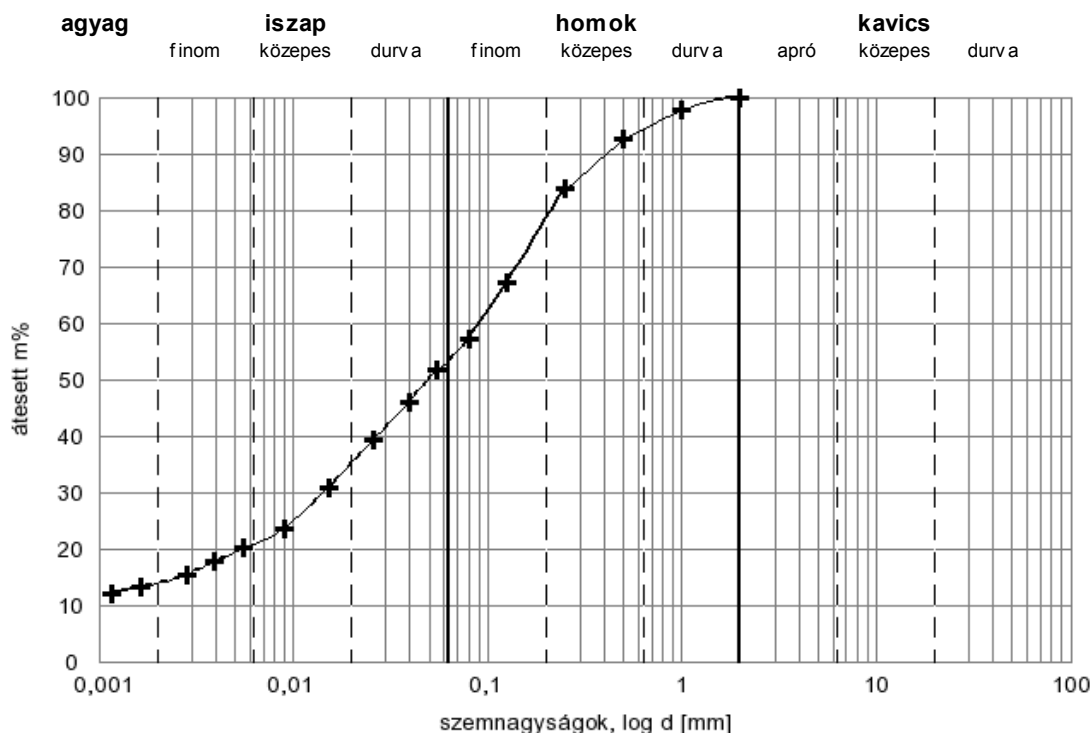
Laboratóriumvezető
Dr. Tompai Zoltán

A vizsgálati eredmények csak a megvizsgált mintára vonatkoznak!
A vizsgálati jegyzőkönyv a kibocsátó írásbeli hozzájárulásával és csak teljes egészében másolható!

VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV

Geotechnikai vizsgálatok. Talajok laboratóriumi vizsgálata. 4. rész: A szemeloszlás meghatározása (ISO/TS 17892-4:2004) MSZE CEN TS/ISO 17892-4:2006

Munka száma:	290/2013	Jegyzőkönyv száma:	17/12/2013
Megrendelő:	BME Geotechnikai Tanszék	Minta érkezési dátuma:	2013.12.04
Minta származási helye:	DIPLOMA - Nagy Balázs	Vizsgálat dátuma:	2013.12.04
Minta jele:	4.minta	Minta típusa:	zavart



Talajt alkotó frakciók		
Kavics	K (Gr)	0,00 m%
Homok	H (Sa)	46,68 m%
Iszap	I (Si)	39,51 m%
Agyag	A (Cl)	13,81 m%

A szemeloszlási görbe jellemző pontjai		
90%-hoz tartozó szemmagyság	D ₉₀	0,430 mm
60%-hoz tartozó szemmagyság	D ₆₀	0,093 mm
30%-hoz tartozó szemmagyság	D ₃₀	0,014 mm
10%-hoz tartozó szemmagyság	D ₁₀	mm
Egyenlőtlenségi mutató	Cu	
Görbületi mutató	Cc	
Természetes víztartalom	w	0,9 %
Szemcsesűrűség	ρ _s	2,67 g/cm ³

Megjegyzés a vizsgálattal kapcsolatban:

Mérőeszközök: Mérleg (KERN PLJ 4000-2M), Szitator (BÉTI 200 mm / 0,063-63 mm), Szitászó (PASCALL ENG. 12404), Hidrométer (ANDREAS KFT. 68)

Budapest, 2013.12.04

Vizsgálatot végezte
Némethy Ferenc

P.H.

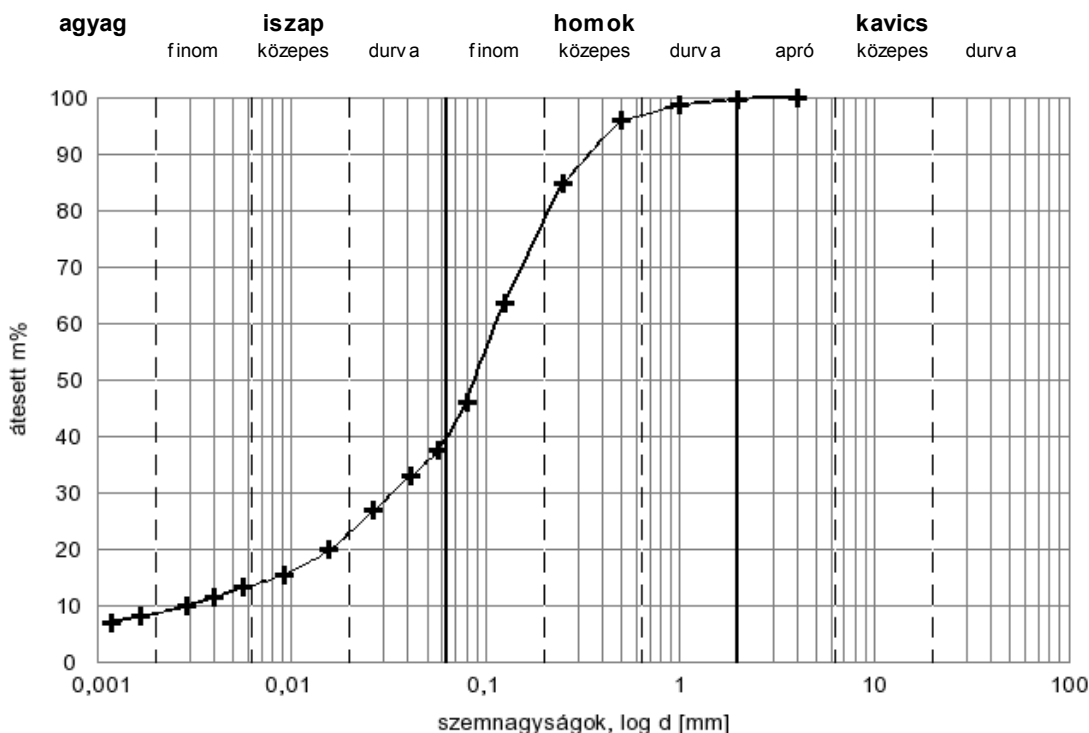
Laboratóriumvezető
Dr. Tompai Zoltán

A vizsgálati eredmények csak a megvizsgált mintára vonatkoznak!
A vizsgálati jegyzőkönyv a kibocsátó írásbeli hozzájárulásával és csak teljes egészében másolható!

VIZSGÁLATI JEGYZŐKÖNYV

Geotechnikai vizsgálatok. Talajok laboratóriumi vizsgálata. 4. rész: A szemeloszlás meghatározása (ISO/TS 17892-4:2004) MSZE CEN TS/ISO 17892-4:2006

Munka száma:	290/2013	Jegyzőkönyv száma:	18/12/2013
Megrendelő:	BME Geotechnikai Tanszék	Minta érkezési dátuma:	2013.12.04
Minta származási helye:	DIPLOMA - Nagy Balázs	Vizsgálat dátuma:	2013.12.04
Minta jele:	5.minta	Minta típusa:	zavart



Talajt alkotó frakciók		
Kavics	K (Gr)	0,38 m%
Homok	H (Sa)	60,06 m%
Iszap	I (Si)	31,17 m%
Agyag	A (Cl)	8,39 m%

A szemeloszlási görbe jellemző pontjai		
90%-hoz tartozó szemmagyság	D_{90}	0,369 mm
60%-hoz tartozó szemmagyság	D_{60}	0,116 mm
30%-hoz tartozó szemmagyság	D_{30}	0,034 mm
10%-hoz tartozó szemmagyság	D_{10}	0,003 mm
Egyenlőtlenességi mutató	C_u	37,56
Görbületi mutató	C_c	3,26
Természetes víztartalom	w	0,4 %
Szemcsesűrűség	ρ_s	2,67 g/cm ³

Megjegyzés a vizsgálattal kapcsolatban:

Mérőeszközök: Mérleg (KERN PLJ 4000-2M), Szitator (BÉTI 200 mm / 0,063-63 mm), Szitázó (PASCALL ENG. 12404), Hidrométer (ANDREAS KFT. 68)

Budapest, 2013.12.04

Vizsgálatot végezte
Némethy Ferenc

P.H.

Laboratóriumvezető
Dr. Tompai Zoltán

A vizsgálati eredmények csak a megvizsgált mintára vonatkoznak!
A vizsgálati jegyzőkönyv a kibocsátó írásbeli hozzájárulásával és csak teljes egészében másolható!

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

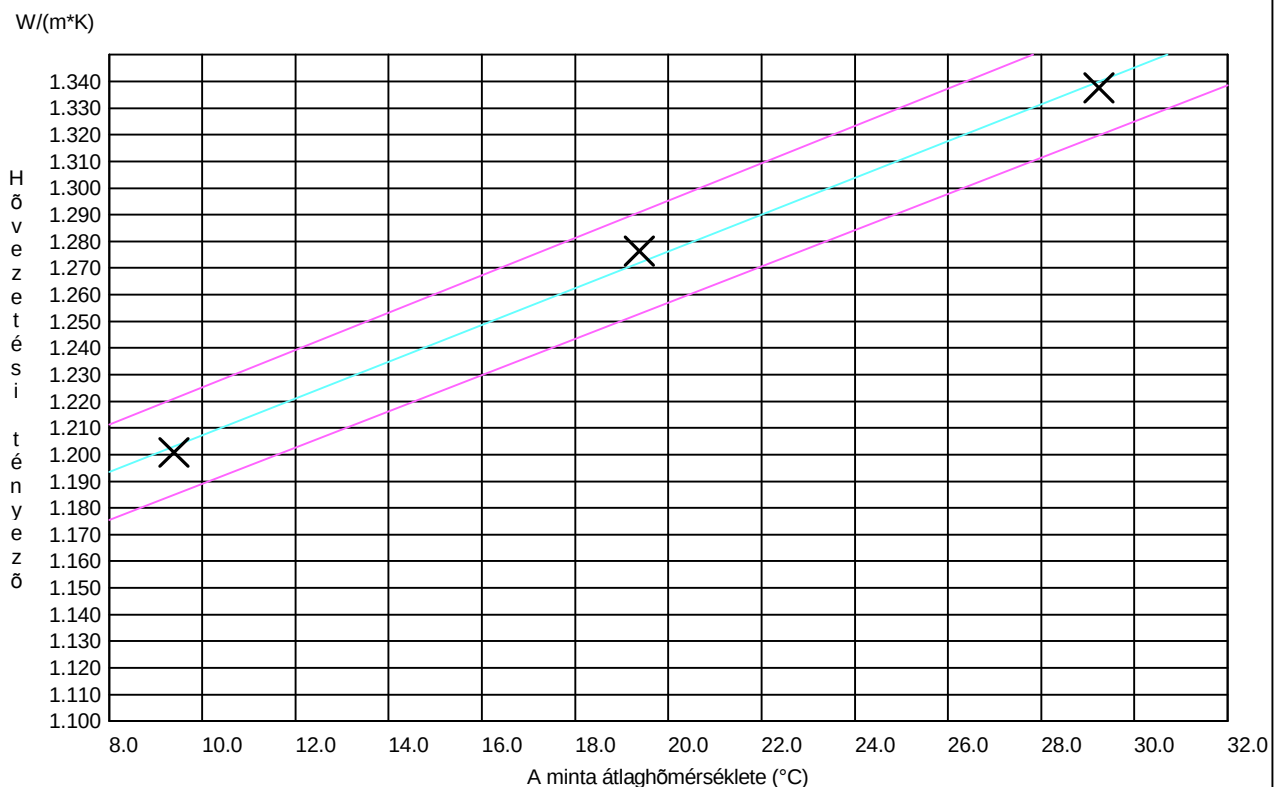
Építőmérnöki kar - Magasépítési Tanszék
1111 Budapest Műegyetem rakpart 3. K 141.
Tel.: (36-1) 463-13-08 Fax: (36-1) 463-30-65
www.met.bme.hu

HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ MÉRÉSE

Jegyzőkönyv száma: MET L095 - 2013

Sample Thickness : 40,00 mm
Minta: DIPLOMA (Nagy Balázs)
Anyag neve: 3. minta
Méret: (180x180x40)mm 2287 g 1764 kg/m³
Mérés dátuma: 2013.11.18.
Megjegyzés: Nedvességtartalom: 19.23 m%
Mérőeszköz típusa: TLP 300 - DTX-1P/2, One-plate measurement
Program-verzió: Lambda2010, One-plate

Mérés száma	Hőáram (W)	Hőmérséklet A minta hideg felületén (°C)	Hőmérséklet A minta meleg felületén (°C)	Hőmérséklet-különbség a mintán (K)	A minta átlag-hőmérséklete (°C)	Hővezetési tényező (W/m*K)
1	1.062	7.6	11.2	3.5	9.4	1.201
2	1.099	17.7	21.1	3.4	19.4	1.276
3	1.119	27.6	30.9	3.3	29.2	1.338



Lambda (10°C) = (1.21 +/-0.04) W/(m*K)

Result +/- expanded uncertainty (factor 2)

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

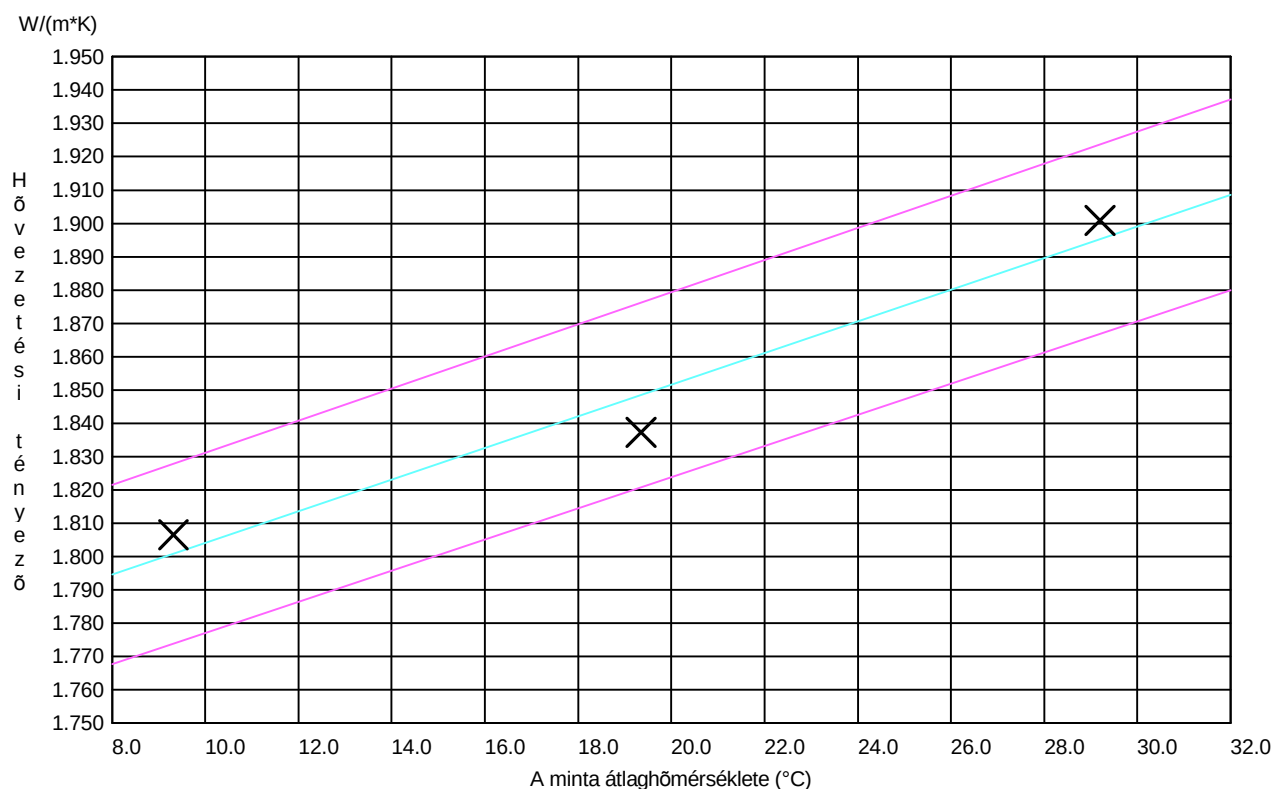
Építőmérnöki kar - Magasépítési Tanszék
1111 Budapest Műegyetem rakpart 3. K 141.
Tel.: (36-1) 463-13-08 Fax: (36-1) 463-30-65
www.met.bme.hu

HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ MÉRÉSE

Jegyzőkönyv száma: MET L096 - 2013

Sample Thickness : 40,00 mm
Minta: DIPLOMA (Nagy Balázs)
Anyag neve: 4. minta
Méret: (180x180x40)mm 2176 g 1679 kg/m³
Mérés dátuma: 2013.11.19.
Megjegyzés: Nedvességtartalom: 18.58 m%
Mérőeszköz típusa: TLP 300 - DTX-1P/2, One-plate measurement
Program-verzió: Lambda2010, One-plate

Mérés száma	Hőáram (W)	Hőmérséklet A minta hideg felületén (°C)	Hőmérséklet A minta meleg felületén (°C)	Hőmérséklet-különbség a mintán (K)	A minta átlag-hőmérséklete (°C)	Hővezetési tényező (W/m*K)
1	1.303	7.9	10.8	2.9	9.3	1.806
2	1.331	17.9	20.8	2.9	19.3	1.837
3	1.339	27.8	30.6	2.8	29.2	1.901



Lambda (10°C) = (1.80 +/-0.05) W/(m*K)

Result +/- expanded uncertainty (factor 2)

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki kar - Magasépítési Tanszék
1111 Budapest Műegyetem rakpart 3. K 141.
Tel.: (36-1) 463-13-08 Fax: (36-1) 463-30-65
www.met.bme.hu

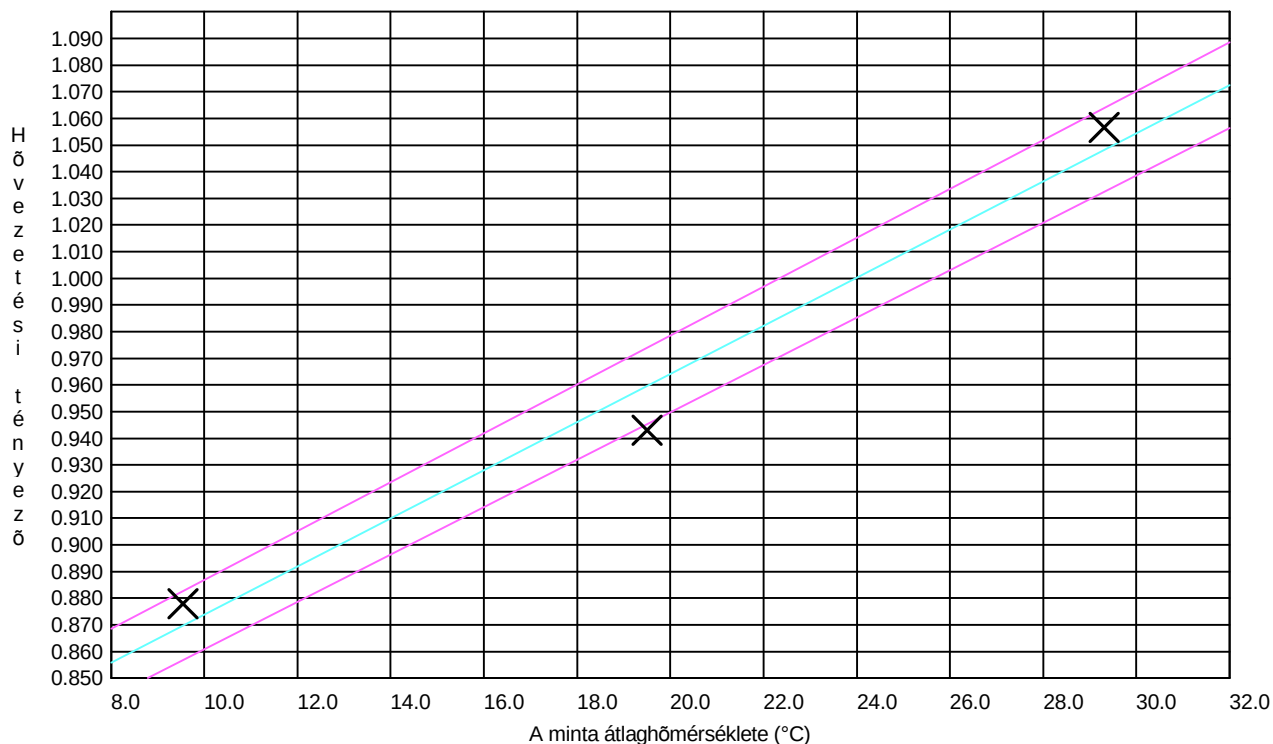
HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ MÉRÉSE

Jegyzőkönyv száma: MET L097 - 2013

Sample Thickness : 40,00 mm
Minta: DIPLOMA (Nagy Balázs)
Anyag neve: 5. minta
Méret: (180x180x40)mm 1890 g 1458 kg/m³
Mérés dátuma: 2013.11.20.
Megjegyzés: Nedvességtartalom: 8.99 m%
Mérőeszköz típusa: TLP 300 - DTX-1P/2, One-plate measurement
Program-verzió: Lambda2010, One-plate

Mérés száma	Hőáram (W)	Hőmérséklet A minta hideg felületén (°C)	Hőmérséklet A minta meleg felületén (°C)	Hőmérséklet-különbség a mintán (K)	A minta átlag-hőmérséklete (°C)	Hővezetési tényező (W/m*K)
1	1.011	7.2	11.8	4.6	9.5	0.8780
2	1.051	17.3	21.7	4.5	19.5	0.9430
3	1.099	27.2	31.4	4.2	29.3	1.057

W/(m*K)



Lambda (10°C) = (0.874 +/- 0.026) W/(m*K)

Result +/- expanded uncertainty (factor 2)

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

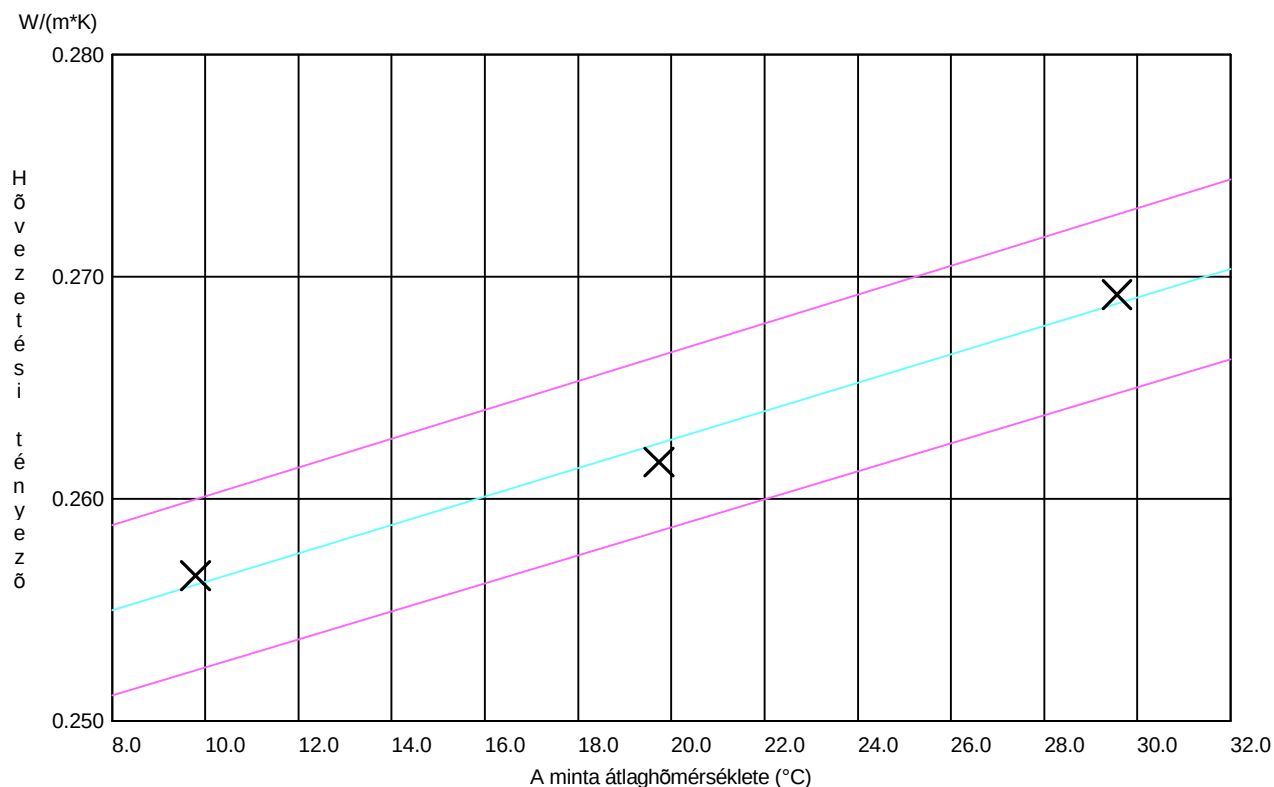
Építőmérnöki kar - Magasépítési Tanszék
1111 Budapest Műegyetem rakpart 3. K 141.
Tel.: (36-1) 463-13-08 Fax: (36-1) 463-30-65
www.met.bme.hu

HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ MÉRÉSE

Jegyzőkönyv száma: MET L098 - 2013

Sample Thickness : 40,00 mm
Minta: DIPLOMA (Nagy Balázs)
Anyag neve: 4. minta - Szárított
Méret: (180x180x40)mm 1835 g 1416 kg/m³
Mérés dátuma: 2013.11.26.
Megjegyzés: Nedvességtartalom: 0.9 m%
Mérőeszköz típusa: TLP 300 - DTX-1P/2, One-plate measurement
Program-verzió: Lambda2010, One-plate

Mérés száma	Hőáram (W)	Hőmérséklet A minta hideg felületén (°C)	Hőmérséklet A minta meleg felületén (°C)	Hőmérséklet-különbség a mintán (K)	A minta átlag-hőmérséklete (°C)	Hővezetési tényező (W/m*K)
1	0.473	6.1	13.5	7.4	9.8	0.2566
2	0.482	16.1	23.4	7.4	19.7	0.2617
3	0.491	25.9	33.2	7.3	29.6	0.2692



Lambda (10°C) = (0.256 +/-0.008) W/(m*K)

Result +/- expanded uncertainty (factor 2)

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

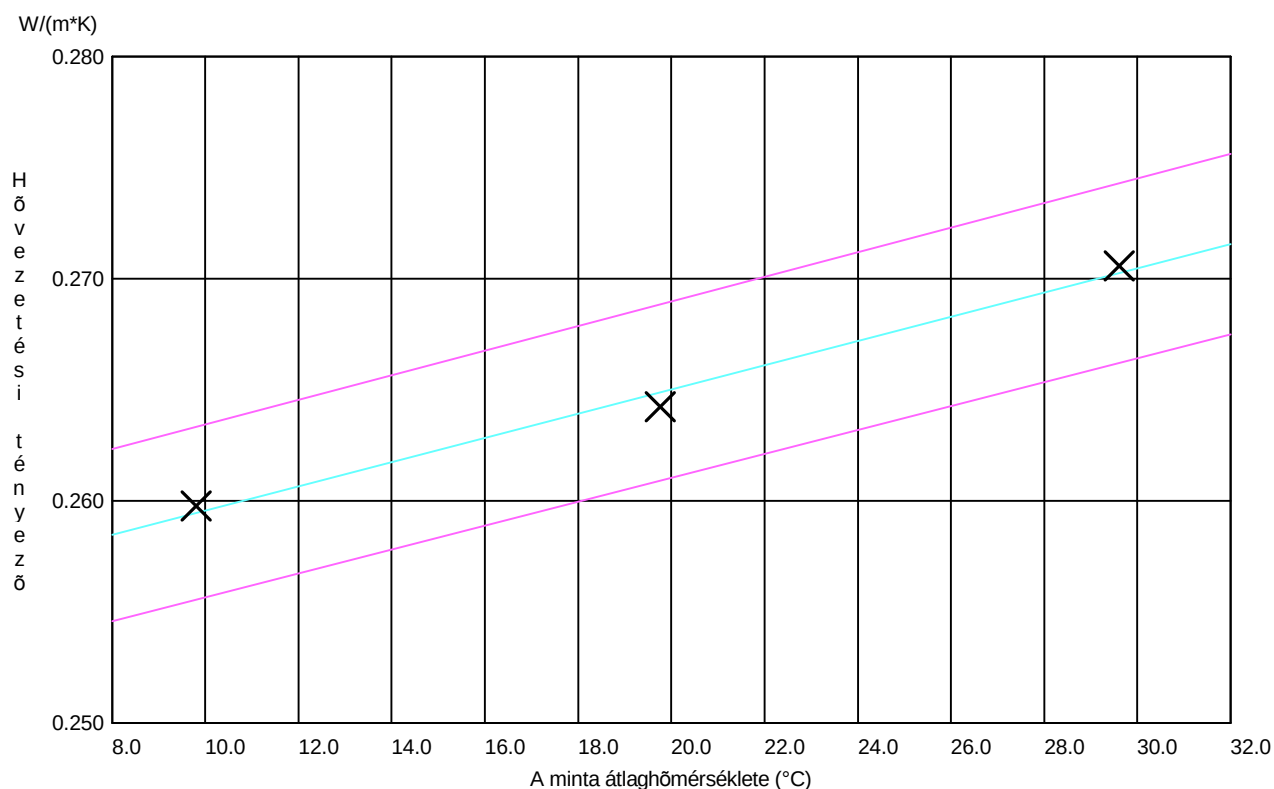
Építőmérnöki kar - Magasépítési Tanszék
1111 Budapest Műegyetem rakpart 3. K 141.
Tel.: (36-1) 463-13-08 Fax: (36-1) 463-30-65
www.met.bme.hu

HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐ MÉRÉSE

Jegyzőkönyv száma: MET L099 - 2013

Sample Thickness : 40,00 mm
Minta: DIPLOMA (Nagy Balázs)
Anyag neve: 5. minta - Száritott
Méret: (180x180x40)mm 1734 g 1338 kg/m³
Mérés dátuma: 2013.11.25.
Megjegyzés: Nedvességtartalom: 0.4 m%
Mérőeszköz típusa: TLP 300 - DTX-1P/2, One-plate measurement
Program-verzió: Lambda2010, One-plate

Mérés száma	Hőáram (W)	Hőmérséklet A minta hideg felületén (°C)	Hőmérséklet A minta meleg felületén (°C)	Hőmérséklet-különbség a mintán (K)	A minta átlag-hőmérséklete (°C)	Hővezetési tényező (W/m*K)
1	0.489	6.0	13.6	7.5	9.8	0.2598
2	0.498	16.0	23.5	7.5	19.8	0.2643
3	0.502	25.9	33.3	7.4	29.6	0.2706



Lambda (10°C) = (0.260 +/- 0.008) W/(m*K)

Result +/- expanded uncertainty (factor 2)