



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

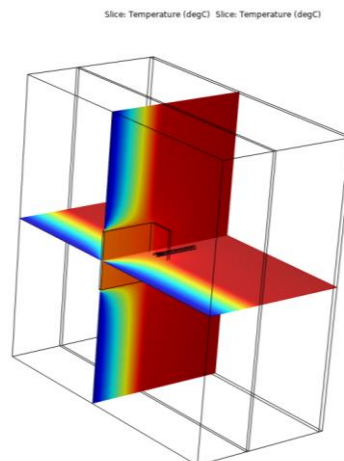
**Budapesti Műszaki-és Gazdaságtudományi Egyetem**

**Építőmérnöki Kar**

**Építőanyagok- és Magasépítés Tanszék**

**TDK Dolgozat**

**Átszellőztetett homlokzatburkolatok rögzítőrendszerének  
épületfizikai elemzése**



Készítette: Petresevics Fanni

Konzulens: Dr. Nagy Balázs

Budapest, 2020.11.01.

## Tartalom

1.	<i>Ábrajegyzék</i> .....	3
2.	<i>Absztrakt</i> .....	6
2.1.	<i>Absztrakt</i> .....	6
2.2.	<i>Summary</i> .....	7
3.	<i>Bevezetés</i> .....	9
4.	<i>Szakirodalmi áttekintés, alapismeretek</i> .....	12
4.1.	<i>Hőátbocsátási tényező definiálása</i> .....	12
4.2.	<i>Korrigálatlan hőátbocsátási tényező számítása</i> .....	13
4.3.	<i>Korrigált hőátbocsátási tényező számítása</i> .....	14
4.3.1.	<i>Egyszerűsített eljárás</i> .....	15
4.3.2.	<i>Numerikus számítási módszer</i> .....	16
4.4.	<i>Nemzetközi szakirodalom</i> .....	18
5.	<i>Hőtechnikai modellezés és szimuláció</i> .....	25
5.1.	<i>A használandó paraméterek összegyűjtése</i> .....	25
5.2.	<i>A geometria felépítése</i> .....	26
5.3.	<i>Végeselemes háló készítése</i> .....	27
5.4.	<i>Numerikus számítási módszer, fizika</i> .....	28
6.	<i>Eredmények kiértékelése</i> .....	30
6.1.	<i>Eredmények vizualizálása</i> .....	30
6.2.	<i>Hőhíd katalógusok létrehozása</i> .....	33
6.3.	<i>Eredmények ábrázolása grafikonon és összehasonlításuk</i> .....	34
6.3.1.	<i>Adatok leválogatása és szegregálása</i> .....	34
6.3.2.	<i><math>\chi</math>-értékek részletesebb vizsgálata</i> .....	36
6.3.3.	<i>Hőhídmegevezető alkalmazásának részletesebb vizsgálata</i> .....	48
6.3.4.	<i>A hőátbocsátási tényező romlásának vizsgálata a tartókonzolok hatására</i> .....	51
6.4.	<i>Korrekciós képlet létrehozása</i> .....	53
7.	<i>Összefoglalás</i> .....	58
8.	<i>Irodalomjegyzék</i> .....	59

## 1. Ábrajegyzék

1. ÁBRA: INFOPARK D ÉPÜLET (BUDAPEST) TÉGLA HOMLOKZATBURKOLATTAL <a href="http://hap.hu/portfolio/irodaepulet-d-bp-xi-infopark/">HTTP://HAP.HU/PORTFOLIO/IRODAEPULET-D-BP-XI- INFOPARK/</a> .....	9
2. ÁBRA: LUTHER-KÁPOLNA (BUDAPEST) SZÁLCEMENT HOMLOKZATBURKOLATTAL <a href="https://www.equitone.com/hu">HTTPS://WWW.EQUITONE.COM/HU</a> .....	9
3. ÁBRA: A HOMLOKZATBURKOLATI RENDSZER FELÉPÍTÉSE <a href="https://www.epitesimegoldasok.hu/a-szerelt,-atszelloztetett-homlokzat-kinalta-tervezoi-szabadsag.html">HTTPS://WWW.EPITESIMEGOLDASOK.HU/A-SZERELT,- ATSZELLOZTETETT-HOMLOKZAT-KINALTA-TERVEZOI-SZABADSAG.HTML</a> .....	10
4. ÁBRA: ÁTSZELLŐZTETETT HOMLOKZATBURKOLATOK MŰKÖDÉSI ELVE [3] .....	10
5. ÁBRA: 2018.01.01-TŐL ÉRVÉNYES HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐ ÉRTÉKEK A KÜLÖNBÖZŐ ÉPÜLETSZERKEZETEKRE .....	12
6. ÁBRA: SÜLLYESZTETT RÖGZÍTÉS .....	16
7. ÁBRA: EGYENLETES IZOTERMÁS KÉPET MUTATÓ MODELL [7] .....	19
8. ÁBRA: AZ ÁLTALÁNOS ALUMÍNIUM KONZOLOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA A SPECIÁLISAN A HŐHIDAK HATÁSÁNAK CSÖKKENTÉSÉRE TERVEZETT KONZOLOKKAL [7] .....	19
9. ÁBRA: A HŐSZIGETELÉS VASTAGSÁGÁNAK HATÁSA A PONTSZERŰ HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐRE A FALVASTAGSÁG FÜGGVÉNYÉBEN .....	20
10. ÁBRA: A HŐHÍDMEGSZAKÍTÓK HATÁSA A PONTSZERŰ HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐRE A TARTÓFAL ANYAGTULAJDONSÁGAINAK FÜGGVÉNYÉBEN .....	20
11. ÁBRA: A FALAZAT ÉS A HŐSZIGETELÉS ANYAGÁNAK HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐJÉNEK ÉS VASTAGSÁGÁNAK HATÁSA A HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐRE %-BAN MÉRVE .....	20
12. ÁBRA: A KUTATÁS [8] EREDMÉNYEKÉPPEN A PONTBELI HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐRE KAPOTT SZÁMÍTÁSI KÉPLET .....	21
13. ÁBRA: AZ EGYSZERŰSÍTETT ÉS NUMERIKUS MÓDSZERREL SZÁMÍTOTT, VALAMINT A HOTBOX-AL MÉRT ÉRTÉKEK .....	22
14. ÁBRA: BAL OLDALON HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ALUMÍNIUM (A) ÉS ROZSDAMENTES ACÉL (C) KONZOL ESETÉBEN, JOBB OLDALON HŐÁRAMSŰRŰSÉG ALUMÍNIUM (B) ÉS ROZSDAMENTES ACÉL (D) ESETÉBEN .....	22
15. ÁBRA: KÜLÖNBÖZŐ MÓDSZERTANOK ÁLTAL SZÁMOLT HŐÁRAMOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA .....	23
16. ÁBRA: EREDŐ U-ÉRTÉKEK 0,3W/M <sup>2</sup> K-ES KORREKCIÓ UTÁN [1] ALAPJÁN .....	24
17. ÁBRA: NVELOPE U-ÉRTÉK TERVEZŐ ÉS SZÁMÍTÓ PROGRAM <a href="https://nvelope.com/rainscreen-thermal-calculations.html">HTTPS://NVELOPE.COM/RAINSCREEN-THERMAL- CALCULATIONS.HTML</a> [20] .....	24
18. ÁBRA: A MODELLEZÉSHEZ HASZNÁLT PARAMÉTEREK ÉRTÉKEI .....	25
19. ÁBRA: EGYES MODELL GEOMETRIAI KIALAKÍTÁSA .....	26
20. ÁBRA: A SZOFTVER ÁLTAL KÉSZÍTETT ALAPHÁLÓ ÉS SŰRÍTETT HÁLÓ .....	27
21. ÁBRA: HÁLÓFÜGGETLENSÉGI VIZSGÁLAT KIÉRTÉKELÉSE .....	28
22. ÁBRA: HŐMÉRSÉKLETELOSZLÁS ÁBRÁZOLÁSA 3D-S MODELLEN A JELLEMZŐ METSZETEK MENTÉN .....	30
23. ÁBRA: HŐÁRAMSŰRŰSÉG ÁBRÁZOLÁSA 3D-S MODELLEN A JELLEMZŐ METSZETEK MENTÉN .....	30
24. ÁBRA: HŐMÉRSÉKLETELOSZLÁS A KONZOL MENTÉN .....	30
25. ÁBRA: HŐÁRAMSŰRŰSÉG VÁLTOZÁSA A KONZOL MENTÉN .....	30
26. ÁBRA: HŐMÉRSÉKLETELOSZLÁS VÍZSZINTES METSZETEN .....	31
27. ÁBRA: HŐÁRAMSŰRŰSÉG VÁLTOZÁSA VÍZSZINTES METSZETEN .....	31
28. ÁBRA: HŐMÉRSÉKLETELOSZLÁS FÜGGŐLEGES METSZETEN .....	31
29. ÁBRA: HŐÁRAMSŰRŰSÉG VÁLTOZÁSA FÜGGŐLEGES METSZETEN .....	31
30. ÁBRA: HŐÁRAMVEKTOROK IRÁNYA ÉS INTENZITÁSA A RÖGZÍTÉSEK MENTÉN VÍZSZINTES METSZETEN .....	32
31. ÁBRA: HŐÁRAMVEKTOROK IRÁNYA ÉS INTENZITÁSA A RÖGZÍTÉSEK MENTÉN FÜGGŐLEGES IRÁNYBAN .....	32
32. ÁBRA: HŐHÍDMEGSZAKÍTÓVAL RENDELKEZŐ MODELLEK HŐHÍDKATALÓGUSA .....	33
33. ÁBRA: AZ ADATOK SZŰRÉSÉT SEGÍTŐ LEGÖRDÜLŐ LISTA .....	33

34. ÁBRA: 1 DB 1CM-ES ÁTMÉRŐJŰ DÜBEL TÉGLAFALBAN.....	34
35. ÁBRA: 1 DÜBELLEL RÖGZÍTETT HŐHÍDMEGSZAKÍTÓ KONZOLTALP MÖGÖTT TÉGLAFALBAN .....	35
36. ÁBRA: 1 DÜBELLEL RÖGZÍTETT 6 CM MAGAS KONZOL VASBETON FALBAN .....	35
37. ÁBRA: LOGARITMIKUS KAPCSOLAT A FAL HŐVEZETÉSI TÉNYEZŐJE ÉS X-ÉRTÉKEK KÖZÖTT.....	36
38. ÁBRA: 20 CM-ES $\lambda=2$ W/MK VASBETON FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,06x0,06x0,004 KONZOL .....	37
39. ÁBRA: 20 CM-ES $\lambda=2,5$ W/MK VASBETON FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,06x0,06x0,004 KONZOL .....	37
40. ÁBRA: 20 CM-ES $\lambda=2,5$ W/MK VASBETON FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,2x0,1x0,008 KONZOL	38
41. ÁBRA: 20 CM-ES $\lambda=2,5$ W/MK VASBETON FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,2x0,1x0,008 KONZOL	39
42. ÁBRA: 30 CM-ES $\lambda=0,07$ W/MK TÉGLA FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,06x0,006x0,004 KONZOL .....	39
43. ÁBRA: 30 CM-ES $\lambda=0,19$ W/MK TÉGLA FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,06x0,006x0,004 KONZOL .....	40
44. ÁBRA: 30 CM-ES $\lambda=0,07$ W/MK TÉGLA FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,06x0,006x0,004 KONZOL .....	40
45. ÁBRA: 30 CM-ES $\lambda=2,5$ W/MK VASBETON FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,06x0,006x0,004 KONZOL .....	40
46. ÁBRA: 30 CM-ES $\lambda=0,07$ W/MK TÉGLA FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,2x0,1x0,008 KONZOL ...	41
47. ÁBRA: 30 CM-ES $\lambda=0,19$ W/MK TÉGLA FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,2x0,1x0,008 KONZOL ...	41
48. ÁBRA: 30 CM-ES $\lambda=0,64$ W/MK TÉGLA FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,2x0,1x0,008 KONZOL ...	42
49. ÁBRA: 30 CM-ES $\lambda=2,5$ W/MK VASBETON FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,2x0,1x0,008 KONZOL	42
50. ÁBRA: 20 CM-ES $\lambda=2$ W/MK VASBETON FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,06x0,06x0,004 KONZOL .....	43
51. ÁBRA: 20 CM-ES $\lambda=2,5$ W/MK VASBETON FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,06x0,06x0,004 KONZOL .....	43
52. ÁBRA: HŐÁRAMSŰRŰSÉG VÁLTOZÁSA HŐHÍDMEGSZAKÍTÓ ALKALMAZÁSA ESETÉBEN .....	44
53. ÁBRA: HŐÁRAMSŰRŰSÉG VÁLTOZÁSA HŐHÍDMEGSZAKÍTÓ ELHAGYÁSA ESETÉBEN.....	44
54. ÁBRA: HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS HŐHÍDMEGSZAKÍTÓ ALKALMAZÁSA ESETÉBEN .....	44
55. ÁBRA: HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS HŐHÍDMEGSZAKÍTÓ ELHAGYÁSA ESETÉBEN.....	44
57. ÁBRA: 30 CM-ES $\lambda=0,07$ W/MK TÉGLA FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,06x0,06x0,004 KONZOL	45
58. ÁBRA: 30 CM-ES $\lambda=2,5$ W/MK VASBETON FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,06x0,06x0,004 KONZOL .....	46
59. ÁBRA: 30 CM-ES $\lambda=0,64$ W/MK TÉGLA FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,06x0,06x0,004 KONZOL	46
60. ÁBRA: 30 CM-ES $\lambda=0,19$ W/MK TÉGLA FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT 0,06x0,06x0,004 KONZOL	46
61. ÁBRA: HŐÁRAMSŰRŰSÉG VÁLTOZÁS HŐHÍDMEGSZAKÍTÓVAL RENDELKEZŐ MODELL ESETÉBEN .....	47
62. ÁBRA: HŐÁRAMSŰRŰSÉG VÁLTOZÁSA HŐHÍDMEGSZAKÍTÓVAL NEM RENDELKEZŐ MODELL ESETÉBEN.....	47
63. ÁBRA: HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS HŐHÍDMEGSZAKÍTÓVAL RENDELKEZŐ MODELL ESETÉBEN .....	47
64. ÁBRA: HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS HŐHÍDMEGSZAKÍTÓVAL NEM RENDELKEZŐ MODELL ESETÉBEN.....	47
65. ÁBRA: 20 CM-ES $\lambda=0,04$ W/MK HŐSZIGETELÉSSSEL ELLÁTOTT 20 CM-ES $\lambda=2$ W/MK VASBETON FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT HŐHÍDMEGSZAKÍTÓ NÉLKÜLI KONZOLOK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA .....	48
66. ÁBRA: 20 CM-ES $\lambda=0,04$ W/MK HŐSZIGETELÉSSSEL ELLÁTOTT 30 CM-ES $\lambda=0,19$ W/MK TÉGLA FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT HŐHÍDMEGSZAKÍTÓ NÉLKÜLI KONZOLOK ÖSSZEHAJONLÍTÁSA .....	48

67. ÁBRA: 20 CM-ES $\lambda=0,04$ W/MK HŐSZIGETELÉSSSEL ELLÁTOTT 20 CM-ES $\lambda=2$ W/MK VASBETON FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT HŐHÍDMEGSZAKÍTÓVAL ELLÁTOTT KONZOLOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA .....	49
68. ÁBRA: 20 CM-ES $\lambda=0,04$ W/MK HŐSZIGETELÉSSSEL ELLÁTOTT 30 CM-ES $\lambda=0,19$ W/MK TÉGLA FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT HŐHÍDMEGSZAKÍTÓVAL ELLÁTOTT KONZOLOK ÖSSZEHASONLÍTÁSA .....	49
69. ÁBRA: HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐK KÖZÖTTI %-OS ELTÉRÉS 30 CM VASTAG FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT HŐHÍDMEGSZAKÍTÓVAL ELLÁTOTT KONZOLOK ESETÉN.....	51
70. ÁBRA: HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐK KÖZÖTTI %-OS ELTÉRÉS 30 CM VASTAG FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT HŐHÍDMEGSZAKÍTÓ NÉLKÜLI KONZOLOK ESETÉN .....	52
71. ÁBRA: HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐK KÖZÖTTI %-OS ELTÉRÉS 20 CM VASTAG FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT HŐHÍDMEGSZAKÍTÓVAL ELLÁTOTT KONZOLOK ESETÉN.....	52
72. ÁBRA: HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐK KÖZÖTTI %-OS ELTÉRÉS 20 CM VASTAG FALBA 1 DB 15 CM-ES $\lambda=50$ W/MK DÜBELLEL RÖGZÍTETT HŐHÍDMEGSZAKÍTÓ NÉLKÜLI KONZOLOK ESETÉN .....	52
73. ÁBRA: EGYES TÉGLA MODELLEKHEZ TARTOZÓ PARAMÉTEREK .....	54
74. ÁBRA: KORREKCIÓS SZORZÓ KERESÉSE TÉGLA MODELLEK ESETÉBEN.....	54
75. ÁBRA: KORREKCIÓS SZORZÓKAT TARTALMAZÓ TÁBLÁZAT TÉGLA TARTÓFAL ESETÉBEN .....	55
76. ÁBRA: EGYES VASBETON MODELLEKHEZ TARTOZÓ PARAMÉTEREK.....	56
77. ÁBRA: KORREKCIÓS SZORZÓ KERESÉSE VASBETON MODELLEK ESETÉBEN .....	56
78. ÁBRA: KORREKCIÓS TÉNYEZŐK VASBETON MODELLEK ESETÉBEN .....	57

## 2. Absztrakt

### 2.1. Absztrakt

Manapság nagyban megváltozott a városok utcaképe, mivel egyre több újépítésű, valamint felújított épület homlokzatán figyelhetünk meg különböző színű, anyagú, textúrájú átszellőztetett homlokzatburkolati kialakításokat. Ezen rendszerek elterjedése nem csak esztétikai tulajdonságaiknak köszönhető, hanem mechanikai és akusztikai védelmet biztosítanak a homlokzatnak, valamint csökkentik az adott épület energiaigényét. Azonban fontos megemlíteni, hogy a legtöbb épületenergetikával foglalkozó szakirodalomban, valamint a tervezési munkálatok során is elhanyagolják a hátszerkezet rögzítő elemek által okozott pontszerű hőhidakat. Ezek hatása a homlokzatra számolt hőátbocsátási tényezőre még hőhídmegszakítók használatával is jelentős mértékű és hazánkban a 7/2006 TNM rendelet értelmében figyelembe kellene vennünk a homlokzati falszerkezetek rétegtervi hőátbocsátási tényezőjében. Az elhanyagolás egyik oka, hogy az MSZ EN ISO 6946:2017, azaz a hőátbocsátási tényezők számítására vonatkozó szabvány nem tartalmaz egyszerűsített számítási módszert, hanem az MSZ EN ISO 10211:2017 szabvány szerinti háromdimenziós numerikus szimulációt kell alkalmazni, ami jelenleg nem elterjedt széleskörben a szakmában. Ezen szabványbeli hiányosságok és számítási nehézségek indokoltá teszik egy hőhídkatalógus és akár egy új, a pontszerű hőhidak hatásait is figyelembe vevő korrekciós képlet kidolgozását.

A kutatást nemzetközi szakirodalom tanulmányozásával kezdtem, majd pedig összegyűjtöttem a modellezéshez szükséges különböző paraméterek lehetséges értékeit. Összesen 30 eltérő geometriai modellt készítettem Comsol Multiphysics végeleemes hőtechnikai szimulációs szoftver segítségével. A modellek kialakítása során eltérő vastagságú téglá-, valamint vasbetonfalakat, különböző anyagú és vastagságú hőszigeteléseket, többféle geometriai mérettel ellátott fix és csúszóponti kialakítású dübelezett alumínium és acél tartókonzolókat, valamint a hőhídmegszakítók hatását vizsgáltam, törekedve arra, hogy minél több a valóságban is előforduló rendszert figyelembe vegyek. Ezen változó paraméterek bevitele után hálófüggetlenségi vizsgálatot végeztem, hogy megtudjam a végeleemes hálófelbontás mennyire befolyásolja a kapott eredményeket, valamint a futtatási időket. A létrehozott geometriai modellek felhasználásával több tízezer végeleemes futtatás során határoztam meg az egyes geometriai modell és paraméterkombinációk rétegtervi hőátbocsátási tényezőjét, valamint a tartókonzolok hőtechnikai hatását.

A dolgozat célja egy hőhídkatalógus létrehozása, amely figyelembe veszi a nemzeti sajátosságokat (értem ez alatt például, hogy hazai vázkerámia falazóblokkokat használtunk), továbbá esetleg egy olyan hőátbocsátási tényező korrekciós képlet meghatározása, amely a burkolatrögzítések hőtechnikai hatásával is számol és egyszerűsített számításokra is alkalmazható legyen a 3D-s végeleemes szimulációk helyett. Ennek kidolgozásához elvégeztem egy paraméterfüggetlenségi vizsgálatot a meglévő adatokból, ami segítségével megállapítható, hogy mely paraméterek azok, amelyek változása nagyban befolyásolja az épület homlokzatára számolt hőátbocsátási tényező értékét.

## **2.2. Summary**

Nowadays, the street image of the cities has changed a lot, as we can observe ventilated facade designs of different colours, materials and textures on the facades of more and more newly built and renovated buildings. The prevalence of these systems is not only due to their aesthetic properties, but also provide mechanical and acoustic protection for the facade and reduce the energy demand of a given building. However, it is essential to mention that point thermal bridges of bracket fasteners and anchors are usually neglected in almost all scientific literature in the field of building energy performance and in practical design tasks. The fastening systems of the ventilated facade claddings have a significant effect on the thermal transmittance of the facades even with the use of thermal breaks and according to the Hungarian 7/2006 TNM regulations, point thermal bridges should be taken into account in the thermal transmittance of façade walls. The reason behind practitioners neglects the TNM decree is that MSZ EN ISO 6946:2017, the standard for the calculation of thermal transmittances does not contain a simplified calculation method and there are no available national tabulated catalogues that have point thermal bridges. Nowadays, we can calculate the effect of fastening systems using three-dimensional numerical simulation according to the MSZ EN ISO 10211: 2017 standard, which is currently not widespread. The shortcomings and computational difficulties of this standard justify the development of a thermal bridge catalogue and even a new equation that takes into account the effects of point thermal bridges.

I started the research by studying international scientific literature and then collected the possible values of the different parameters required for modelling the fastening systems. I created a total of 30 geometric models using Comsol Multiphysics finite element simulation software. During the design of the models, I examined different brick and reinforced concrete

walls, thermal insulations, aluminium and steel fixed and siding-type bracket fasteners and the effect of the thermal breaks. I tried to take into account as many cases as possible based on the existing fastening system. After entering these variable parameters, firstly, I performed a mesh independence study to find out how much the finite element mesh resolution affects the results and run times. Using the created geometric models, I defined the thermal transmittance of each geometric model and parameter combination, as well as the point thermal bridge generated by the brackets during tens of thousands of finite element simulations.

The aim of this study is to create a thermal bridge catalogue that takes into account national specifics (e.g. Hungarian ceramic masonry blocks) and to determine an equation that is capable of handling the thermal effect of fastening elements and can be used during simplified calculations. To develop this, I performed a parameter independence study from the results of the simulations, that can be used to determine which parameters are the ones whose change dramatically affects the value of the thermal transmittance calculated of the façade of the building.



### 3. Bevezetés

A legtöbb újonnan épülő irodaház, illetve felújítás alatt álló épület kedvelt homlokzatképzési formája a szerelt, hátul szellőztetett légréteges szerkezet, ezekre jó példa az 1.[1] és 2.[2] ábrán látható budapesti irodaépület és felújított kápolna. A burkolat anyaga igen széles skálán mozog, a gyártók katalógusaiban találhatunk mázas kerámiát, fémlaszt, szálcementet, kőlapot, kompozitot és műanyag táblákat is. A külső kéreg tulajdonképpen napernyő-esernyő elven működik, melynek feladatai közé tartozik a külső mechanikai hatások, meteorológiai terhek felvétele, ezáltal a hőszigetelés és a belső tér védelme. A következő réteg maga az alul-felül nyitott kialakítású szellőző légréteg, amelyben a



1. ábra: Infopark D épület (Budapest) téglahomlokzatképzéssel

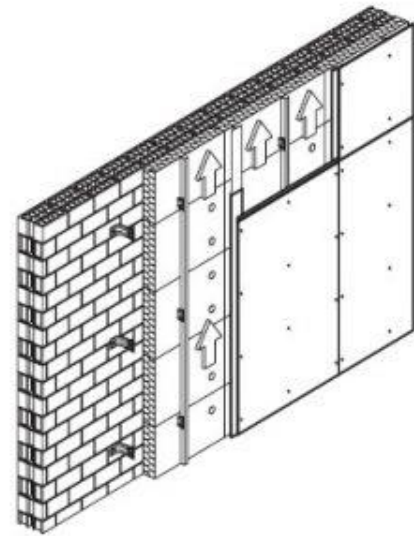
<http://hap.hu/portfolio/irodaepulet-d-bp-xi-infopark/>



2. ábra: Luther-kápolna (Budapest) szálcement homlokzatképzéssel <https://www.equitone.com/hu>

levegő a kürtőhatás következtében alulról-felfelé áramlik, így télen az áramló levegő elszállítja a belső terekből átdiffundálódott páramennyiséget, míg nyáron hőpajzsként viselkedik, ezzel javítva a homlokzat hőcsillapítását. Ahhoz, hogy ez a hatás és ez által a kiszellőzés biztosítva legyen jellemzően minimum 4 cm vastagságú légréteg felvétele szükséges, de ez függ többek között az épületmagasságtól és a homlokzati fal szélességétől is. A megfelelő légrétegvastagság megválasztása épületszerkezettanilag is fontos és nem elhanyagolható, ugyanis itt tudjuk kompenzálni a tartófal és a burkolati táblák mérettűrésének különbségeit. Fontos megjegyezni, hogy a kürtőhatás miatt nagy figyelmet kell szentelni a tűzvédelemnek, ugyanis a tűz sokkal könnyebben tud terjedni ezekben az átszellőző légrétegekben a felfelé áramló levegő miatt, így fontos, hogy nem éghető anyagú hőszigetelést válasszunk. (Ez alól kivételt képez a lábazon elhelyezett zárt cellás extrudált polisztirol tábla.) A táblákat a lábazon ragasztással, a homlokzaton mechanikai rögzítéssel, azaz dübelekkkel kell hozzáerősíteni a teherhordó szerkezethez, ezt megelőzően kell a tartókonzolokat beépíteni, hogy ne utólag kelljen megvágni a hőszigetelő táblákat. A beszellőzési keresztmetszet kialakításánál törekedni kell a sávyszerű, ellenállásmentes, magával a szellőző keresztmetszettel azonos kialakításra, hiszen a megfelelő szellőzési intenzitás megakadályozza a nedvesség kicsapódását a burkolat belső oldalán,

viszont a túl gyors hőáramlás hideg időben túl sok hőt szállít el a falfelületekről, emiatt különösen ajánlott az optimális légréteg vastagság és kiszellőzési keresztmetszet meghatározása. A légréteg mögött helyezkedik el a homlokzati hőszigetelés, amely anyaga legtöbb esetben ásványgyapot, melynek nyitott szálszerkezete miatt ajánlott nagyobb testsűrűségű változatot választani, hogy a hőszigetelésben található levegő nyugalomban maradjon és ne kezdjen el áramolni, ezzel rontva a hőszigetelő hatását az anyagnak. Ennek biztosítására ajánlott valamilyen kasírozással ellátott, kifejezetten átszellőztetett homlokzatburkolati rendszerekhez gyártott hőszigetelést választani, ám még így is kerülhet nedvesség a hőszigetelő táblák mögé, ezért fontos, hogy az anyag víztaszító is legyen. A rendszer felépítését a 3.ábra szemlélteti.



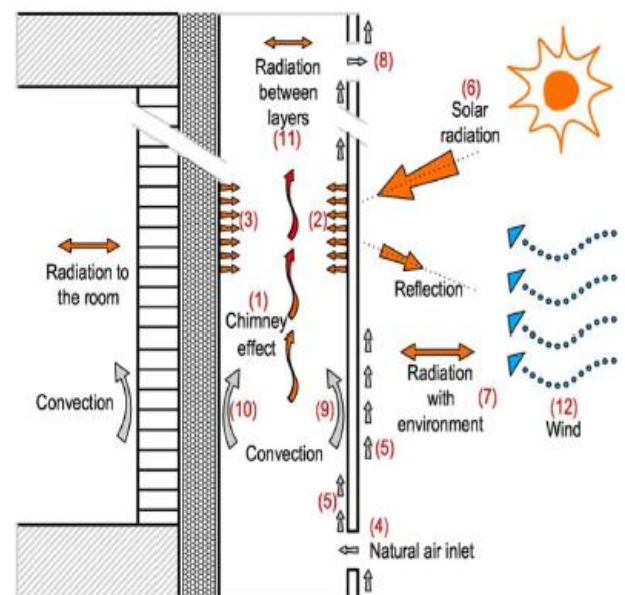
3. ábra: A homlokzatburkolati rendszer felépítése

<https://www.epitesimegoldasok.hu/a-szerelt-atszelloztetett-homlokzat-kinalta-tervezoi-szabadsag.html>

Az átszellőztetett homlokzatburkolatok működési elve a 4.ábra [3] szerint a következő:

- a légrétegben lévő levegő (1) hőt von el a faltól (3) és a külső burkolati rétegről (2) (hővezetés), így felmelegszik és a légréteg hossza mentén felemelkedik
- a légrétegbe az alsó lyukakon (4) beáramló levegő a környezeti (7) és a szoláris sugárzás (6) révén felmelegszik és felemelkedik
- amikor a légrétegben lévő levegő hőmérséklete meghaladja a környezet hőmérsékletét kilép a fenti lyukakon (8) és hőt von el a légrétegből (konvekció)
- a légrétegben a légmozgást nem csak a szoláris sugárzás és a kürtőhatás (9, 10) befolyásolja, hanem a szél is (12)

M. Ibañez-Paj et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79 (2017) 180–191



4. ábra: Átszellőztetett homlokzatburkolatok működési elve [3]

Összefoglalva, hogy mik a legelőnyösebb tulajdonságai az átszellőztetett homlokzatburkolatok használatának, a következőket mondhatjuk:

- külső védőpajzsként működik – megvédi és szárazon tartja falakat és a hőszigetelést az időjárási viszonyoktól, ezzel hosszabb élettartamot biztosítva az épületnek
- csökkenti a falak hőigénybevételét és hőmozgását
- „lélegzik” az épület – szárazon tartja az épületet, így nedvesség hatására sem romlik a hőszigetelő képesség és a páraáteresztés
- hangvédelmi hatása kedvező a tömeg-rugó-tömeg (szerkezet-légrés-burkolat) szerkesztési elv miatt
- nem keletkeznek repedések a burkolaton az épület mozgásából adódóan
- száraz technológiával készül, így egész évben alkalmazható, ha a körülmények megengedik
- energiamegtakarításának köszönhetően hozzájárul a CO<sub>2</sub> kibocsátás csökkentéséhez
- takarékos működés, csekély karbantartási igény

## 4. Szakirodalmi áttekintés, alapismeretek

Jelen dolgozatban a szimulációk és a számítások során nem foglalkozom az átszellőző légréteg hatásával, mivel a hatályos szabványok ennek elhanyagolását kérik. Az MSZ EN ISO 6946:2017[4] szabvány 6.9.4. fejezete szerint az intenzíven kiszellőztetett légrétegek hőtechnikai hatása és a sík felületekből kiálló részek elhanyagolhatók, amennyiben a hővezetési tényezőjük értéke meghaladja 2,5 W/mK értéket. A légrétegekkel és a légrétegben áramló levegő hatásának kísérleti és numerikus modellezésével több külföldi kutatás is foglalkozik [3][5], ám a tartókonstrukciók hőtechnikai hatását jellemzően ezekben a cikkekben is elhanyagolják.

### 4.1. Hőátbocsátási tényező definiálása

Tanulmányozva az átszellőztetett homlokzatburkolatok hőtechnikai tulajdonságait és ebből eredő előnyeit felmerült a kérdés, hogy vajon mennyire pontosak azok az energetikai számítások, amelyekkel alátámasztották ezen rendszerek előnyeit. Ahhoz, hogy ezt megtudjuk először meg kell ismerni az alapfogalmakat és az érvényben lévő szabályozásokat. A legfontosabb mérőszám, amelyet energetikai minősítéskor használnak a hőátbocsátási tényező, amely azt mutatja meg, hogy egységnyi felületen mennyi energia távozik zárt térből egységnyi idő alatt a szerkezetekkel érintkező közegek hőmérsékletének egységnyi különbsége mellett, azaz az épület hővezetési képességét jellemzi. Jele: U, mértékegysége: W/m<sup>2</sup>K. Magyarországon a különböző épülethatároló szerkezetekre számolt hőátbocsátási tényezőre vonatkozó követelményeket a 7/2006-os TNM [6]rendelet tartalmazza, mely értékeknek akkor kell teljesülniük, ha új épületet építünk vagy jelentős felújítást végzünk. A követelményértékeket az 5.ábra szerint a következők:

Ssz	Épülethatároló szerkezet	Hőátbocsátási tényező követelményértéke U [W/m <sup>2</sup> K]
1	Homlokzati fal	0,24
2	Lapostető	0,17
3	Fűtött tetőteret határoló szerkezetek	0,17
4	Padlás és búvótér alatti födém	0,17
5	Árkád és áthajtó feletti födém	0,17
6	Alsó zárófödém fűtetlen terek felett	0,26
7	Úvegezés	1
8	Különleges úvegezés*	1,2
9	Fa vagy PVC keretszerkezetű homlokzati úvegezett nyílászáró	1,15
10	Fém keretszerkezetű homlokzati úvegezett nyílászáró	1,4
11	Homlokzati üvegfal, függönyfal	1,4
12	Úvegtető	1,45
13	Tetőfelülvilágító, füstelvezető kupola	1,7
14	Tetőszik ablak	1,25
15	Ipañ és tűzgátló ajtó és kapu (fűtött tér határolására)	2
16	Homlokzati, vagy fűtött és fűtetlen terek közötti ajtó	1,45
17	Homlokzati, vagy fűtött és fűtetlen terek közötti kapu	1,8
18	Fűtött és fűtetlen terek közötti fal	0,26
19	Szomszédos fűtött épületek és épületrészek közötti fal	1,5
20	Lábazati fal, talajjal érintkező fal a terepszinttől 1 m mélységgig	0,3
21	Talajon fekvő padló (új épületeknél)	0,3
22	Hagyományos energiagyűjtő falak (pl. tömegfal, Trombe fal)	1

5. ábra: 2018.01.01-től érvényes hőátbocsátási tényező értékek a különböző épületszerkezetekre

#### 4.2. Korrigálatlan hőátbocsátási tényező számítása

Első lépésként meg kell határozni az adott szerkezeti elemre számolt korrigálatlan hőátbocsátási tényezőt, ekkor a számításnál nem vesszük figyelembe a különböző rögzítőelemek által okozott hőhidak hatását a hőátbocsátási tényezőre.

$$U = \frac{1}{R_{se} + \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{si}} \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right] \quad (1)$$

ahol:

- belső oldali ellenállás:  $R_{si} = \frac{1}{h_{ci} + h_r} \left[ \frac{m^2 * K}{W} \right]$ 
  - konvekciós tag:  $h_{ci}$  – hőáram irányától függő tényező
    - $h_{ci} = 5 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$  – felfelé irányuló hőáram esetén
    - $h_{ci} = 2,5 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$  – vízszintesen irányuló hőáram esetén
    - $h_{ci} = 0,7 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$  – lefelé irányuló hőáram esetén
  - sugárzásos tag:  $h_r = \varepsilon * 4 * \sigma * T_m^3$ 
    - $\varepsilon$ : felület emissziós tényezője
    - $\sigma$ : Stefan-Boltzmann állandó
    - $T_m^3$ : a felület és a környezet átlagos termodinamikai hőmérséklete
- külső oldali ellenállás:  $R_{se} = \frac{1}{h_{ce} + h_r} \left[ \frac{m^2 * K}{W} \right]$ 
  - konvekciós tag:  $h_{ce} = 4 + 4 * v$ 
    - $v$ : a felületet támadó szél m/s-ban
  - sugárzásos tag:  $h_r = \varepsilon * 4 * \sigma * T_m^3$ 
    - $\varepsilon$ : felület emissziós tényezője
    - $\sigma$ : Stefan-Boltzmann állandó
    - $T_m^3$ : a felület és a környezet átlagos termodinamikai hőmérséklet
- i-edik réteg hővezetési tényezője:  $\lambda_i \left[ \frac{W}{m * K} \right]$

A hőáram a hőmérsékletkülönbséggel, a hőáram irányára merőleges keresztmetszettel, valamint egy vezetési tényezővel arányos. Ez utóbbi a hővezetési tényező, amely azt fejezi ki, mekkora hőáram halad át időegység alatt egységnyi vastagságú, az áramlásra merőlegesen egységnyi

felülettel bíró anyagon, egységnyi hőmérsékletkülönbség hatására. Adott anyag hővezetési tényezőjét különféle szabvány-illetve gyári katalógusokból kaphatjuk meg.

- i-edik réteg vastagsága:  $d_i$  [m]

### 4.3. Korrigált hőátbocsátási tényező számítása

A valóságban azonban a külső térelhatároló szerkezeteink különféle ismétlődő vonalmenti vagy pontszerű inhomogenitást tartalmaznak, az időjárásnak és így a nedvességnek kitettek, valamint jó eséllyel nem tökéletes kivitellel készülnek el, így a hőátbocsátási tényezőt ezen tényezők figyelembevételével korrigálni kell. A 7/2006 TNM rendelet[6] így rendelkezik: „A rétegterv hőátbocsátási tényezőjét befolyásoló tényezők számításba vételére megfelelő megoldás az MSZ EN ISO 6946:2017 [4] szabvány szerinti vagy azzal azonos eredményt adó számítás.”

A szabvány szerint a rétegtervi U érték a szerkezeten belüli hőszigetelő anyagok kitettsége, a szerkezeten belüli hibák, inhomogenitások, mechanikai rögzítések stb. alapján a következő képlet alapján számítható:

$$U = \frac{1}{R_{se} + \sum_i \frac{d_i}{\lambda_{2,i}} + R_{si}} + \underbrace{\Delta U_f + \Delta U_g + \Delta U_r}_{\text{korrekciós tényezők}} + \underbrace{\sum_j l_j * \psi_j + \sum_k n_k * \chi_k}_{\text{hőhidak hatását figyelembe vevő tényezők}} \quad (2)$$

Az eltérés a korrigálatlan U értékhez képest, hogy a hővezetési tényező a tervezési értékével szerepel, illetve, hogy több korrekciós tényező és a különféle ismétlődő hőhidak hatásait figyelembe vevő tag is megjelenik a képlet jobb oldalán. Ismétlődő hőhidakról beszélünk olyan többdimenziós hőáramok esetén, amelyek a felület nagyságával arányos számban fordulnak elő, ide sorolhatók például a kutatás során vizsgált homlokzatburkolati rögzítőelemek is.

Korrekciók az MSZ EN ISO 6946:2017 [4] szerint:

- Inhomogén rétegek
- Változó vastagságú réteg
- Mechanikai rögzítőelemek
- Hézagok, légüregek
- Fordított rétegtrendű lapostető

Amennyiben a korrekció értéke nem haladja meg a teljes korrekció értékének 3%-át, úgy a szabvány lehetővé teszi a rögzítések, valamint a szigetelésben előforduló légüregek hatásainak elhanyagolását.

Eljárások mechanikai rögzítőelemek által okozott hőhidak figyelembevételére:

- egyszerűsített eljárás: MSZ EN ISO 6946:2017 [4] szerinti módszer:  $\Delta U_f$
- részletes eljárás: MSZ EN ISO 10211:2017[7] szerinti numerikus szimuláció: pontszerű hőátbocsátási tényező

#### 4.3.1. Egyszerűsített eljárás

Az egyszerűsített eljárás során a korrigált hőátbocsátási tényező:

$$U_e = U + \Delta U \quad (3)$$

$$\Delta U = \Delta U_f + \Delta U_g + \Delta U_r \quad (4)$$

ahol:

$\Delta U_f$ : mechanikai rögzítőelemekre vonatkozó korrekciós tényező

$\Delta U_g$ : hézagokra vonatkozó korrekciós tényező

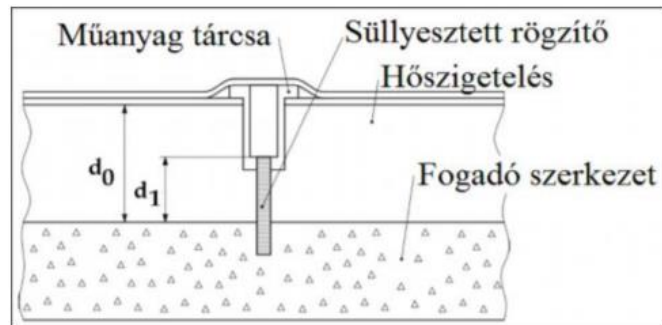
$\Delta U_r$ : fordított rétegrendű tetőkre vonatkozó korrekciós tényező

Jelen kutatás során a homlokzatburkolatok rögzítőelemeinek hőtechnikai hatását vizsgáltam, így a továbbiakban a mechanikai rögzítőelemekre vonatkozó korrekcióval foglalkoztam. Ez a korrekció azonban a dübelek hatását veszi csak figyelembe, a tartókonzolok rögzítései által okozott pontszerű hőhidakkal nem foglalkozik.

$$\Delta U_f = \alpha * \frac{n_{ab} * A_f * \lambda_f}{d_0} * \left(\frac{R_1}{R_{th}}\right)^2 \left[\frac{W}{m^2 * K}\right] \quad (5)$$

ahol:

- $\alpha = 0,8$  ha a rögzítő teljesen átszúrja a hőszigetelő réteget
- $\alpha = 0,8 * \frac{d_1}{d_0}$  ha a rögzítő elem süllyesztett, amit a 6. ábra illusztrál
  - o  $d_0$ : hőszigetelő réteg vastagsága
  - o  $d_1$ : hőszigetelést átszűrő rögzítőelem hossza



6. ábra: Süllyesztett rögzítés

- $n_{db}$ : rögzítőelemek egy négyzetméterre jutó darabszáma
- $A_f$ : egy rögzítőelem keresztmetszeti területe  $m^2$ -ben
- $\lambda_f$ : rögzítőelem hővezetési tényezője
- $R_1 = \frac{d_0}{\lambda_{hőszigetelés}}$  a rögzítés által átszúrt hőszigetelés hővezetési tényezője
- $R_{th} = R_{se} + \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{si}$  a keresztmetszet korrigálatlan hővezetési ellenállása

#### 4.3.2. Numerikus számítási módszer

Numerikus módszer vagy numerikus modellezés segítségével olyan részletes számításokat is el tudunk végezni, amelyek figyelembe veszik a többdimenziós hőáramok hatását. Alapesetben 3 irányú hőáramokról beszélhetünk például az épület háromdimenziós sarkainak elemzésénél, ám a valóságban jellemzően a kivitelezés sajátossága miatt egy irányban egyenletes az építés, így a 3D-s hőáramok nincsenek jelentős hatással a hőátbocsátási tényezőre. Ennek következtében sokszor elegendő csak 2D-s szimulációt alkalmazni az U-érték számításához, de ez alól kivételt képeznek a pontszerű rögzítések vizsgálata, amely esetben mindig 3D-s szimulációt kell alkalmazni. A szimulációk során számos matematikai módszer alkalmazható, beleértve a végelem (FEM), a véges differenciál (FDM) vagy a határintegrációs (BEM) számításokat.[8] Amennyiben a számításaink során a transzmissziós veszteségeknél a pontszerű hőhidakat is szeretnénk figyelembe venni, úgy egyszerűsített számítási módszer hiányában numerikus szimulációt kell alkalmaznunk. A számítás módszertanát, a határfeltételeket és a szükséges pontosságot az ISO 10211:2017 [7] szabvány írja elő. A pontszerű hőhidak viselkedése a



pontbeli hőátbocsátási tényezővel írhatjuk le, amely jelen esetben megmutatja, hogy egy darab rögzítőelem egységnyi hőmérsékletkülönbség hatására (1/K) mekkora többlet hőáramot (W) okoz. Számítása a numerikus szimuláció során az egész 3D-s elemre számolt hőáramok és a pontbeli hőhidak elhanyagolásával kapott hőáramok különbségén alapszik. Jele:  $\chi$ , mértékegysége: W/K.

$$\chi = L_{3D} - \sum_{i=1}^{N_i} U_i * A_i - \sum_{j=1}^{N_j} \psi_j * l_j \quad (6)$$

ahol:

- $L_{3D}$ : 3D-s pontszerű hőhidak figyelembevételével a végeselemes szimulációval számolt hőátbocsátási tényező [W/m<sup>2</sup>K]
- $U_i$ : 3D-s pontszerű hőhidak elhanyagolásával számolt hőátbocsátási tényező [W/m<sup>2</sup>K]
- $A_i$ : a vizsgált elemrész területe [m<sup>2</sup>]

Ahhoz, hogy meghatározzuk  $\chi$  értékét, ki kell számolni az ismétlődő hőhidak által okozott hőveszteségeket a rögzítőelemek hatásainak figyelembevételével (H), illetve ezek elhanyagolásával (H<sub>s</sub>) és a két érték különbségéből megkapjuk a pontbeli hőátbocsátási tényezőt.

$$\chi = H - H_s \quad (7)$$

A rögzítőelemek által okozott hőveszteségeket a hőátbocsátási tényezővel tudjuk számításba venni. Mivel a rögzítőelemek ismétlődően fordulnak elő a homlokzaton, így hőtechnikai hatásuk  $\Delta U$  korrekciós tényezővel számolható, amennyiben megadjuk, hogy a vizsgált felület 1m<sup>2</sup>-én hány db rögzítőelem (n) szúrja át a hőszigetelő réteget.

$$\Delta U = \chi * n \quad (8)$$

Egyszerűsítés szempontjából a modellezés során 1 m<sup>2</sup> falfelületet vizsgáltam, amelyre 1 db (n) tartókonzolt helyeztem. Ebben az esetben a pontbeli hőátbocsátási tényező ( $\chi$ ) értéke megegyezik a korrigálatlan hőátbocsátási tényező (U) és a végeselemes program által számolt, a korrekciókat is figyelembe vevő hőátbocsátási tényező különbségével (L<sub>3D</sub>).

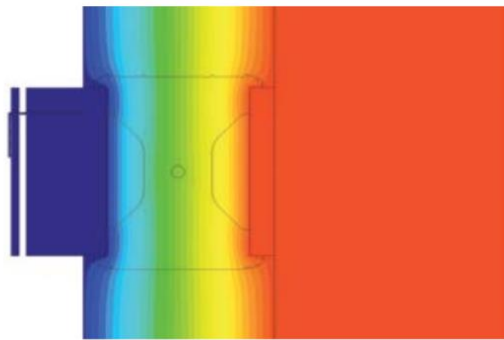
$$\Delta U = L_{3D} - U = \chi * 1 \text{ db/m}^2 \quad (9)$$

#### 4.4. Nemzetközi szakirodalom

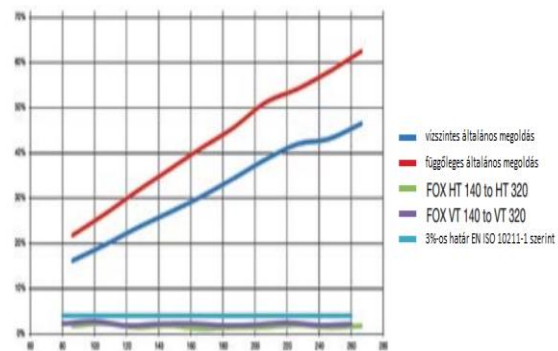
Az Európában használt ISO szabványok egyikében sem található a végeelemes szimulációkon vagy tapasztalati modellezésen kívül más ajánlás a rögzítőelemek hőtechnikai hatásainak figyelembevételére, emiatt több szakmabeli is próbálkozott egyszerűsítések kidolgozásával. A tanulmányozott szakirodalom többsége egyetért abban, hogy a pontszerű hőhidak elhanyagolása jelentős, akár 5-30%-os eltérést okozhat a vizsgált épület hőveszteségeinek számítása során. A legtöbb tanulmány azonban csak azzal foglalkozik, hogy mely paraméterek mennyire befolyásolják a hőátbocsátási tényező értékét, de csak az adatok kiértékeléséig jutottak, egyszerűsített számítási módszert nem fejlesztettek ki.

Az egyik legjelentősebb rögzítőelemeket gyártó nemzetközi cég, a Hilti kiadott egy segédletet[9], amelyben az általuk gyártott konzoltípusokat vizsgálta végeelemes szimulációval. Mind a hőhidak számítását, mind a numerikus számítást az MSZ EN ISO 10211:2017 [7] szabvány szerint végezték, azonban több eltérés is van a modellezési módszerben a hasonló kutatásoktól. Az egyik, hogy a modellezés során a mechanikai rögzítést ugyan ők hengerre egyszerűsítették, de ez két részből áll; a csavarból és a hüvelyből, így pontosabb eredményeket kaptak a szimuláció során. A másik különbség pedig, hogy a hőhídmege szakító lehetséges hővezetési tényezőit nem az MSZ EN ISO 10456:2007[10] szabvány szerinti értékekből választották, hanem azoknál jobb, a saját adatbázisukból vett értékeket feltételeztek, így a PA anyagú hőhídmege szakító esetén 0,3 W/mK hővezetési tényezővel, míg a PE anyagú hőhídmege szakító esetén 0,117 W/mK hővezetési tényezővel számoltak. A végeelemes szimuláció során a homlokzat 1m<sup>2</sup>-nyi felületét vizsgálták és megnézték, hogy a konzolok száma és anyagtulajdonságai, a hőszigetelés vastagsága és anyagtulajdonságai, valamint a hőhídmege szakító mennyire befolyásolja a konzolok által okozott pontbeli hőátbocsátási tényezőt. Eszerint az összes forgalomban lévő általuk gyártott konzolra és rendszermegoldásra létrehoztak egy-egy táblázatot, amelyből a felhasználók megkaphatják, hogy az általuk választott megoldással mennyire adódik a pontbeli hőátbocsátási tényező. A vizsgálatukból is jól látszik, hogy a rögzítések által okozott hőhidak elhanyagolása jelentős, akár 0,02-0,07 W/m<sup>2</sup>K-nyi eltérést is okozhat az egységnyi homlokzati felületre számolt U-érték esetében. Az egyik legjelentősebb faktor, ami befolyásolja a hőátbocsátási tényezőt jelen esetben a konzolok száma, anyaga és geometriája, így az is kiderült, hogy megfelelő anyagú konzol megválasztása esetén, az általuk okozott hőhidak miatti hőveszteség minimálisra csökkenthető. Ezek a speciálisan a hőhidak hatásának csökkentésére kifejlesztett

konzolok nem csak a szükséges hőszigetelés vastagságát tudják csökkenteni, de a számítások alapján az U értéket is akár 40%-al tudják javítani, ahogy ezt a 8.[7] ábrán látható grafikon is szemlélteti. Ezt a 7.[7] ábrán is látható izotermás kép is alátámasztja, ugyanis a virtuális modellen a speciális konzolok használatával egy olyan modell kapható, amelyen nem láthatók pontszerű hőhidak. A valóságban azonban olyan tényezők is befolyásolhatják a hőhidak kialakulását, amit a modellezés során nem tudunk figyelembe venni.



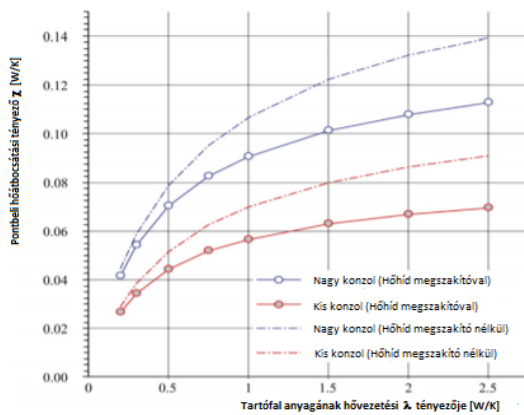
7. ábra: Egyenletes izotermás képet mutató modell



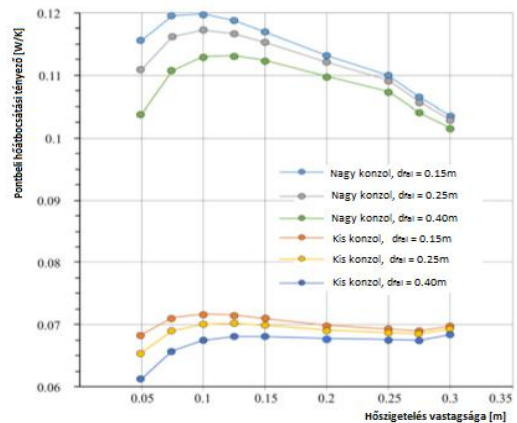
8. ábra: Az általános alumínium konzolok összehasonlítása a speciálisan a hőhidak hatásának csökkentésére tervezett konzolokkal

Anry Dodota[11] is vizsgálta a konzolok hővezetési tényezőjének és a hőszigetelő réteg vastagságának hatását a hőátbocsátási tényezőre és hasonló eredményekre jutott, mint az előzőleg említett Hilti tanulmány. A legjobb megoldás a pontbeli hőátbocsátási tényező csökkentésére, ha minél jobb hővezetési tényezőjű anyagú konzolt választunk, mint például a rozsdamentes acél vagy acél kompozit.

Theodosiou több cikkében[12][13][14] is vizsgálta, hogy a tartófal, a hőszigetelés, valamint a rögzítőelem anyag- és hőtechnikai tulajdonságait változtatva, illetve a hőhídmegszakító jelenléte mennyire van kihatással a pontszerű hőátbocsátási tényezőre. A 9.ábrán[12] látható, hogy a hőszigetelő réteg vastagságának növelése nem tudja hatékonyan kontrollálni a nagy hővezetési képességű konzolok és a rögzítőelemek által átszűrt hőszigetelés mentén kialakuló intenzív pontszerű hőhidakat. Másik fontos észrevétele, hogy a hőhídmegszakítók jelenléte sem képes jelentősen csökkenteni ezen hőhidak hatását a szerkezetre, amely észrevételt a 10.ábra [12] szemlélteti.

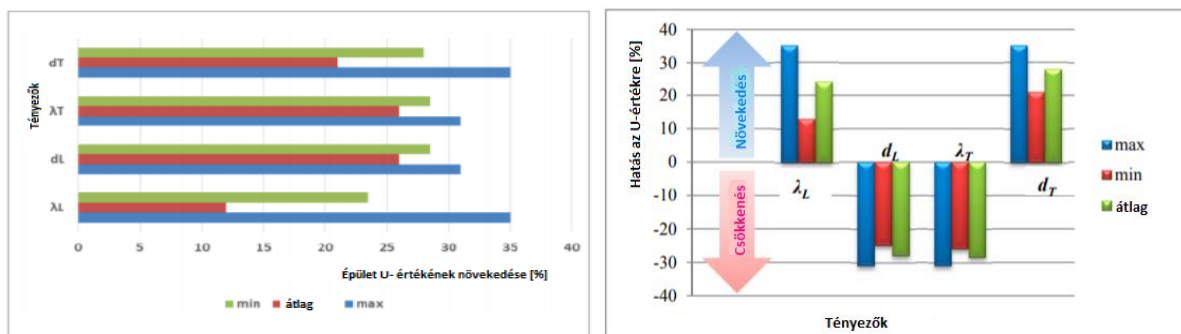


10. ábra: A höhídmegszakítók hatása a pontszerű hőátbocsátási tényezőre a tartófal anyagtulajdonságainak függvényében



9. ábra: A hőszigetelés vastagságának hatása a pontszerű hőátbocsátási tényezőre a falvastagság

Egy a litván Kaunasi Műszaki Egyetemhez köthető cikkben[15] is hasonlóan vizsgálták az eltérő anyag- és hőtechnikai tulajdonságok hatását a pontszerű hőátbocsátási tényezőre, ám a kutatás kiterjedt a grafikonok részletesebb elemzésére is. Minden vizsgált összefüggés esetében meghatározták az összefüggés típusát, a korrelációs tényezőt és a grafikon egyenletét, amelyek segítségével a vizsgált esetekre külön-külön meghatározták a pontszerű hőátbocsátási tényezőt. A vizsgálataik eredményét a következő 11.ábrán[15] látható oszlopdiagram szemlélteti, amelyből kiolvasható, hogy mind a hőszigetelés hővezetési tényezője és vastagsága és mind a tartófal anyagának hővezetési tényezője és vastagsága jelentős mértékben növeli a homlokzat hővezetési tényezőjét.



11. ábra: A falazat és a hőszigetelés anyagának hővezetési tényezőjének és vastagságának hatása a hőátbocsátási tényezőre %-ban mérve

Az előző kutatás folytatásaként[16] a szerzők tovább vizsgálták a grafikonok segítségével a pontszerű hőátbocsátási tényező számítására meghatározott képleteket. Egy egyenletrendszer hoztak létre, amely megoldásával egy matematikai kifejezést kaptak a pontbeli hőátbocsátási tényezőre. Ahhoz, hogy megerősítsék az egyenlet megbízhatóságát és pontosságát,

megvizsgálták a korrelációs együttható négyzetét, amely a változók közötti kapcsolat erősségét mutatta és azt, hogy minden vizsgált paraméter, de legfőképp a tartófal hővezetési tényezője hatással van a pontbeli hőátbocsátási tényező értékére. A probléma az így kapott képlettel, hogy egyrészt csak a modellezett tartományokra vonatkozik, másrészt nem független paramétereket tartalmaz, így nem nagyon egyszerűsíti le a számítás menetét.

$$\chi = f(\lambda_L; d_L; \lambda_T; d_T) \quad (10)$$

$$\begin{cases} 0,038 + 0,014 \ln(\lambda_L) & 0,1 \leq \lambda_L \leq 1 \\ 0,034 - 0,025d_L & 50 \leq d_L \leq 500 \\ 0,032 - 0,093\lambda_T & 0,03 \leq \lambda_T \leq 0,04 \\ 0,025 + 0,22d_T & 100 \leq d_T \leq 200 \end{cases} \quad (11)$$

$$\chi = 0,041 + 0,014 \ln(\lambda_L) - 0,025d_L - 0,016\lambda_T + 0,022d_T \quad (12)$$

**12. ábra: A kutatás [8] eredményeképpen a pontbeli hőátbocsátási tényezőre kapott számítási képlet**

A pontszerű hőátbocsátási tényező számítására vonatkozó ISO 6946:2017[4] szabvány a vége-selemes szimuláción kívül a tapasztalati modellezést ajánlja, amely vizsgálatra jó példa a 2020-as IOP által szervezett Earth and Environmental Science konferencián Belén Zurro García[17] által publikált tanulmány. A vizsgálat során egy homlokzati felújítási munkálat alatt álló épületet vizsgáltak, erre a kivitelezés megkezdésekor egy fejlett monitorozó rendszert helyeztek el, amely a külső és belső környezeti feltételeket mérte. Többek között információt küldött a különböző hőmérsékletekről, a relatív páratartalomról és a levegő CO<sub>2</sub> tartalmáról, amelyek közül a legfontosabbak a hőmérsékleti adatok a tanulmány szempontjából. Továbbá áramlásmérőket is elhelyeztek a kazánban a fűtési rendszer vezérléséhez és szabályozásához. A hőáramok vizsgálatához pedig szenzorokat helyeztek el mind a felújítandó, mind az eredeti homlokzat külső és belső oldalára is. A vizsgálat célja az volt, hogy összehasonlítsák az ISO 6946:2017 szabványban szereplő [4] hőátbocsátási tényezőre vonatkozó számítás és a tapasztalati modellezés, azaz az áramlásmérők által számolt hőátbocsátási tényező eredményét, amely eredményeképpen arra jutottak, hogy nagyságrendileg ugyanazt az eredményt adják. Kisebb eltérések előfordulnak a szoftverek által használt különböző biztonsági tényezők, valamint a kivitelezési pontatlanságok miatt.

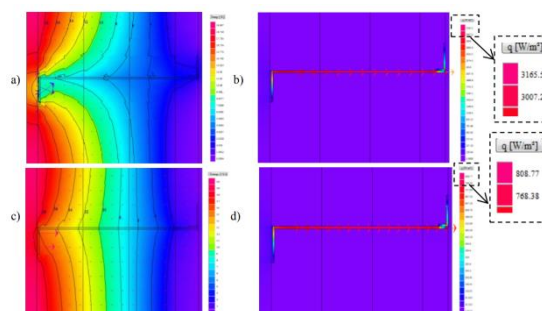
Szintén a Kaunasi Műszaki Egyetemhez köthető egy 2019-es publikáció[18], amelyben 4 homlokzati összeállításban (konzol nélküli, üvegszálerősítésű műanyag konzollal rögzített, rozsdamentes acéllal rögzített, alumínium ötvözet konzollal rögzített burkolatok) vizsgálták az

empirikus, a numerikus és a tapasztalati módszer alapján számolt eredményeket. Az empirikus és a numerikus módszer szerinti számítás a fentebb már ismertetett (4.3.1, 4.3.2) eljárás szerint végezték, míg a tapasztalati módszer esetében hotbox-os mérést alkalmaztak, melynek lényege, hogy a mintát egy hideg és egy meleg kamra közé helyezik, amelyek a külső (jelen esetben 0°C), illetve a belső hőmérsékletet (jelen esetben 20°C) modellezzik. Erre az eljárásra vonatkozó előírásokat az MSZ EN ISO 8990:1999[19] szabvány tartalmazza. Az eredmények azt mutatták, hogy alacsony hővezetési tényezőjű rögzítőelemek használatával a módszertanok közötti eltérés elhanyagolható. Azonban a nagy hővezetési tényezővel rendelkező alumínium konzolok esetében az egyszerűsített módszerrel számolt hőátbocsátási tényező jelentősen eltér a hotboxos mérés eredményétől. Ebben az esetben akár kétszeresét is kaphatjuk a mérőeszközzel mért hőátbocsátási tényezőnek, a mért és a számított eredményeket a következő 13. ábrán[18] lévő táblázat tartalmazza.

Konzol anyaga	Hotbox mérés			Numerikus módszer			Empirikus módszer	
	U [W/m <sup>2</sup> K]	χ [W/K]	ΔU [W/m <sup>2</sup> K]	U [W/m <sup>2</sup> K]	χ [W/K]	ΔU [W/m <sup>2</sup> K]	U [W/m <sup>2</sup> K]	ΔU [W/m <sup>2</sup> K]
Konzol nélkül	0,105	-	-	0,098	-	-	0,1	-
Üvegszál erősítésű műanyag	0,103	-0,0006	-0,0016	0,099	0,0002	0,0005	0,101	0,0004
Rozsdamentes acél	0,123	0,0074	0,0205	0,125	0,0109	0,0302	0,136	0,035
Alumínium ötvözet	0,201	0,0401	0,1114	0,2	0,0417	0,1159	0,432	0,331

13. ábra: Az egyszerűsített és numerikus módszerrel számított, valamint a hotbox-al mért értékek

A következő hőmérséklet terjedési és hőáram sűrűséget mutató 14. ábrán[18] is jól látható, hogy az alumínium konzolok esetében a belső falfelület hőmérséklete jóval alacsonyabb, mint rozsdamentes acél konzolok használatának esetében.



14. ábra: Bal oldalon hőmérséklet eloszlás alumínium (a) és rozsdamentes acél (c) konzol esetében, jobb oldalon hőáramsűrűség alumínium (b) és rozsdamentes acél (d) esetében

A kutatás során a hőáramok terjedését is megvizsgálták a különböző módszertanok esetében, amely során a 16.ábra[18] szerint arra jutottak, hogy a mintán áthaladó hőáramok értékeiben maximálisan 5%-os eltérés mutatkozott a 3D-s szimulációt és a hotboxos mérést összehasonlítva. Ez lényegében azt jelenti, hogy a numerikus módszer nagyon pontosan megközelíti a valóságban mért értékeket. Ahhoz, hogy az eredmények közötti nagyobb eltéréseket elemezzék, minden konzolra kiszámolták a rajtuk áthaladó hőáramokat. Az eredmények azt mutatták, hogy minél több konzolt alkalmaznak, annál több hőáram jut a külsőbb rétegekbe, emiatt hibás az a feltételezés az egyszerűsített módszer esetében, hogy csak a konzolokban előforduló hőáramokat veszi figyelembe.

Konzol anyaga	Hotbox mérés		Numerikus módszer		Empirikus módszer
	Modellen átmenő hőáramsűrűség [W]	Egy konzolon átmenő hőáramsűrűség [W/K]	Modellen átmenő hőáramsűrűség [W]	Egy konzolon átmenő hőáramsűrűség [W/K]	Egy konzolon átmenő hőáramsűrűség [W/K]
Konzol nélkül	7,624	-	7,262	-	-
Üvegszál erősítésű műanyag	7,521	0,001	7,296	0,0002	0,0007
Rozsdamentes acél	8,953	0,007	9,218	0,011	0,051
Alumínium ötvözet	14,835	0,04	14,765	0,042	0,48

15. ábra: Különböző módszertanok által számolt hőáramok összehasonlítása

Összességében elmondható, hogy a numerikus számítás pontosabb eredményeket ad, mint az egyszerűsített számítási mód. Ugyan az egyszerűsített módszerrel számított hőátbocsátási tényező konzol nélküli, illetve műanyag és rozsdamentes acél konzol esetében csak 10%-os eltérést eredményezett a mért értékektől, ami miatt azt hihetnénk, hogy elég pontos és megbízható ez a számítási módszer, ám a konzol hővezetési tényezőjének jelentős romlásával ez az eltérés például alumínium konzol esetében, akár kétszerese is lehet a mért értékeknek. Ezen okok miatt a szerzők is szükségesnek érzik egy pontosabb számítási módszer kidolgozását a hőátbocsátási tényező korrigálására.

Brian Anderson U-értékek számítására vonatkozó dokumentációjában az Egyesült Királyságbéli Building Research Establishment 443:2006 [8] irányelveként szerepel egy levezetés nélküli ajánlás az értékek korrigálására, arra az esetre, ha nincs lehetőség az U-érték numerikus szimulációval történő meghatározására. Ebben az esetben az eredő hőátbocsátási tényező (U) meghatározására lehetőség van a konzolok hőtechnikai hatását elhanyagolásával

számolt hőátbocsátási tényező ( $U_0$ )  $0,3\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ -el való megnövelésével. Ezzel a módszerrel azonban olyan nagy értékek adódnak az eredő hőátbocsátási tényezőre a 17.ábra[8] szerint, hogy az jellemzően nem felel meg a szabványba foglalt követelményeknek.

$$U = U_0 + 0,3 \quad (13)$$

dU növekmény $0,3\text{ W/m}^2\text{K}$	Hőátbocsátási tényező a hőszigetelés vastagságának függvényében [W/m <sup>2</sup> K]						
	180mm	200mm	220mm	240mm	260mm	280mm	300mm
	0,4477	0,435	0,4244	0,4155	0,4078	0,401	0,3952

16. ábra: Eredő U-értékek  $0,3\text{W/m}^2\text{K}$ -es korrekció után [1] alapján

Az NVELOPE's nevű szoftver segítségével, amely 2017 óta érhető el az interneten, már online is megtervezhetjük és kiszámíthatjuk adott homlokzatburkolat hőtechnikai tulajdonságait. A program a 3D-s numerikus modellezés során megállapítja egyes tartókonzolok pontszerű hőátbocsátási tényezőjét, majd az így kapott értékek segítségével meghatározza a teljes falfelület hőtechnikai viselkedését. A számítások megfelelnek az ISO 10211:2017[7], valamint a BRE 443:2019[8] irányelvnek. Lehetőség van speciális anyagtulajdonságok és geometria megadására is. Mivel a megadott modellparaméterek nem minden esetben elégítik ki a megrendelők elvárásait, így a program optimalizálja a vevői kívánságokat a hőtechnikai követelményekkel. Az eredmények a kondenzációs kockázatok kiértékelésében is felhasználhatók.



17. ábra: NVELOPE U-érték tervező és számító program <https://nvelope.com/rainscreen-thermal-calculations.html>  
[20]



## 5. Hőtechnikai modellezés és szimuláció

### 5.1. A használandó paraméterek összegyűjtése

A numerikus modellezést Comsol Multiphysics 5.5 szoftver segítségével végeztem, az ISO10211;2017[7] szabványban leírt számítási módszertan szerint. A modellezés megkezdéséhez szükség volt a homlokzatburkolati rendszer elemeinek összegyűjtésére, azok geometriai és hőtechnikai tulajdonságainak meghatározására. Ehhez különféle gyártói katalógusokat használtam [21]–[25], majd pedig kiválogattam a modellezés során használt értékeket. Törekedtem arra, hogy a valóságban leggyakrabban előforduló paraméterekkel dolgozzak, de helyet kaptak nem kifejezetten jellemző értékek is, hogy a kutatás kiterjeszhető legyen a jövőbe nézve más paraméter értékekre is. Másik fontos szempont volt, hogy ne csak konkrét értékekre, hanem tartományokra vetítve vizsgálhassam az eredményeket, mivel a szakirodalomkutatás során feltárt eredmények legtöbbje adott, létező rendszerelemekre vonatkozik. Mivel közel 20 paraméterre volt szükség a modell felépítéséhez, így a kombinációk számának csökkentése végett a legtöbb esetben az alsó és felső határértékeket és egy-egy köztes értéket adtam meg bemenő paraméterként. Fontos megjegyezni, hogy a modellezés során a külső burkolatot elhanyagoltam, mert a kutatás célja a hőszigetelést átszűrő rögzítőelemek hőtechnikai hatásának vizsgálata, ehhez elegendő a rögzítőelemekkel közvetlenül érintkező elemek, mint tartófal, vakolat, hőszigetelés, konzolok és dübelek figyelembevétele. Az így összegyűjtött paraméterlistát a következő 19. ábrán látható táblázat tartalmazza:

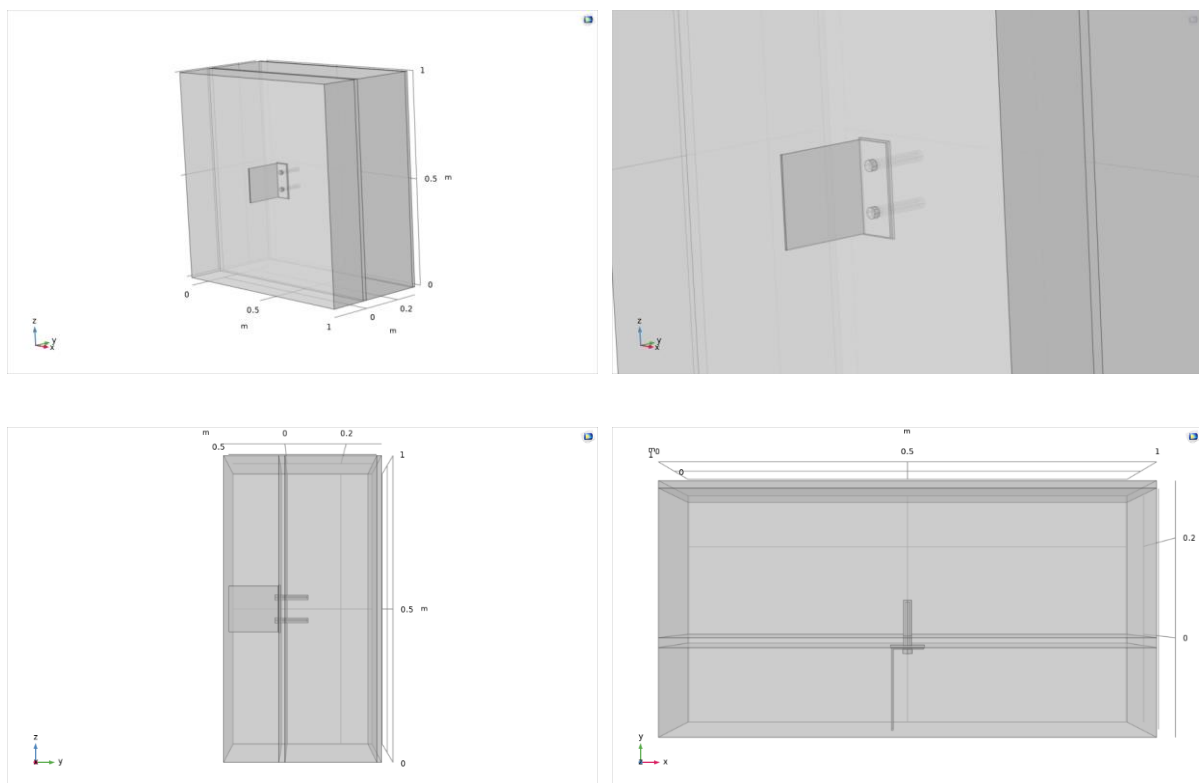
fal anyag	fal vastagság $d_{fal}$ [cm]	fal hővezetési tényező $\lambda_{fal}$ [W/mK]	belső vakolat anyag	belső vakolat vastagság $d_{vakolat}$ [cm]	belső vakolat hővezetési tényező $\lambda_{vakolat}$ [W/mK]	hőszigetelés anyag	hőszigetelés vastagság $d_{hőszig}$ [cm]	hőszigetelés hővezetési tényező $\lambda_{hőszig}$ [W/mK]	külső vakolat anyag	külső vakolat vastagság $d_{vakolat}$ [cm]	külső vakolat hővezetési tényező $\lambda_{vakolat}$ [W/mK]	dübel anyag
tégla	25	0,25; 2,5	mész	1,5	0,8	szálas	10; 20; 30	0,03; 0,04	mészcement	1	0,8	acél, rm.acél
tégla	30	0,07; 0,19; 0,64; 2,5	mész	1,5	0,8	szálas	10; 20; 30	0,03; 0,04	mészcement	1	0,8	acél, rm.acél
tégla	38	0,07; 0,19; 0,72	mész	1,5	0,8	szálas	10; 20; 30	0,03; 0,04	mészcement	1	0,8	acél, rm.acél
vasbeton	15; 20	2; 2,5	mész	1,5	0,8	szálas	10; 20; 30	0,03; 0,04	-	-	-	acél, rm.acél

fal anyag	rögzítések száma n [db]	dübel hővezetési tényező $\lambda_{dübel}$ [W/mK]	dübel átmérő $d_{dübel}$ [cm]	furatmélység $l_{furat}$ [cm]	konzol anyag	konzol hővezetési tényező $\lambda_{konzol}$ [W/mK]	konzol vastagság $d_{konzol}$ [cm]	konzol magasság $h_{konzol}$ [cm]	konzol szélesség $w_{konzol}$ [cm]	hőhídmegegyező anyag	hőhídmegegyező hővezetési tényező $\lambda_{hídmegegyező}$ [W/mK]	hőhídmegegyező vastagság $d_{hídmegegyező}$ [cm]
tégla	1; 2	17; 50	1	5; 15	acél, rm.acél, alumínium	17; 50; 160	0,4; 0,8	6; 20	6; 10	PA, HDPE	0,25; 0,5	0,5; 2
tégla	1; 2	17; 50	1	5; 15	acél, rm.acél, alumínium	17; 50; 160	0,4; 0,8	6; 20	6; 10	PA, HDPE	0,25; 0,5	0,5; 2
tégla	1; 2	17; 50	1	5; 15	acél, rm.acél, alumínium	17; 50; 160	0,4; 0,8	6; 20	6; 10	PA, HDPE	0,25; 0,5	0,5; 2
vasbeton	1; 2	17; 50	1	5; 15	acél, rm.acél, alumínium	17; 50; 160	0,4; 0,8	6; 20	6; 10	PA, HDPE	0,25; 0,5	0,5; 2

18. ábra: A modellezéshez használt paraméterek értékei

## 5.2. A geometria felépítése

A paraméterek kigyűjtése és leszűkítése után is közel 100 ezer lehetséges kombináció adódott, amit egy modell lefuttatásával képtelenség lett volna kezelni, emiatt a geometria esetekre bontása mellett döntöttem. (20.ábra) Elsődlegesen elkülönítettem a téglá és vasbeton anyagú tartófalak modelleket, ugyanis már maga a rétegrendi kialakítás is különbözik, attól függően, hogy milyen anyagú falról beszélünk. A vasbeton falas modellek esetében nem tettem külső vakolatot a falra, míg a téglafalak esetében a légzárás biztosítása végett igen. A többi elkülönítés a hőhídmegegyenlítő megléte vagy elhanyagolása, a tartófal, illetve hőszigetelés vastagságok és a dűbelezések darabszáma mentén történt. Ezekre azért is volt szükség, hogy adott modellen belül egy futtatás során ne kelljen manuálisan változtatni a geometriát, hanem a program a bevitt értékek alapján automatikusan tudja ezt kezelni. Így a szétbontás után 60 különböző modellt kaptam, amelyek alapkonceptiója az volt, hogy 1 m<sup>2</sup>-nyi felületre 1 db tartókonzolt helyeztem, hogy ezzel a későbbi számításaimban leegyszerűsítsem a pontbeli hőátbocsátási tényezőre ( $\chi$ ) vonatkozó számítást. Ugyanis ezzel a kialakítással a  $\chi$ -t megkaphatom a számolt és a szimulációból kinyert hőátbocsátási tényezők különbségéből.

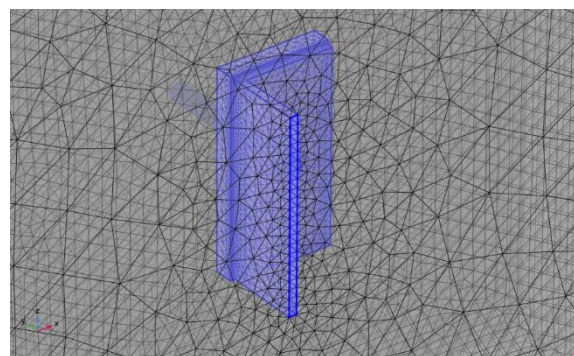
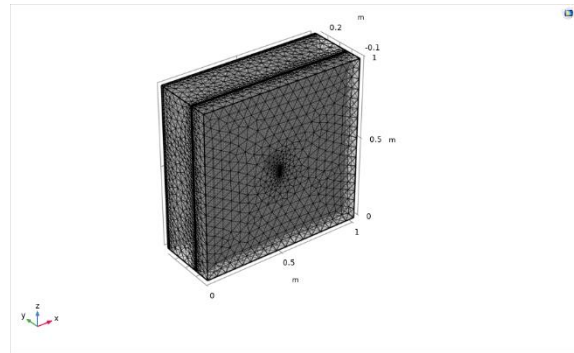


19. ábra: Egyes modell geometriai kialakítása

### 5.3. Végeselemes háló készítése

A végeselemes háló megfelelő kiválasztása egyrészt az eredmények pontosságának szempontjából, másrészt a futtatási idő optimalizálása végett fontos lépés a szimuláció során. A program automatikusan képes a végeselemes háló legenerálására, de van lehetőség kézi beállításokra is. Ahhoz, hogy eldöntsem melyik hálótípus a legmegfelelőbb, egy hálófüggetlenségi vizsgálatot végeztem, amely során először az automatikusan generált hálókat vizsgáltam a felbontás, az elemszám, az átlagos hálóminőség, a szabadságfokok száma és futtatási idő szempontjából. A vizsgálatot a geometriailag lehető legbonyolultabb modellen végeztem el, ez a 38cm-es téglafalú, rajta 30cm-es hőszigeteléssel rendelkező modell volt.

Fontos tényező, hogy a program a szimuláció futtatása közben ne adjon hibaüzenetet, így igyekeztem olyan megoldást választani, ahol ezek elkerülhetők. Megnéztem, hogy a lehető legjobb hálófelbontással milyen értéket kapok a hőátbocsátási tényezőre és ezt alapul véve vizsgáltam azt, hogy a többi hálófelbontás esetében mekkora az eltérés a hőátbocsátási tényezőben, azaz mekkora a relatív hiba. Mivel 1%-os hibahatáron belül szerettem volna maradni és elkerülni a futtatás során a hibaüzeneteket, így csak olyan hálózást tudtam volna választani, aminek egy kombináció lefuttatása másfél percnél is tovább tartott volna, ezzel akár 1 hétre is növelve egy modell lefutási idejét. Az automatikus hálózás manuális finomítása mellett döntöttem, ahol arra is volt lehetőség, hogy a modellen belül eltérő sűrűségű hálózást alkalmazzak a geometria mentén, így a homogén részeknél, mint a fal, hőszigetelés és vakolat gyengébb felbontást alkalmaztam, mint a konzolnál, dübeleknél és a hőhídmezsakítónál. Az optimalizálás során arra jutottam, hogy a falra, a vakolatra és a hőszigetelésre „finer” minőségű, míg a konzolra, a dübelekre és a hőhídmezsakítóra „extra fine” minőségű hálózást alkalmazok, így nagyjából fél perces lefutási időt és 1,33%-os relatív hibát kaptam. A 21.ábrán látható a nagyobb egységekre alkalmazott „finer” háló, és a rögzítésekre alkalmazott „extra fine” háló.



20. ábra: A szoftver által készített alapháló és sűrített háló

A „fine”-nál rosszabb hálózásokot nem vizsgáltam, mert nem adtak volna elég pontos eredményeket. A következő 22. ábrán látható táblázat összefoglalja a hálófüggetlenségi vizsgálatomat:

háló	felbontás	Háló statisztika			Üzenetek		Eredmények			Hiba % relatív hiba
		csomópontok száma	elemek száma	figyelmeztetések	szabadságfokok száma	futtatási idő	UID [W/mK]	dU [W/mK]	L3D [W/mK]	
<b>Automatikus</b>										
1	extremely fine	418476	2455556		3313544 (plus 517276 internal DOFs)	690s	0,087709	0,0086945	0,096404	0,00%
2	extra fine	146900	849732		1154228 (plus 315314 internal DOFs)	99s	0,087709	0,0087362	0,096446	0,48%
3	finer	65743	375266		513094 (plus 179666 internal DOFs)	33s	0,087709	0,0088102	0,096520	1,33%
4	fine	36949	207507	1 warning	285978 (plus 116510 internal DOFs)	17s	0,087709	0,0089007	0,096610	2,37%
5	normal	22775	125816	1 warning	174791 (plus 80698 internal DOFs)	12s	0,087709	0,0089761	0,096686	3,24%
6	coarse	10980	58688	1 warning	82881 (plus 46612 internal DOFs)	6s	0,087709	0,0091645	0,096874	5,41%
7	coarser	5298	27244	2 warning	39233 (plus 26458 internal DOFs)	5s	0,087709	0,0093881	0,097097	7,98%
8	extra coarse	2692	13403	2 warning	19605 (plus 15904 internal DOFs)	4s	0,087709	0,0096896	0,097399	11,45%
9	extremely coarse	937	4503	3 warning	6699 (plus 6614 internal DOFs)	4s	0,087709	0,0104330	0,098143	20,00%
<b>Felhasználói</b>										
10	fine+extra fine	36949	207507		285978 (plus 116510 internal DOFs)	13s	0,087709	0,0089007	0,096610	2,37%
11	finer+extra fine	65743	375266		513094 (plus 179666 internal DOFs)	26s	0,087709	0,0088102	0,096520	1,33%
12	finer+extremely fine	65743	375266		513094 (plus 179666 internal DOFs)	26s	0,087709	0,0088102	0,096520	1,33%

21. ábra: Hálófüggetlenségi vizsgálat kiértékelése

#### 5.4. Numerikus számítási módszer, fizika

A Comsol Multiphysics szoftver [26] a szimulációk során végelemes módszerrel oldja meg a matematikai egyenleteket. A parciális differenciálegyenletek megoldására vonatkozó előírásokat az MSZ EN 10211:2017-es szabvány [7] tartalmazza. A hővezetésre vonatkozó parciális differenciálegyenlet a következő:

$$\nabla * q = Q \quad (14)$$

$$q = -\lambda_{eff} * \nabla * T \quad (15)$$

ahol:

- $\nabla$ : nabla vektoriális differenciáloperátor
- $q$ : hőáramsűrűség
- $Q$ : hőforrás [ $W/m^3$ ]
- $\lambda_{eff}$ : effektív hővezetési tényező [ $\frac{W}{mK}$ ]
- $T$ : hőmérséklet [ $K$ ]

Az (13) egyenlet szilárd testek esetében a következőképpen alakul:

$$\nabla * q = 0 \quad (16)$$

$$q = -\lambda_{eff} * \nabla * T \quad (17)$$

A peremfeltételekre vonatkozó egyenletek a következők:

– külső peremfeltétel:

$$q_o - n * q = \alpha * (T_{ext} - T) \quad (18)$$

$$T_{ext} = -5^\circ C$$

$$\alpha = \frac{1}{R_{se}} = 25 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$$

ahol:

- $q_o$ : konvektív hőáramsűrűség  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
- $-n * q$ : a felületre normális befele mutató hőáramsűrűség
- $\alpha$ : hőátadási tényező  $\left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$
- $T_{ext}$ : külső hőmérséklet [K]
- $T$ : felület hőmérséklete [K]

– belső peremfeltétel:

$$-n * q = \alpha * (T_{int} - T) \quad (19)$$

$$T_{int} = 20^\circ C$$

$$\alpha = \frac{1}{R_{si}} = 7,69 \left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$$

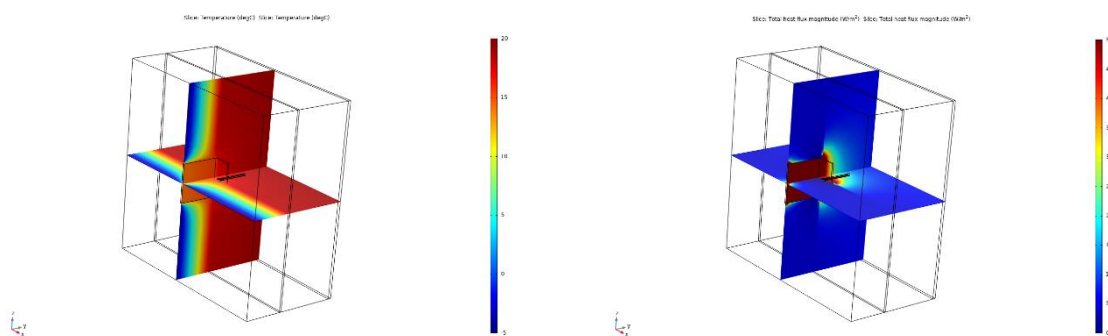
ahol:

- $q_o$ : konvektív hőáramsűrűség  $\left[ \frac{W}{m^2} \right]$
- $-n * q$ : a felületre normális befele mutató hőáramsűrűség
- $\alpha$ : hőátadási tényező  $\left[ \frac{W}{m^2 * K} \right]$
- $T_{int}$ : belső hőmérséklet [K]
- $T$ : felület hőmérséklete [K]

## 6. Eredmények kiértékelése

### 6.1. Eredmények vizualizálása

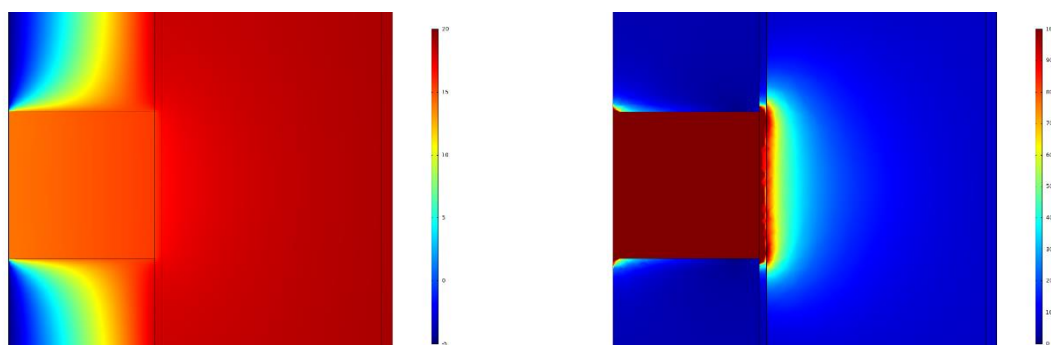
Numerikus szimulációk során az eredmények vizualizálására is lehetőség nyílik, amelyekkel a szerkezeten belüli eredmények is megjeleníthetők., illetve például páratechnikai megfelelés vizsgálatnál is használhatók. A dolgozatban a továbbiak során a számszerű eredményekkel dolgozom tovább, így csak néhány eredményábra kerül bemutatásra. A 22. és 23. ábrán 30 cm vastag vázkerámia tartófallal rendelkező modell hőmérsékleteloszlás és hőáramsűrűség változást mutató ábrái láthatók.



22. ábra: Hőmérsékleteloszlás ábrázolása 3D-s modellen a jellemző metszetek mentén

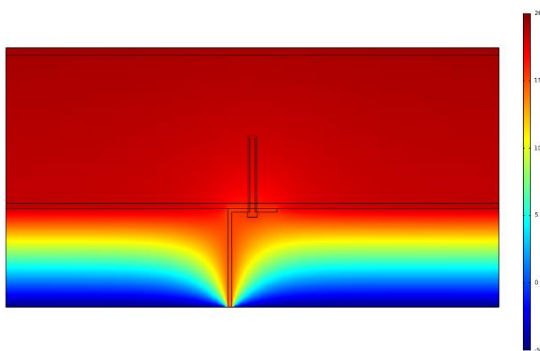
23. ábra: Hőáramsűrűség ábrázolása 3D-s modellen a jellemző metszetek mentén

A következő 24.-29. ábrákon szintén a modellre vonatkozó hőáramsűrűség változás és hőmérsékleteloszlás ábrák láthatók kinagyítva, illetve a jellemző vízszintes és függőleges metszetek esetében. Ahogy az az ábrákon is látszik, a hőáramsűrűség a konzol mentén a legnagyobb, amiből arra lehet következtetni, hogy a hó a konzol, azaz az átszűrődés mentén szökik el a szerkezetből.

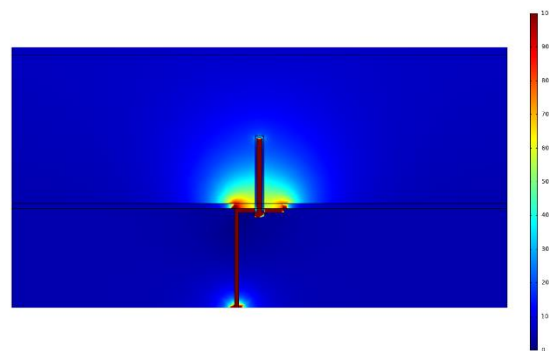


24. ábra: Hőmérsékleteloszlás a konzol mentén

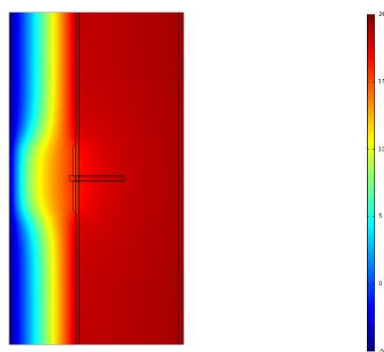
25. ábra: Hőáramsűrűség változása a konzol mentén



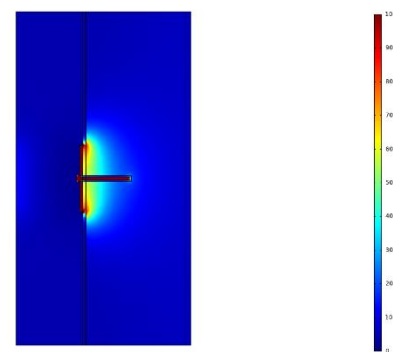
26. ábra: Hőmérsékleteloszlás vízszintes metszeten



27. ábra: Hőáramsűrűség változása vízszintes metszeten

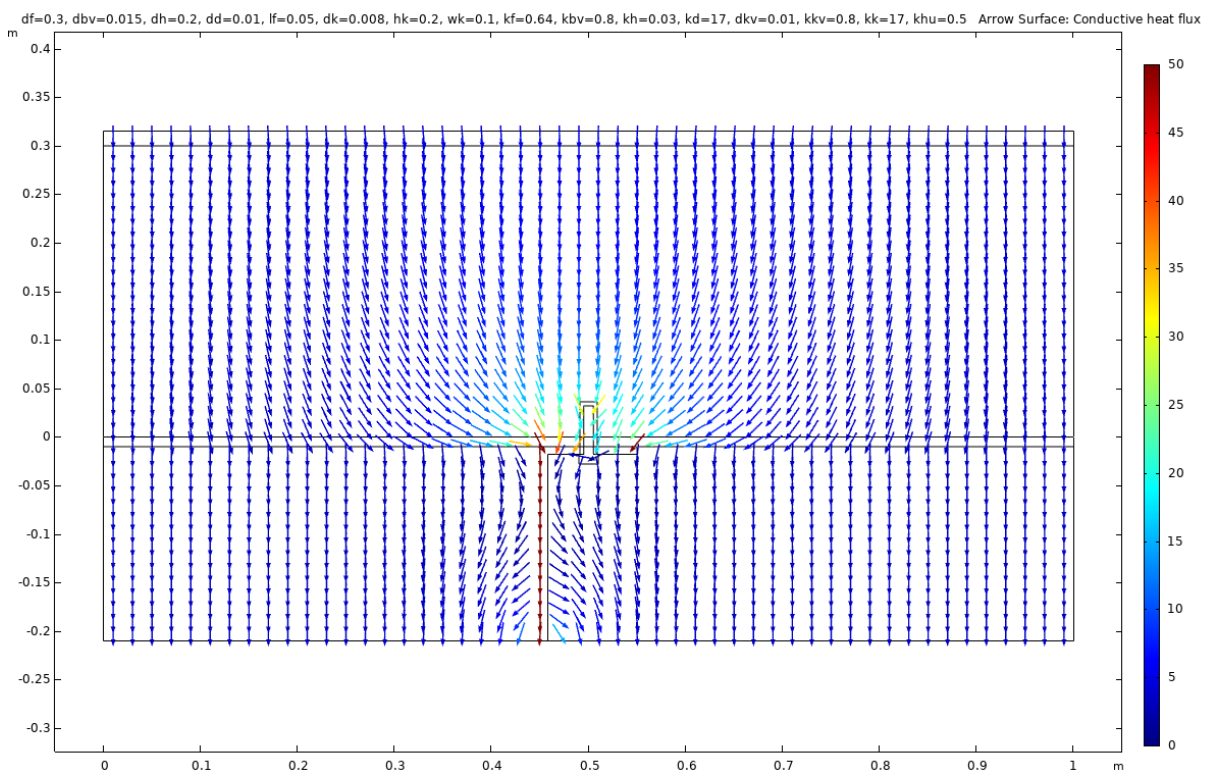


28. ábra: Hőmérsékleteloszlás függőleges metszeten

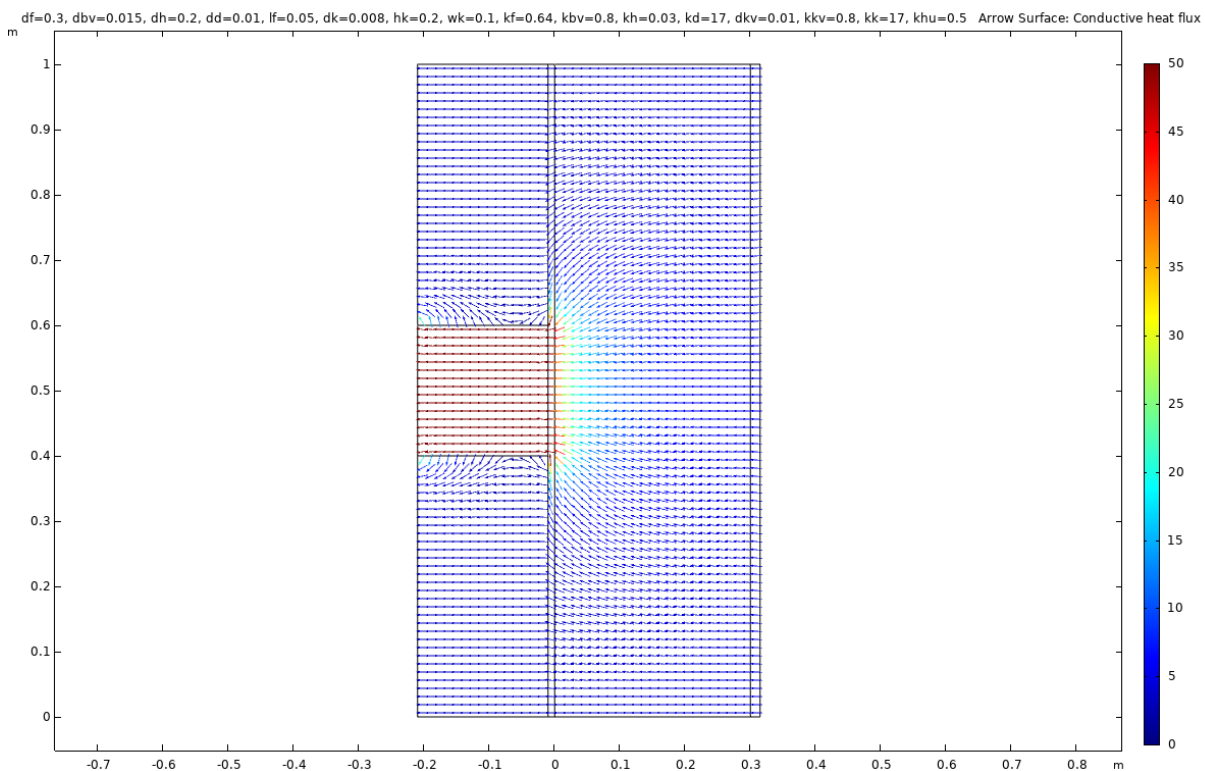


29. ábra: Hőáramsűrűség változása függőleges metszeten

Lehetőség van a hőáramvektorok irányának és nagyságának megjelenítésére is, amelyek a 30. és 31. ábrán láthatók. Több különböző konzol anyagú modellt vizsgálva elmondható, hogy a nyilak iránya állandó, csak a hőáramok nagysága változik. Az ábrákon látszik, hogy jelen esetben a hőáramok a konzoltól vízszintes irányban nagyjából 45 cm-nél távolabb még egydimenziósak mondhatók, majd közelebb kerülve pedig már 3D-s hőáramokról beszélhetünk. Függőleges irányban kisebb, nagyjából 25-30 cm-es távolságon belül váltanak a hőáramok egydimenziósból háromdimenzióssá, illetve mindkét irányú ábrán látszik, hogy a hőáramok változása a hőszigetelő rétegre is kihat. Ezek alapján elmondható, hogy a numerikus modellezés során vizsgált 1 m<sup>2</sup>-nyi felület elegendőnek bizonyul a vizsgálathoz, ugyanis a határoló felületeken már egydimenziós hőáramok találhatók, viszont a rögzítések körüli háromdimenziós hőáramok alátámasztják a 3D-s numerikus szimuláció szükségességét.



30. ábra: Hőáramvektorok iránya és intenzitása a rögzítések mentén vízszintes metszeten



31. ábra: Hőáramvektorok iránya és intenzitása a rögzítések mentén függőleges irányban



## 6.2. Hőhídkatalógusok létrehozása

A futtatások eredményeit paraméterek szerint leválogatva Excel-táblázatokba gyűjtöttem. A modellek 2 nagy csoportra bonthatók, az egyik esetben hőhídmegszakítók használatával vizsgáltam a modelleket, a másik esetben hőhídmegszakítók nélkül. Ahhoz, hogy a lehető legjobban kezelhető hőhídkatalógust tudjam összeállítani, két eredmény összefoglaló táblázatot hoztam létre, amelyek közül az egyik a hőhídmegszakítók nélküli modellek szimulálásából kapott pontbeli hőátbocsátási tényezőket, míg a másik a hőhídmegszakítókkal ellátott modellek szimulálásából kapott pontbeli hőátbocsátási tényezőket tartalmazza. Mindkét esetben több, mint 60 ezer numerikus modell eredményét tartalmazza a táblázatok, így ezen táblázatok (32. és 33. ábra) méretükből fakadóan nem kerülnek teljes terjedelmükben bemutatásra ezen dokumentációban, hanem egy internetes linken keresztül érhetőek el. Az adott paraméterekhez tartozó megfelelő értékek kikeresését egy legördülő lista könnyíti meg, a köztes értékeket lineáris interpolációval kaphatjuk meg. A táblázatok és a legördülő a lista az alábbi oldalon érhető el: <https://bit.ly/34uWrKH>

Pontbeli hőátbocsátási tényező $\chi$ [W/K]						Rögzítőelemek tulajdonságai													
						Konzol $\lambda$ [W/mK]						0,06x0,06x0,004						0,2x0,06x0,004	
Rétregrendi kialakítás																			
Dübel tulajdonságok		Furat hossz [m]	Fal tulajdonságok		Tégla $\lambda$ [W/mK]	Hőszigetelés tulajdonságok		0,25		0,5		0,25		0,5		0,25		0,5	
db	$\lambda$ [W/mK]		anyag	vastagság [m]		vastagság [m]	$\lambda$ [W/mK]	0,005	0,02	0,005	0,02	0,005	0,02	0,005	0,02	0,005	0,02	0,005	0,02
1	17	0,05	tégla	0,25	0,25	0,1	0,03	0,005414	0,00501	0,005563	0,005377	0,007775	0,006849	0,008049	0,0074531	0,014979	0,013357	0,015421	0,014789
							0,04	0,004959	0,004539	0,005109	0,004906	0,007002	0,0061	0,007256	0,006674	0,013598	0,012152	0,014034	0,013386
							0,03	0,006079	0,005725	0,006209	0,006052	0,009137	0,008267	0,00939	0,0088289	0,017062	0,015794	0,017448	0,016865
						0,04	0,005866	0,005502	0,005996	0,00581	0,008755	0,007895	0,009004	0,0084414	0,016398	0,015114	0,016784	0,016183	
						0,03	0,005745	0,005483	0,005843	0,005713	0,008995	0,008307	0,009203	0,0087693	0,016421	0,015433	0,016723	0,01627	
						0,04	0,005638	0,005374	0,005735	0,005601	0,008821	0,008141	0,009025	0,0085882	0,016104	0,015113	0,016404	0,01594	
					2,5	0,1	0,03	0,009332	0,008738	0,009621	0,009414	0,014131	0,012429	0,014678	0,013624	0,028037	0,025109	0,029002	0,027815
							0,04	0,0096	0,008901	0,009932	0,009675	0,014275	0,012416	0,014879	0,013716	0,028865	0,025288	0,029752	0,028361
							0,03	0,008525	0,008053	0,00873	0,008519	0,013475	0,012116	0,013906	0,013039	0,025735	0,023568	0,026423	0,025469
						0,04	0,008838	0,008309	0,009066	0,008823	0,013884	0,012411	0,014356	0,013403	0,026624	0,024214	0,027392	0,026305	
						0,03	0,007374	0,007046	0,007518	0,007369	0,012111	0,011105	0,01244	0,01181	0,022485	0,020925	0,022978	0,022387	
						0,04	0,007611	0,007256	0,007765	0,007601	0,012502	0,011427	0,012854	0,012167	0,023225	0,021533	0,023761	0,022994	
1	17	0,15	tégla	0,25	0,25	0,1	0,03	0,005685	0,005358	0,005825	0,005704	0,008182	0,007358	0,008441	0,0079289	0,015378	0,014029	0,015807	0,015245
							0,04	0,005281	0,004946	0,005422	0,005294	0,007469	0,006653	0,007709	0,0072008	0,014062	0,012701	0,014486	0,013903
							0,03	0,006024	0,005946	0,006363	0,006236	0,009424	0,008652	0,009665	0,0091851	0,017333	0,016139	0,017708	0,01718
						0,04	0,00606	0,005755	0,006183	0,006048	0,00908	0,008309	0,009318	0,0088324	0,016708	0,015495	0,017084	0,016536	
						0,03	0,005853	0,005635	0,005946	0,005853	0,009207	0,008601	0,009405	0,0090394	0,016613	0,015687	0,016906	0,016498	
						0,04	0,005765	0,005544	0,005857	0,00576	0,009056	0,008451	0,009251	0,0088794	0,01632	0,015388	0,016612	0,016193	
					2,5	0,1	0,03	0,009346	0,008788	0,009632	0,009451	0,014161	0,012543	0,014704	0,013708	0,028057	0,025178	0,029019	0,027863
							0,04	0,009617	0,008959	0,009947	0,009719	0,01431	0,012541	0,014909	0,013812	0,028674	0,025388	0,029773	0,028417
							0,03	0,008533	0,008085	0,008737	0,008542	0,013499	0,012201	0,013928	0,013103	0,025755	0,023614	0,026442	0,0255
						0,04	0,008848	0,008345	0,009074	0,00885	0,013912	0,012503	0,01438	0,013474	0,026646	0,024266	0,027412	0,026341	
						0,03	0,007738	0,007068	0,007523	0,007386	0,012126	0,011169	0,012452	0,011857	0,022495	0,020958	0,022986	0,022309	
						0,04	0,007618	0,007279	0,007771	0,007619	0,012519	0,011494	0,012868	0,012218	0,023236	0,021569	0,02377	0,023019	

32. ábra: Hőhídmegszakítóval rendelkező modellek hőhídkatalógusa

dűbel tulajdonságok			fal tulajdonságok			hőszigetelés tulajdonságok		konzol tulajdonságok		hőhídmegszakító tulajdonságok		pontbeli hőátbocsátási tényező
db	$\lambda$ [W/mK]	furat hossz [m]	anyag	vastagság [m]	$\lambda$ [W/mK]	vastagság [m]	$\lambda$ [W/mK]	geometria [m x sz x d]	$\lambda$ [W/mK]	vastagság [m]		
1	17	0,05	vasbeton	0,15	2	0,3	0,03	17	0,2x0,1x0,004	0,5	0,02	0,023869

33. ábra: Az adatok szűrését segítő legördülő lista

### 6.3. Eredmények ábrázolása grafikonon és összehasonlításuk

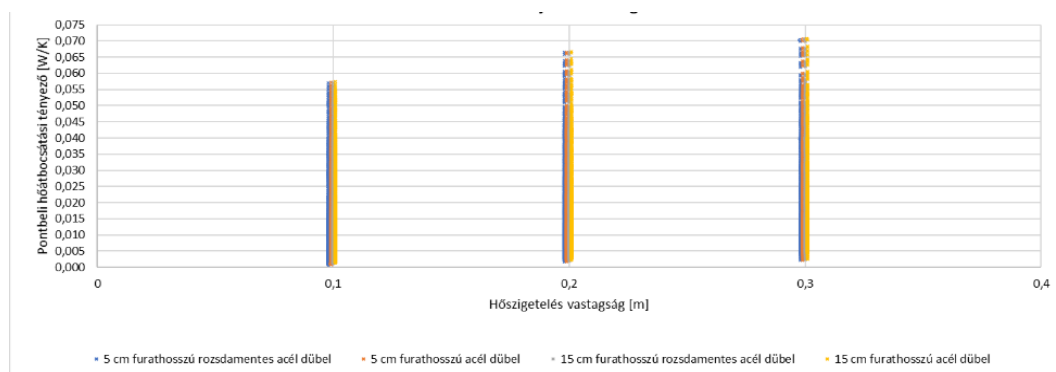
#### 6.3.1. Adatok leválogatása és szegregálása

Ahhoz, hogy a kapott eredményeket megfelelően kiértékeljem és következtetéseket tudjak levonni a grafikus ábrázolási módot választottam. Első lépésként leválogattam és szegregáltam az adatokat, hogy könnyebben kiszűrhessem azokat a paramétereket, amelyek kevésbé befolyásolják a pontbeli hőátbocsátási tényező értékét. A feladat nehézsége a megfelelő szegregálás megválasztása, ugyanis a paraméterek mindegyike független egymástól, emiatt célszerű volt valamilyen szempont szerint összetartozó paraméterek összeválogatása. Kiindulva az áttanulmányozott szakirodalmi dokumentációkból minden esetben a tartófal, illetve a hőszigetelés vastagságának és hővezetési tényezőjének függvényében ábrázoltam a pontszerű hőátbocsátási tényezőt. A hővezetési tényezőket és a vastagságokat tovább szegregáltam az alábbi csoportok szerint:

1. dübelek száma, tartófal anyaga, furathossz, dübel hővezetési tényezője
2. dübelek száma, tartófal anyaga, hőhídmegszakító vastagsága, hőhídmegszakító hővezetési tényezője
3. dübelek száma, tartófal anyaga, konzol magassága, konzol vastagsága, konzol hővezetési tényezője

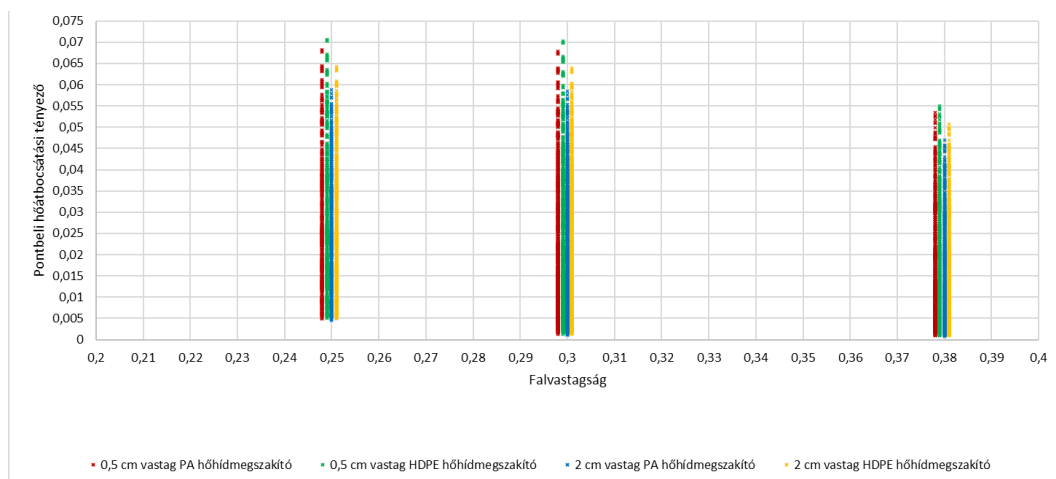
Az így kapott diagrammok vizsgálatával a következő főbb megállapításokra jutottam, amelyeket néhány kiemelt diagrammal illusztráltam:

- a dübelezés tulajdonságainak (ideértve: dübelek száma, hővezetési tényezője, furathossza) hatása a pontbeli hőátbocsátási tényezőre a 34. ábra szerint lényegében elhanyagolható, ugyanis az egy hőszigetelés vastagsághoz tartozó különböző dübeltulajdonságú adatok közötti legnagyobb eltérés is csak 0,6%



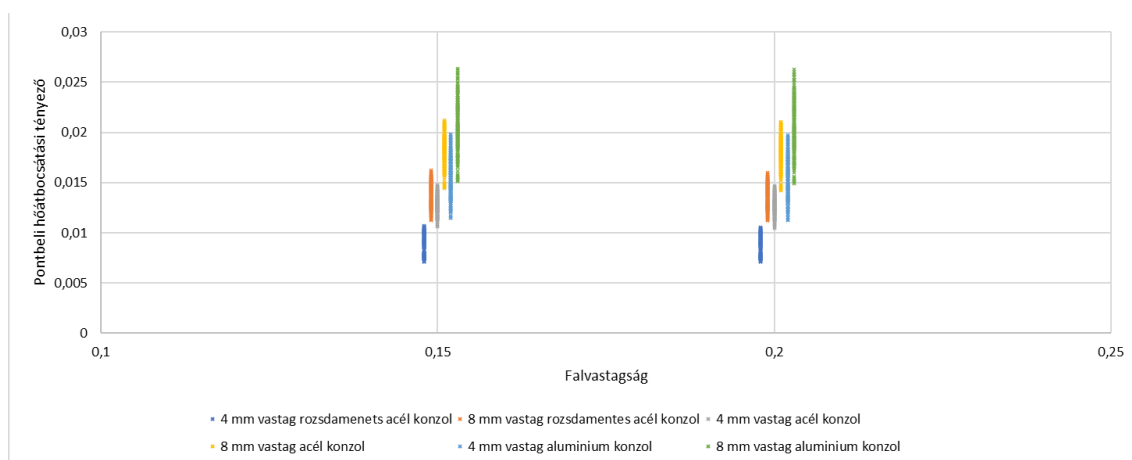
34. ábra: 1 db 1cm-es átmérőjű dübel téglafalban

- a hőhídmege szakító tulajdonságainak (ideértve: hőhídmege szakító anyagának hővezetési tényezője, hőhídmege szakító vastagsága) hatása a pontbeli hőátbocsátási tényezőre a 35. ábra szerint 10%-on belüli elérést okoz az adott falvastagsághoz tartozó, de eltérő tulajdonságokkal rendelkező hőhídmege szakítók maximum értékeinek esetében, így lényegében elhanyagolható



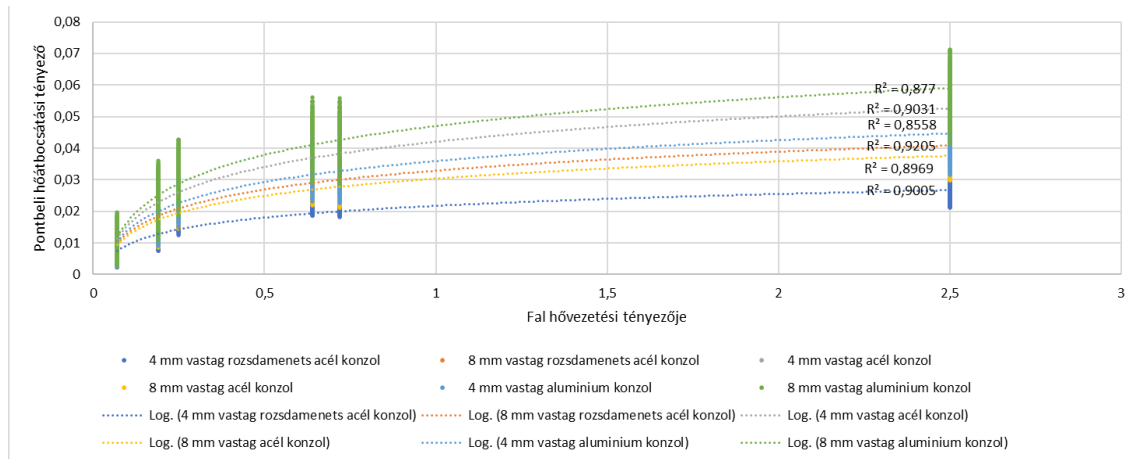
35. ábra: 1 dübelrel rögzített hőhídmege szakító konzoltalp mögött téglafalban

- a konzol tulajdonságainak (ideértve: konzol geometriája, vastagsága, hővezetési tényezője) hatása a pontbeli hőátbocsátási tényezőre nem elhanyagolható, 4 mm vastag rozsdamentes acélkonzol és 8 mm vastag alumínium konzol esetében az eltérés akár 200% is lehet, illetve látható, hogy a  $\chi$  értéke jelentősen növekszik a konzol tulajdonságainak romlásával



36. ábra: 1 dübelrel rögzített 6 cm magas konzol vasbeton falban

- a konzol tulajdonságok függvényében vizsgálva az értékeket a 37. ábra szerint kimondható, hogy a pontbeli hőátbocsátási tényező és a fal hővezetési tényezője között logaritmikus kapcsolat áll fent, a korrelációs együttható négyzete 0,8558-0,9205 közé esik



37. ábra: Logaritmikus kapcsolat a fal hővezetési tényezője és  $\chi$ -értékek között

Ezen csoportosítások alapján a legtöbb esetben csak az adott kiemelt tulajdonságokhoz tartozó maximumokat és az értékek tartományát tudtam megállapítani, így további, részletesebb vizsgálatokra volt szükség.

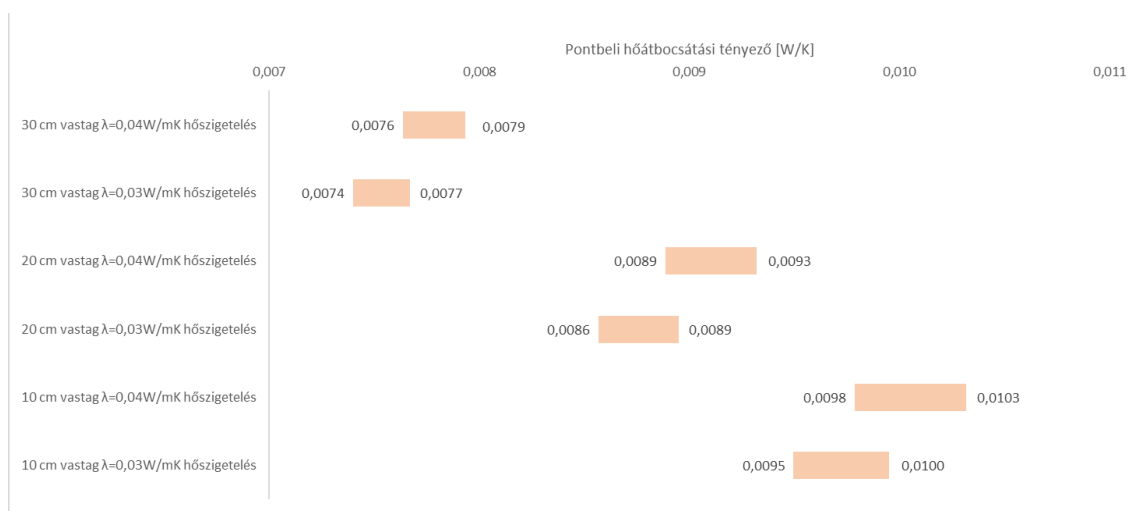
### 6.3.2. $\chi$ -értékek részletesebb vizsgálata

Ahhoz, hogy pontosabb megállapításokat tehessenek az eredményekről nem elég csak a leválogatott és szegregált paraméterek függvényében ábrázolni a pontbeli hőátbocsátási tényezőt. A több, mint 100 ezer különböző futtatás eredményt azonban lehetetlen értelmezhető kereteken belül grafikus ábrákon összehasonlítani, emiatt a korábbi vizsgálatok megállapításai alapján igyekeztem a legáltalánosabb esetek szélsőértékeit megvizsgálni. Így a 20 és 30 cm-es falvastagságú 1db 15cm-es furathosszú dübellel ellátott esetek közül legjobb esetként a legvékonyabb és legkisebb, míg legrosszabb esetként a legvastagabb és legnagyobb konzollal rögzített változatokat hasonlítottam össze úgy, hogy a pontbeli hőátbocsátási tényezőket a fal hővezetési tényezőjének függvényében ábrázoltam. A már elkészített hőhíd-katalógus táblázatokból kikerestem az adott modellekhez tartozó értékeket, majd ezeket Excel-tábla segítségével sávdiaگرامmokon ábrázoltam. Mivel azonban így is sok adatot kellett ábrázolni, ezért a diagrammokon csak az adott tulajdonságokhoz tartozó minimum és maximum értékeket

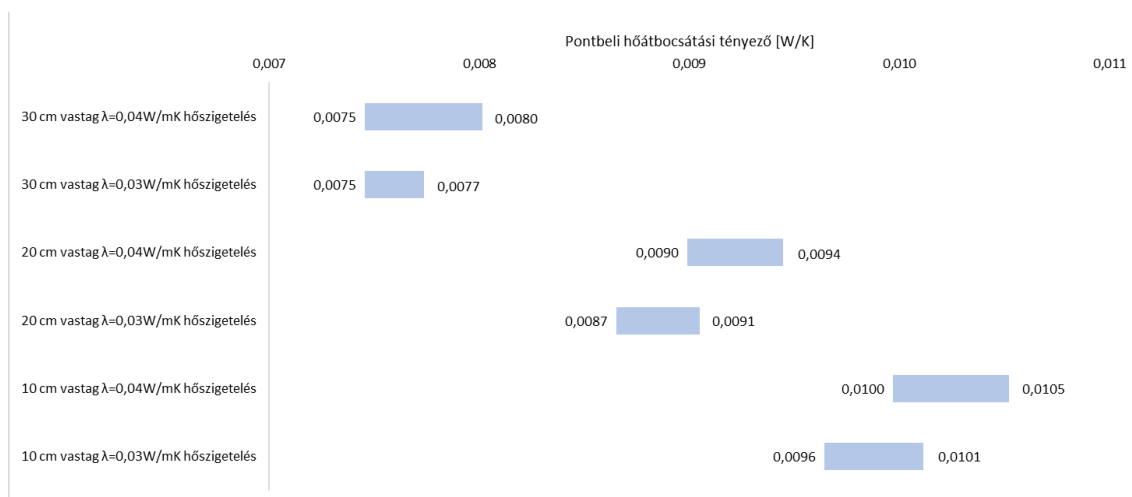
ábrázoltam. Az összehasonlítás fő alapja az, hogy elkülönítettem a hőhídmegszakítóval ellátott és a hőhídmegszakítóval nem rendelkező modelleket. Az így kapott grafikonokon már részletesebb képet kapunk  $\chi$ -értékeinek változásairól, amely nagy segítséget nyújt a korrekciós képlet létrehozásában.

### 6.3.2.1. 20 cm-es tartófal vizsgálata hőhídmegszakítóval ellátott konzol esetén

Első lépésben azt vizsgáltam, hogy adott falvastagság esetében a tartófal hővezetési tényezője mennyire befolyásolja a pontbeli hőátbocsátási tényezőt. Ezt a vizsgálatot elvégeztem a legjobb és a legrosszabb konzol tulajdonságok esetében is.

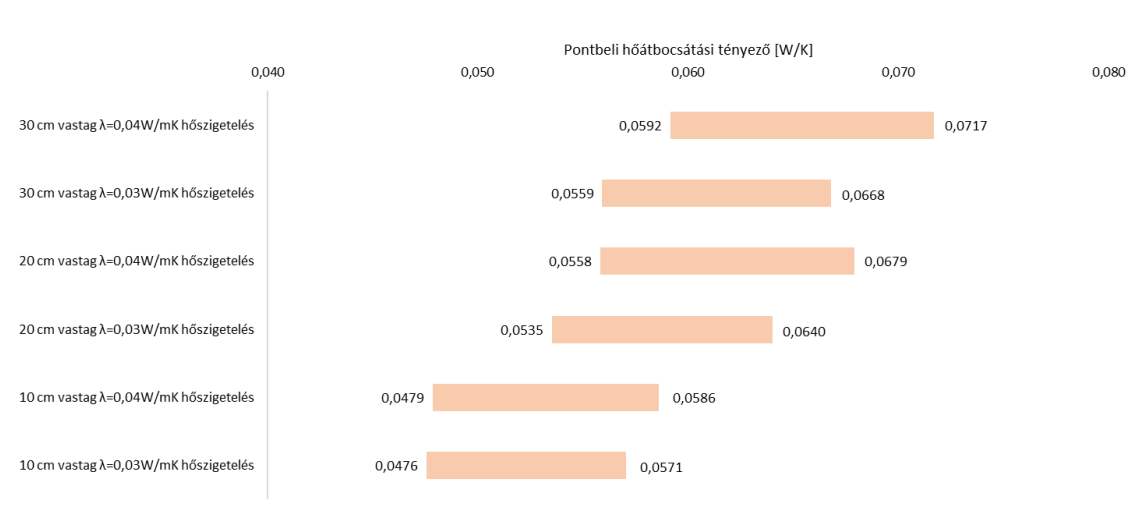


38. ábra: 20 cm-es  $\lambda=2$  W/mK vasbeton falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,06x0,06x0,004 konzol

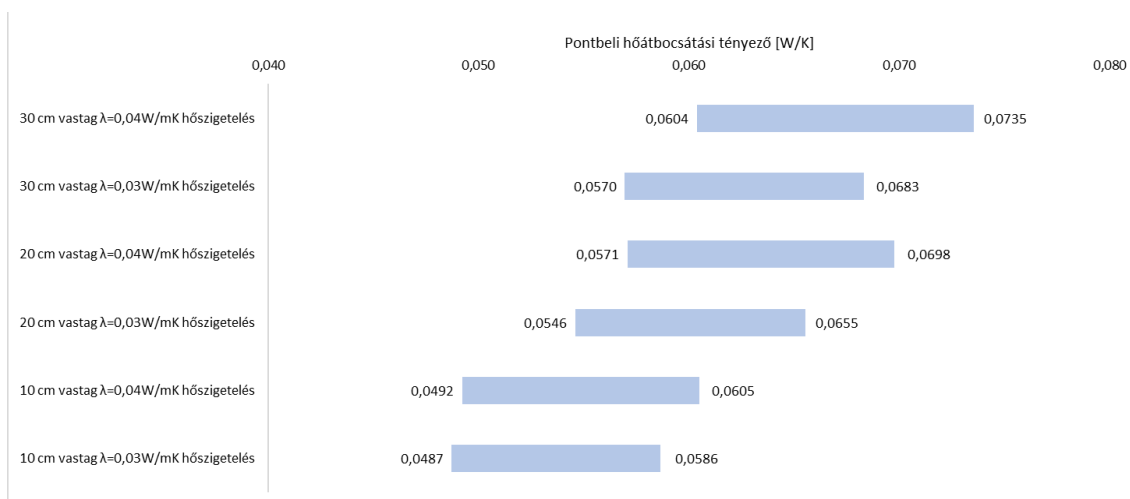


39. ábra: 20 cm-es  $\lambda=2,5$  W/mK vasbeton falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,06x0,06x0,004 konzol

Mind a két vizsgált diagrammon (38. és 39. ábra) az látszik, hogy a hőszigetelés vastagságának növelésével csökken, míg a hővezetési tényező növelésével nő a pontbeli hőátbocsátási tényező értéke. A hőszigetelés vastagságának növelésével mind a két esetben 10-15%-os csökkenés érhető el, a hővezetési tényező romlásával pedig 5%-al nő a pontbeli hőátbocsátási tényező tehát lényegében a hőszigetelés tulajdonságai csak a tízezredekben okoznak eltérést az értékekben. Ezzel szemben nagy konzol esetében már teljesen más képet mutatnak a 40. és 41. ábrán lévő grafikonok, ugyanis ekkor a hőszigetelés hővezetési tényezőjének növelése mellett a vastagságának növelésével is nőnek a  $\chi$ -értékek. Összehasonlítva a 10 és 30 cm vastag hőszigetelésnél kapott legnagyobb pontbeli hőátbocsátási tényező értékeket akár 25%-os romlásról is beszélhetünk, ellenben a hővezetési tényező változtatása továbbra sem okoz 5%-nál nagyobb növekedést az értékekben. Ez azt jelenti, hogy nagyobb konzolok használatával a vastagabb hőszigetelés elhelyezése a tartófalon nem jelent megoldást a hőhidak kiküszöbölésére. Másik jelentős különbség nagy konzolok esetében az, hogy a  $\chi$ -értékek jóval nagyobb tartományokban mozognak, azaz a hőszigetelés tulajdonságain kívül más paraméterek is befolyásolják a pontbeli hőátbocsátási tényezőt. Ha összehasonlítjuk a 2 W/mK hővezetési tényezőjű tartófalhoz tartozó 38. és 39. ábrát, a 2,5 W/mK hővezetési tényezőjű tartófalhoz tartozó 40. és 41. ábrával azt láthatjuk, hogy az összes tartomány alsó és felső határértéke nagyon közel esik egymáshoz, az eltérések mindenhol kisebbek, mint 1%, amiről arra lehet következtetni, hogy vasbeton tartófal esetében a fal tulajdonságai is elhanyagolható paraméterek.



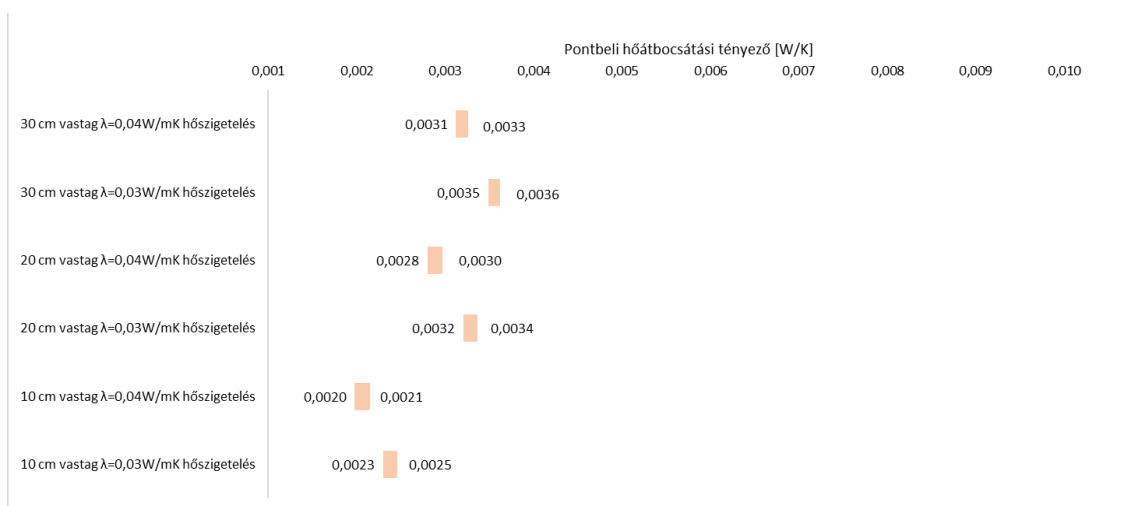
40. ábra: 20 cm-es  $\lambda=2,5$  W/mK vasbeton falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,2x0,1x0,008 konzol



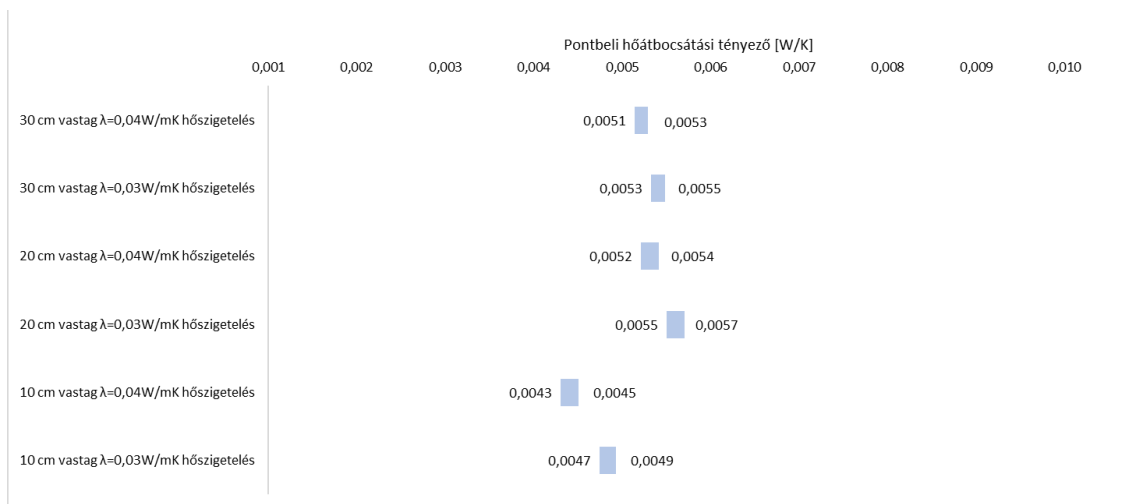
41. ábra: 20 cm-es  $\lambda=2,5$  W/mK vasbeton falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,2x0,1x0,008 konzol

### 6.3.2.2. 30 cm-es tartófal vizsgálata hőhidmegszakítóval ellátott konzol esetén

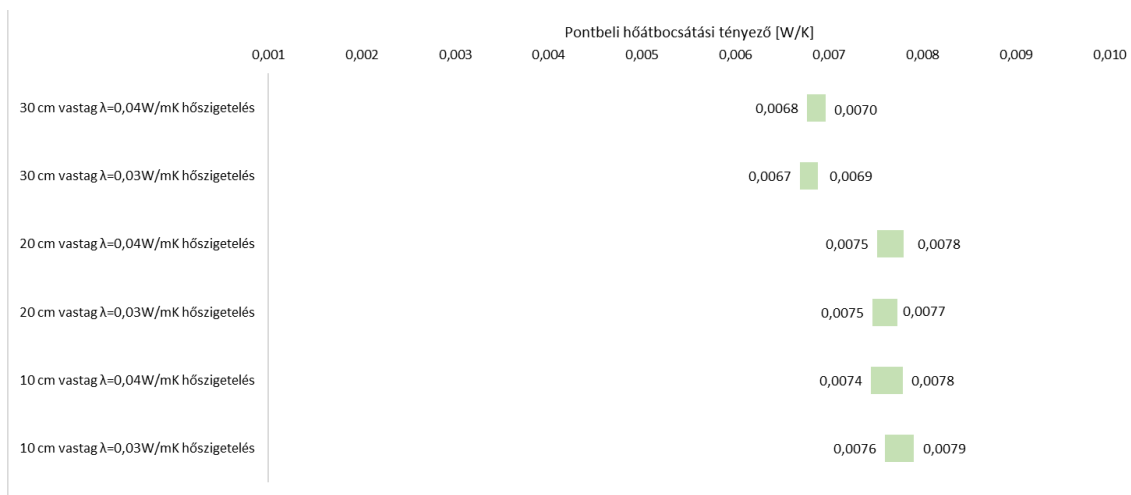
Az előző pontokban ismertetett vizsgálatokat elvégeztem a 30 cm vastag tartófallal rendelkező modellek esetében is, annyi különbséggel, hogy 30 cm-es falvastagságban előfordul téglá, illetve vasbeton fal is, így több különböző adott anyagra jellemző hővezetési tényezőt is vizsgáltam. Először ebben az esetben is külön bontottam a konzolok mérete szerint a vizsgálatot, majd megnéztem, hogy a fal különböző hővezetési tényezői milyen hatással vannak a pontbeli hőátbocsátási tényezőre.



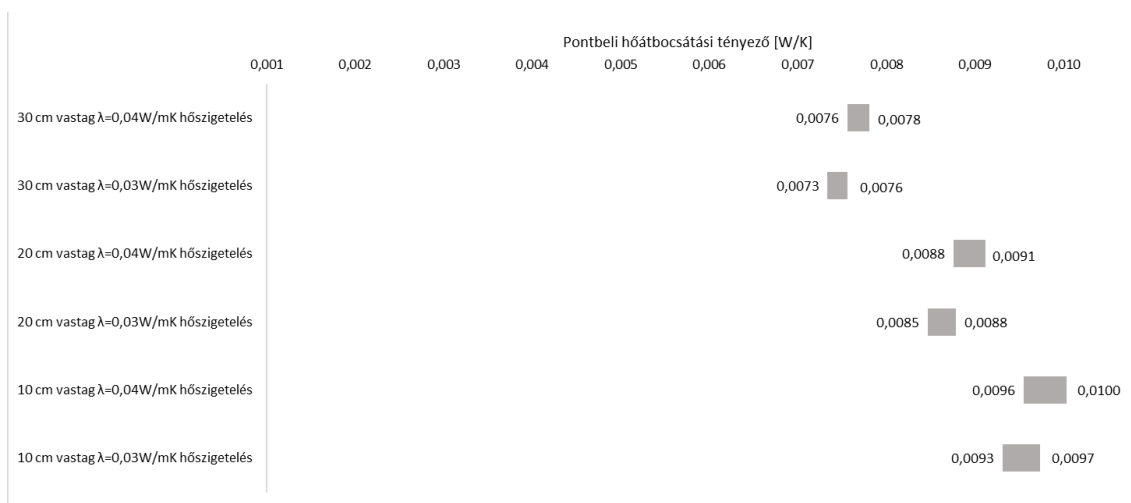
42. ábra: 30 cm-es  $\lambda=0,07$  W/mK téglá falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,06x0,006x0,004 konzol



43. ábra: 30 cm-es  $\lambda=0,19$  W/mK tégl falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,06x0,006x0,004 konzol



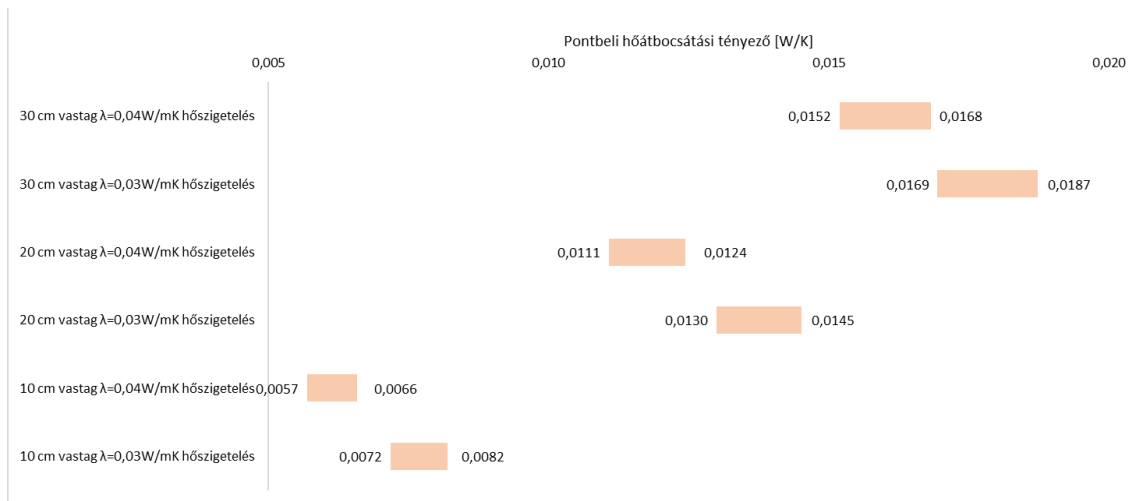
44. ábra: 30 cm-es  $\lambda=0,07$  W/mK tégl falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,06x0,006x0,004 konzol



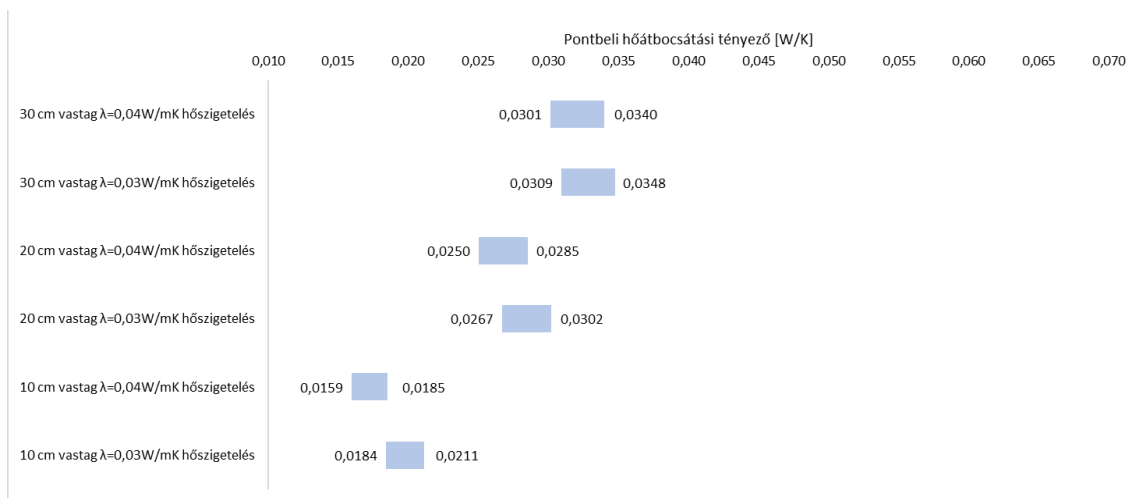
45. ábra: 30 cm-es  $\lambda=2,5$  W/mK vasbeton falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,06x0,006x0,004 konzol



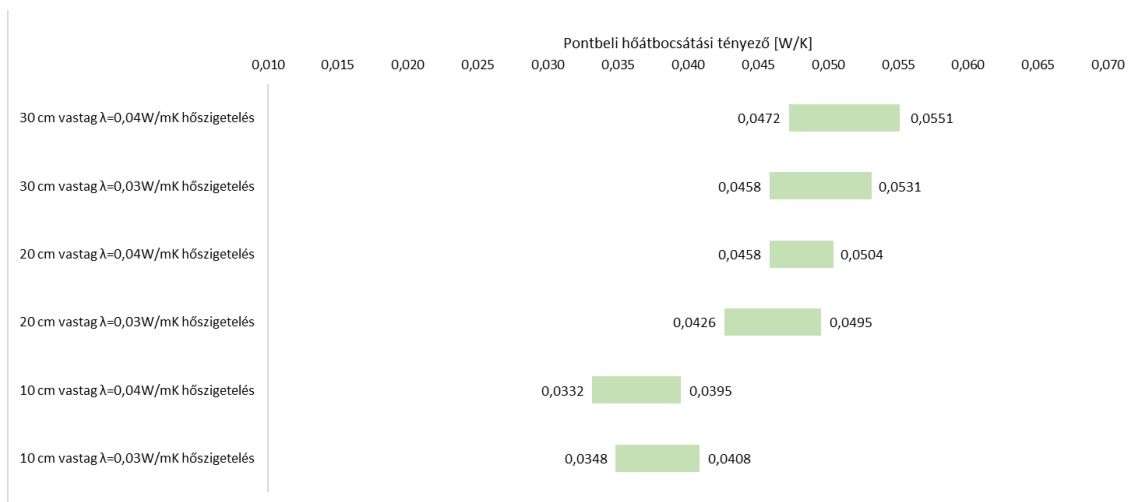
A 42.-45.ábrákon különböző színekkel jelöltem a más-más hővezetési tényezőjű tartófalak eseteit és arra a következtetésre jutottam, hogy a fal hővezetési tényezőjének növelésével egyre nagyobb lesz a pontbeli hőátbocsátási tényező, azaz egyre jobban hőhidassá válik az épület. Míg a legalacsonyabb 0,07 W/mK hővezetési tényezőjű téglafalhoz tartozó legrosszabb  $\chi$ -érték 0,036 W/K, addig ez az érték a 2,5 W/mK hővezetési tényezőjű vasbeton falnál majdnem háromszorosa ennek; 0,01 W/K, így kimondható hogy a fal hővezetési tényező szignifikáns eltéréseket okoz. Ezekről a grafikonokról is leolvasható, hasonlóan az előző pontban ismertetett megállapításokkal (6.3.2.1), hogy kis konzol esetében ugyan a hőszigetelés tulajdonságainak lerontásával (értem itt: hőszigetelés vastagságának csökkentése, hővezetési tényezőjének növelése) nő a pontbeli hőátbocsátási tényező, de ezek a növekmények elhanyagolhatóan kicsik, 5%-on belüli eltéréseket okoznak.



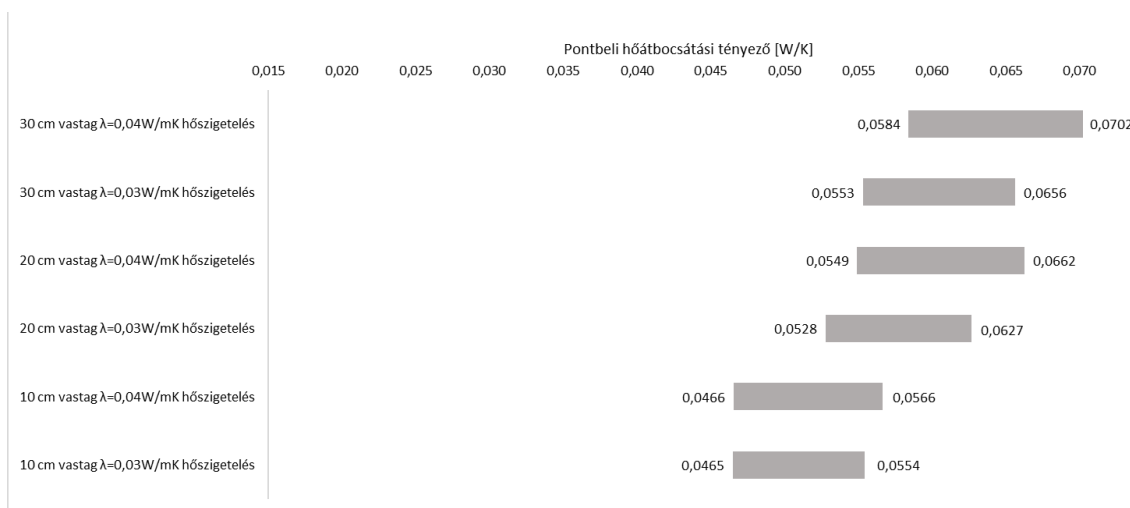
46. ábra: 30 cm-es  $\lambda=0,07$  W/mK téglafalba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,2x0,1x0,008 konzol



47. ábra: 30 cm-es  $\lambda=0,19$  W/mK téglafalba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,2x0,1x0,008 konzol



48. ábra: 30 cm-es  $\lambda=0,64$  W/mK tégl falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,2x0,1x0,008 konzol

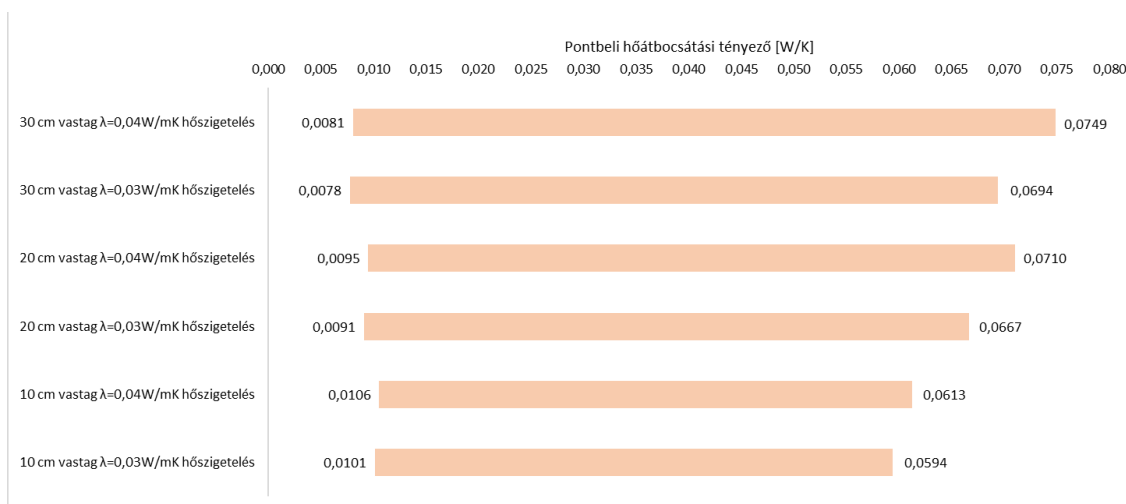


49. ábra: 30 cm-es  $\lambda=2,5$  W/mK vasbeton falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,2x0,1x0,008 konzol

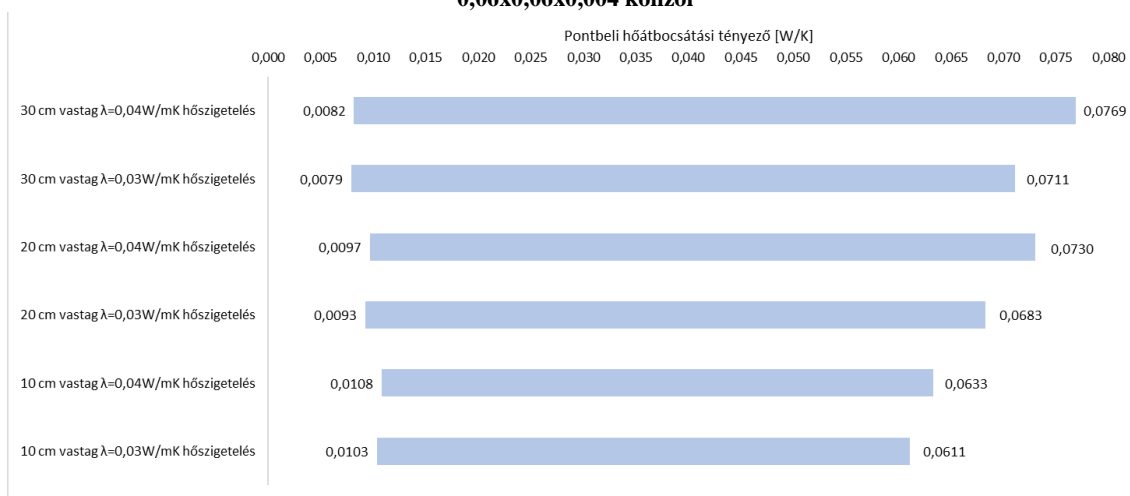
A 46.-49. ábrákon nagyon hasonló képet láthatunk, mint a 20 cm-es tartófal nagy konzolos vizsgálataiban (6.3.2.1) a 40. és 41. ábrán, azaz a konzol méretének és a hőszigetelés vastagságának növelésével jelentősen romlanak a  $\chi$ -értékek. Ha megnézzük a 30 cm-es vasbeton falhoz tartozó maximum értékeket kis konzol és nagy konzol esetében azt láthatjuk, hogy a magasabb konzolok és a rosszabb anyagtulajdonságok, akár hétszeresére is növelhetik a pontbeli hőátbocsátási tényezőt. A hőszigetelés vastagságának növelésével ennél kisebb mértékben nő a pontbeli hőátbocsátási tényező, nagyjából másfél-kétszerese lesz a 30 cm vastag hőszigetelés esetében a  $\chi$ -érték a 10 cm vastag hőszigeteléshez képest az összes esetben.

### 6.3.2.3. 20 cm-es tartófal vizsgálata hőhídmegezákítóval nem rendelkező konzol esetén

A hőhídmegezákító nélküli eredmények ábrázolásánál már egy diagrammon ábrázoltam a kis- és nagy konzolokhoz tartozó értékeket, mint szélsőértékek, ugyanis ebben az esetben egy konzol mérethez egy érték tartozik, mivel a hőhídmegezákító tulajdonságait már nem kell figyelembe venni. Itt is elmondható, hogy vasbeton fal esetében a hővezetési tényező és a falvastagság csak minimálisan befolyásolja a  $\chi$ -értékeket, az eltérések kisebbek 3,5%-nál, viszont a konzol méretének és anyagának hatása jelentős, hiszen az értékek tartománya 0,007 és 0,07 W/K között változik. A tartományok szétbontásával (50., 51.ábra) azonban nem kapunk sokkal részletesebb képet arról, hogy a hőszigetelés tulajdonságok milyen hatással vannak a pontbeli hőátbocsátási tényezőre, ezért ezeket a grafikonokat érdemes tovább bontani a konzolok tulajdonságai szerint is, amelyre a következő fejezetben kerül sor. (6.3.3)

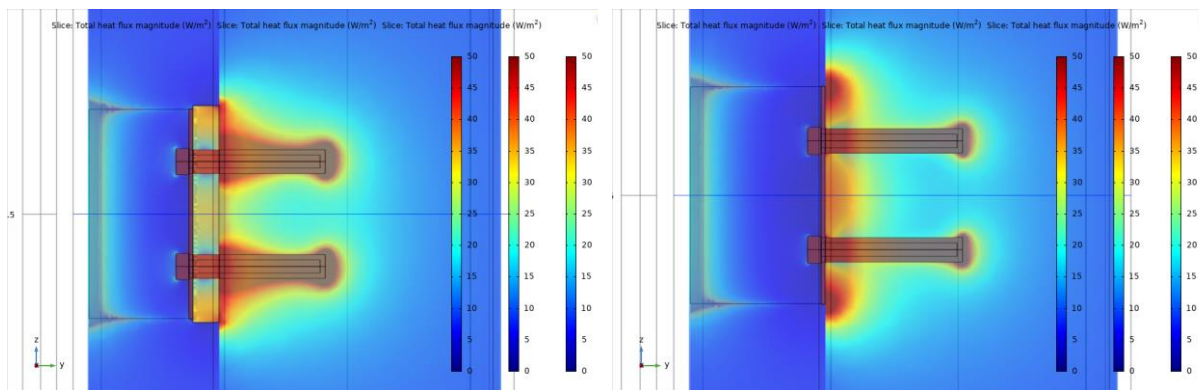


**50. ábra: 20 cm-es  $\lambda=2$  W/mK vasbeton falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,06x0,06x0,004 konzol**



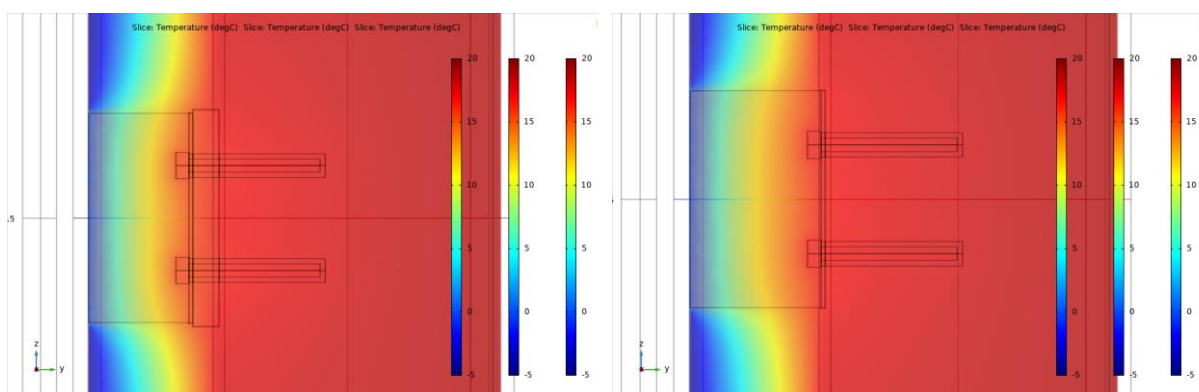
**51. ábra: 20 cm-es  $\lambda=2,5$  W/mK vasbeton falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,06x0,06x0,004 konzol**

Összehasonlítva a hőhídmezsakítóval rendelkező vasbeton modellekre vonatkozó ábrákat (40., 41. ábra) a hőhídmezsakítóval nem rendelkező modellek ábráit (50. és 51. ábra) elmondható, hogy a maximum értékek közötti eltérés kevesebb, mint 5%, ebből arra lehet következtetni, hogy a hőhídmezsakítók sokkal kevésbé csökkentik a pontbeli hőátbocsátási tényező értékét, mint azt előzetesen feltételeztem. A szimulációk során kapott hőmérséklet eloszlás ábrák szinte változatlanok mindkét esetben, amelyek alátámasztják, hogy a hőhídmezsakítók elhagyása nem okoz jelentős romlást a pontbeli hőhidak kialakulásában. A hőáramsűrűség eloszlás viszont megváltozik a hőhídmezsakítók elhagyásával és a hőáramok a dübelek helyett a konzol mentén koncentrálnak. A 42.-45. ábrán látható modellek 20 cm vastag 10 cm hőszigeteléssel ellátott 2 W/mK hővezetési tényezőjű vasbeton modellekre vonatkoznak.



52. ábra: Hőáramsűrűség változása hőhídmezsakító alkalmazása esetében

53. ábra: Hőáramsűrűség változása hőhídmezsakító elhagyása esetében

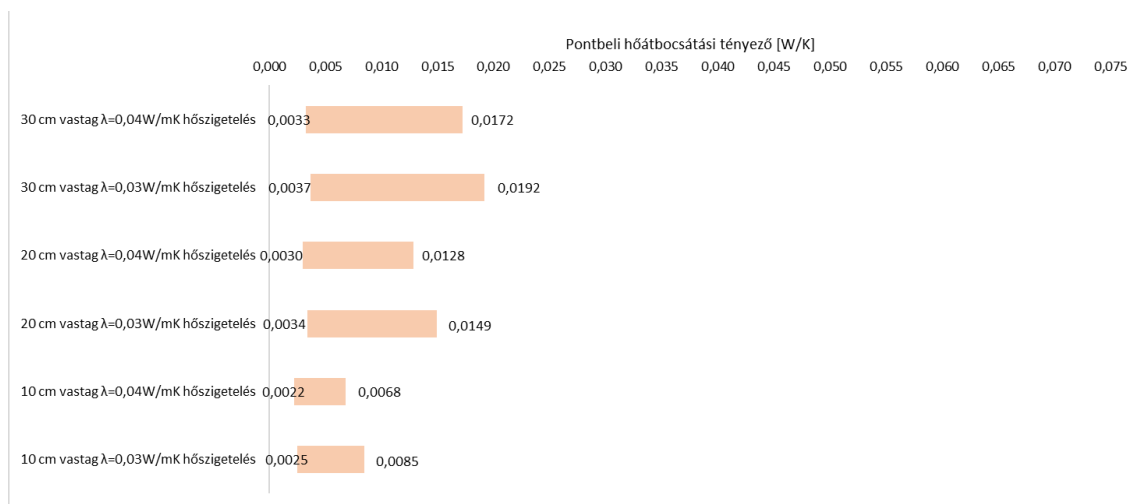


54. ábra: Hőmérséklet eloszlás hőhídmezsakító alkalmazása esetében

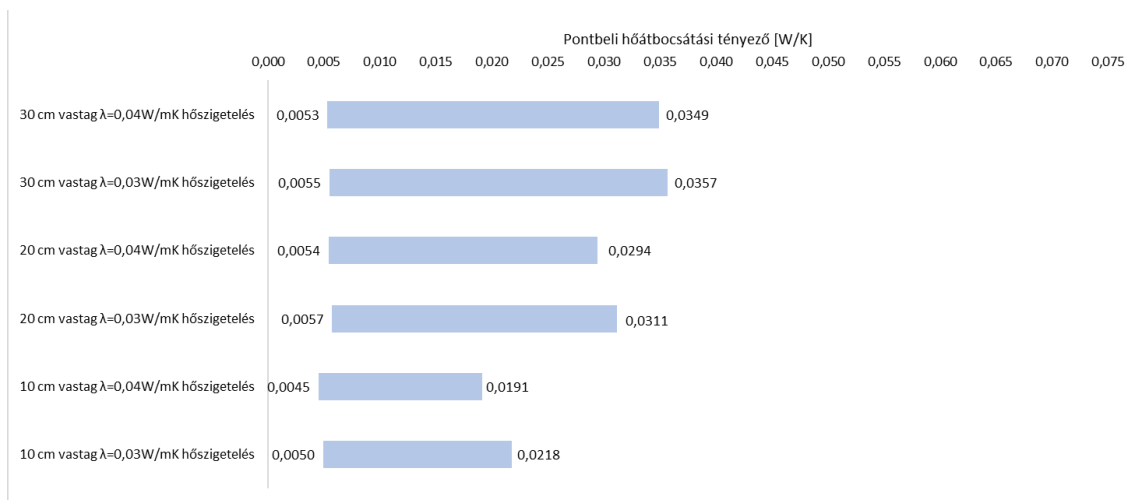
55. ábra: Hőmérséklet eloszlás hőhídmezsakító elhagyása esetében

#### 6.3.2.4. 30 cm-es tartófal vizsgálata hőhídmegezakítóval nem rendelkező konzol esetén

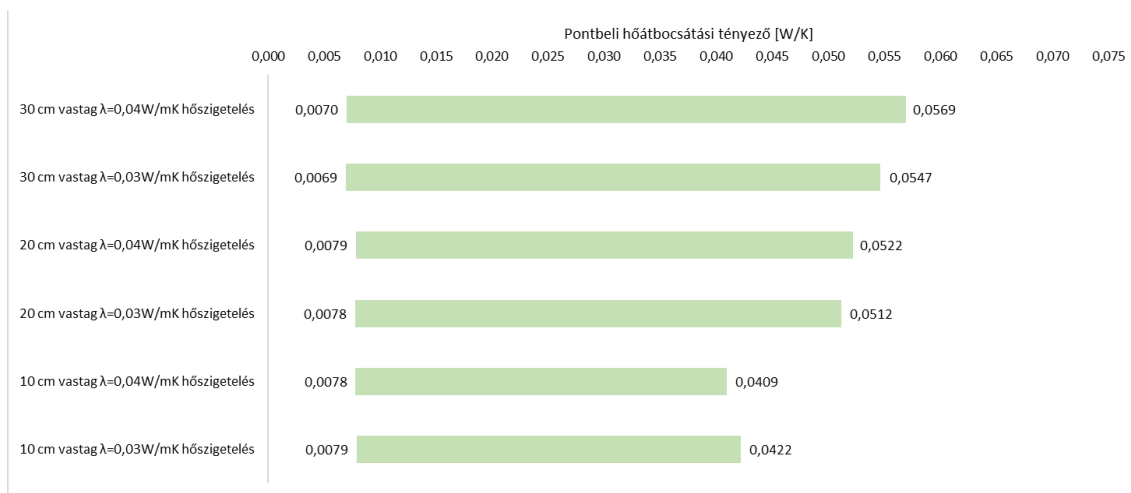
Megvizsgálva a 30 cm falvastagságú, hőhídmegezakító nélküli modellek diagrammjaikat és összehasonlítva a 20 cm falvastagságú modellekkel, az látszik, hogy vasbeton fal esetében a szórás és a tartományok nagysága megnő, ez szintén azt támasztja alá, hogy vasbeton esetében a hőszigetelés anyagtulajdonságai nem mértékadó az eredmények szempontjából, illetve, hogy a hőhídmegezakító elhagyása kis mértékben megnöveli a pontbeli hőátbocsátási tényező értékét. Ez a növekmény egyik tartomány esetében sem haladja meg a 4%-ot. Az 57.-60. grafikonokon a 30 cm-es téglafal esetei láthatók, amelyeken az figyelhető meg, hogy a növekvő hővezetési tényező hatására megnő az értékek tartománya és egyre kevésbé különül el a hőszigetelés tulajdonságainak hatása. Alapvetően elmondható, hogy a hőhídmegezakító elhagyása a tartományokat megnöveli, viszont a minimum és maximum értékek között nem okoz 5%-nál nagyobb eltéréseket. Az alacsony hővezetési tényezővel rendelkező falak esetében mind maga a pontbeli hőátbocsátási tényező, mind a hőhídmegezakító elhagyása miatt lévő értékek közötti eltérés olyan minimális (<1%), hogy kimondható, hogy hőhídmegezakítók használata nélkül is szinte hőhídmentessé tehető a szerkezet.



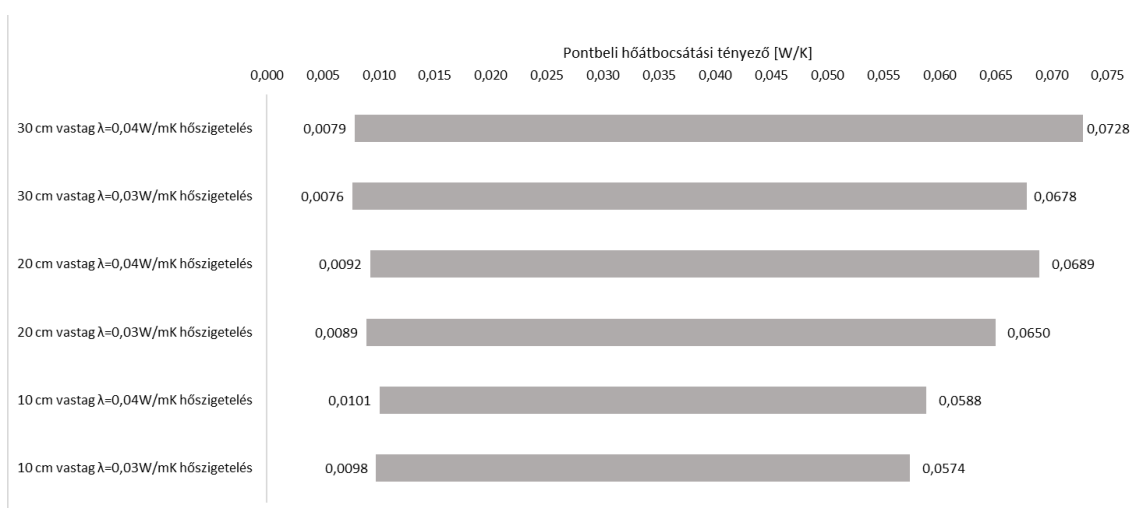
56. ábra: 30 cm-es  $\lambda=0,07$  W/mK téglafalba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,06x0,06x0,004 konzol



57. ábra: 30 cm-es  $\lambda=2,5$  W/mK vasbeton falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,06x0,06x0,004 konzol

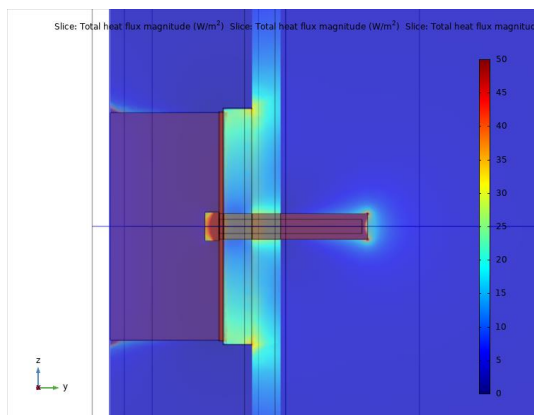


58. ábra: 30 cm-es  $\lambda=0,64$  W/mK téglafalba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,06x0,06x0,004 konzol

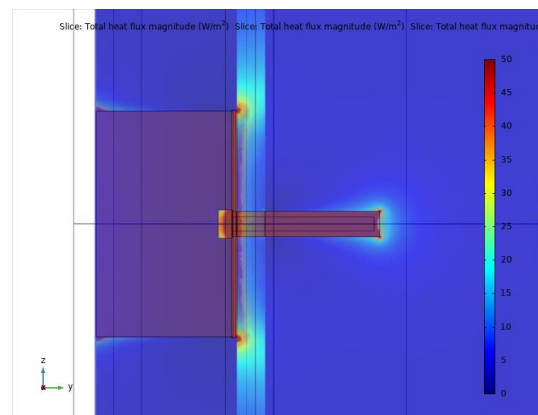


59. ábra: 30 cm-es  $\lambda=0,19$  W/mK téglafalba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített 0,06x0,06x0,004 konzol

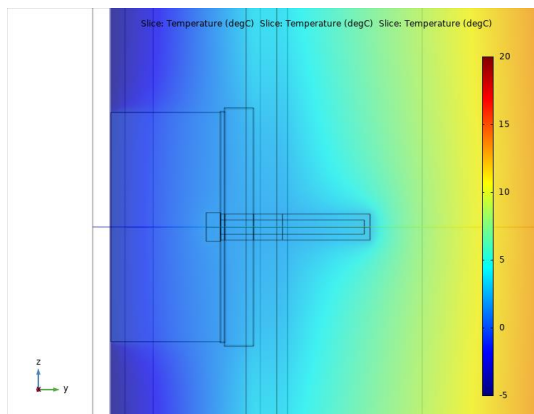
A 63. és 64. ábrákon a szimuláció eredményeképpen kapott hőmérsékleteloszlás, míg a 61. és 62. ábrákon a hőáramsűrűség változása látható 2 cm vastag hőhídmegezakítóval rendelkező és hőhídmegezakítóval nem rendelkező 30 cm-es 0,07 W/mK hővezetési tényezőjű vázkerámia modellek esetében. Ahogy ezt korábban említettem és az ábrák is alátámasztják, a hőhídmegezakítók elhagyása kis hővezetési tényezőjű tartófalak esetében nem okoz számottevő különbségeket sem a hőmérsékleteloszlásban sem a hőáramsűrűség változásban.



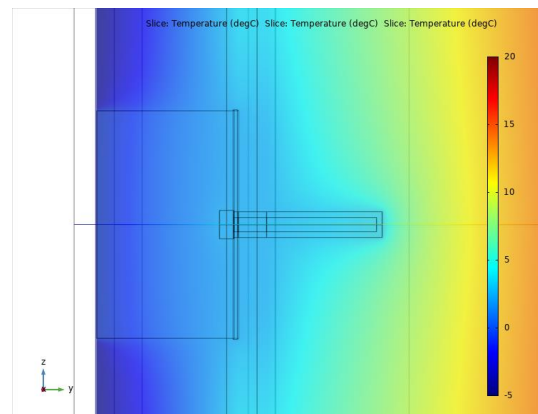
60. ábra: Hőáramsűrűség változás hőhídmegezakítóval rendelkező modell esetében



61. ábra: Hőáramsűrűség változása hőhídmegezakítóval nem rendelkező modell esetében



62. ábra: Hőmérséklet eloszlás hőhídmegezakítóval rendelkező modell esetében

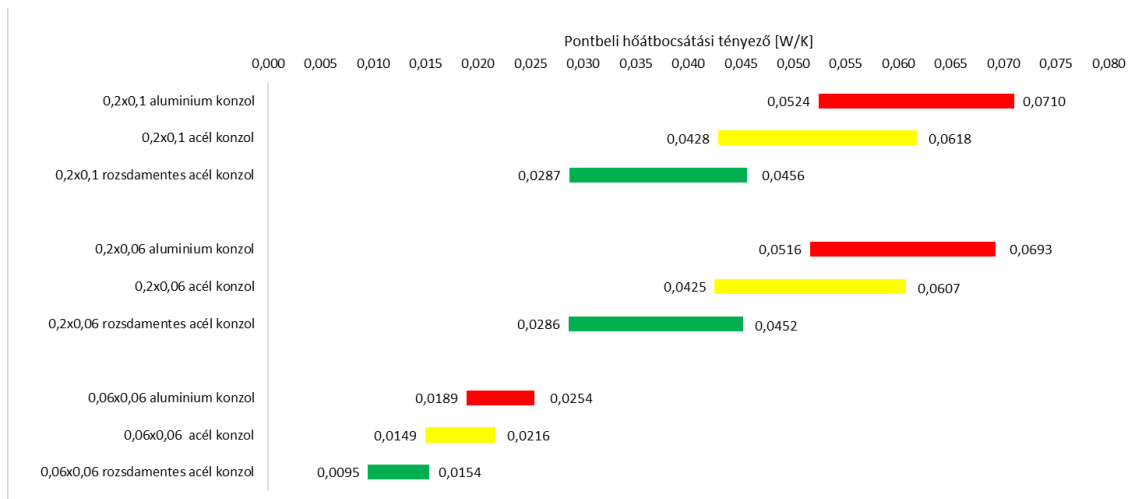


63. ábra: Hőmérséklet eloszlás hőhídmegezakítóval nem rendelkező modell esetében

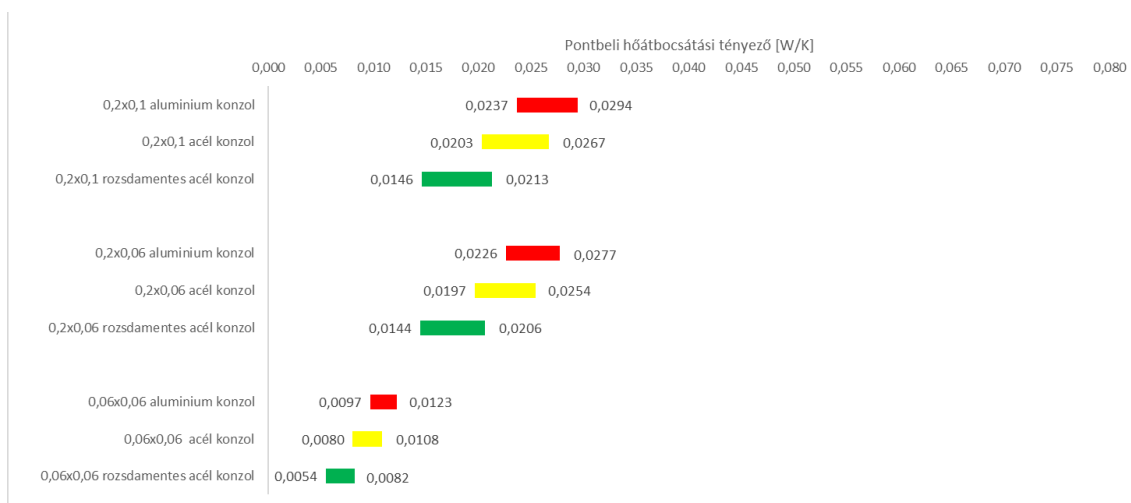
### 6.3.3. Hőhídmeگزakító alkalmazásának részletesebb vizsgálata

Ahogy azt a 6.3.2.3 fejezetben említettem a hőhídmeگزakító nélküli esetekben a minimum és maximum értékek közötti tartomány hőszigetelés tulajdonságok szerinti felbontása nem használható releváns következtetések levonására, ezért ebben az esetben tovább bontottam a tartományokat a különböző anyagú konzolok szerint, majd összehasonlítottam a hőhídmeگزakítóval ellátott modellekkel. Ezt a minden paraméterre kiterjedő lebontást a való életben leggyakrabban előforduló üreges kerámia falazóblokkból épített vázkitöltő falazat és vasbeton modellre végeztem el, amelyek a következők:

- 20 cm-es  $\lambda=0,04$  W/mK hőszigeteléssel ellátott 20 cm-es  $\lambda=2$  W/mK vasbeton fal
- 20 cm-es  $\lambda=0,04$  W/mK hőszigeteléssel ellátott 30 cm-es  $\lambda=0,19$  W/mK téglafal

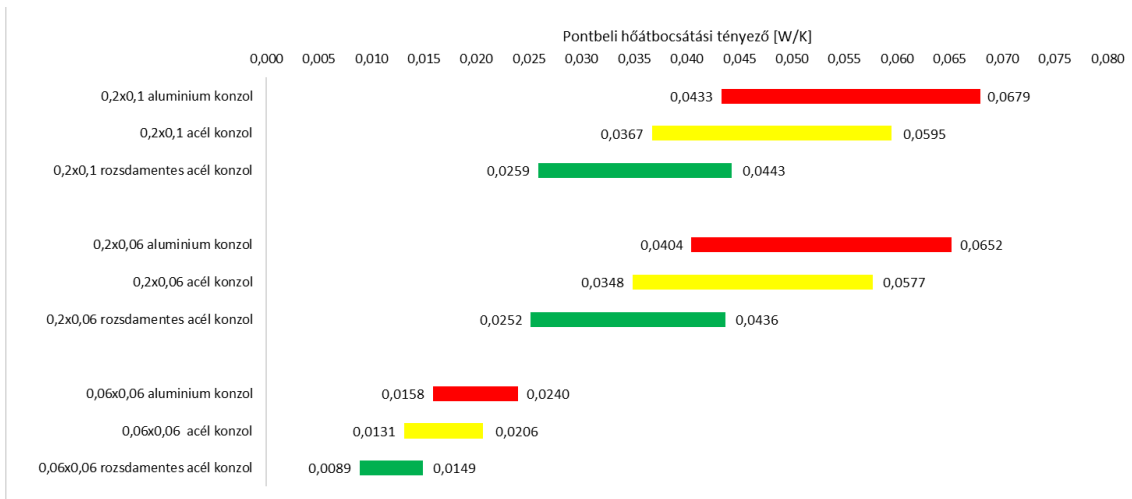


64. ábra: 20 cm-es  $\lambda=0,04$  W/mK hőszigeteléssel ellátott 20 cm-es  $\lambda=2$  W/mK vasbeton falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített hőhídmeگزakító nélküli konzolok összehasonlítása

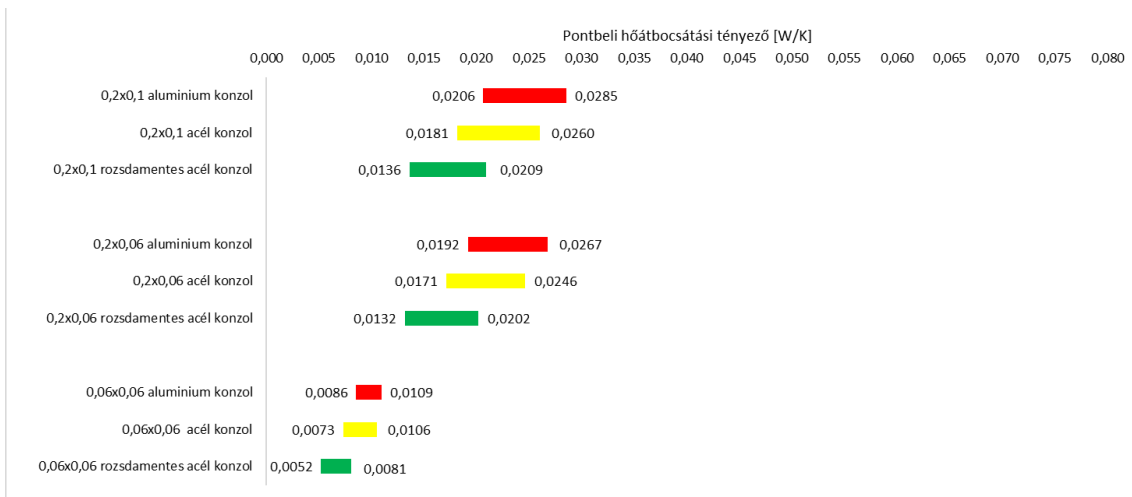


65. ábra: 20 cm-es  $\lambda=0,04$  W/mK hőszigeteléssel ellátott 30 cm-es  $\lambda=0,19$  W/mK téglafalba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített hőhídmeگزakító nélküli konzolok összehasonlítása





**66. ábra: 20 cm-es  $\lambda=0,04$  W/mK hőszigeteléssel ellátott 20 cm-es  $\lambda=2$  W/mK vasbeton falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített hőhídmeگزakitóval ellátott konzolok összehasonlítása**



**67. ábra: 20 cm-es  $\lambda=0,04$  W/mK hőszigeteléssel ellátott 30 cm-es  $\lambda=0,19$  W/mK téglafalba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50$  W/mK dübellel rögzített hőhídmeگزakitóval ellátott konzolok összehasonlítása**

Először a vasbeton modellek összehasonlítását és vizsgálatát végeztem el a 65. és 67. ábra alapján. A grafikonokon eltérő színekkel jelöltem a különböző anyagú konzolokat és egy csoportban, egymás alatt ábrázoltam az egy konzol geometriához tartozó pontbeli hőátbocsátási tényezőket. A fentebbi ábrák alapján a következő megállapítások tehetők vasbeton tartófal esetében:

- a konzol anyaga (hővezetési tényezője) nagyban befolyásolja a pontbeli hőátbocsátási tényezőt
  - minél rosszabb az anyag hővezetési tényezője, annál nagyobb a pontbeli hőátbocsátási tényező

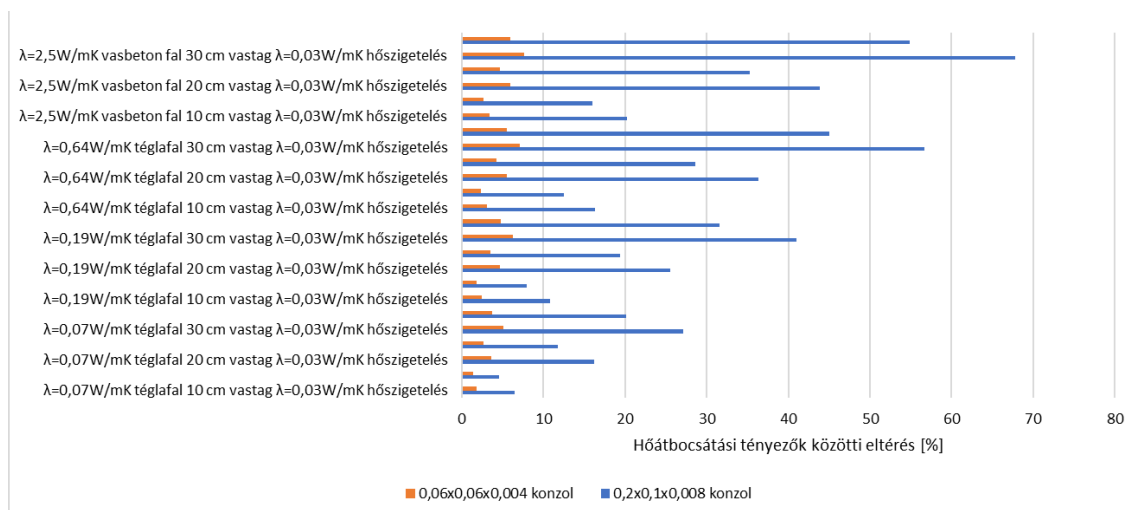
- mind hőhídmegezákítóval rendelkező, mind hőhídmegezákítóval nem rendelkező azonos geometriájú konzolok esetekben a hővezetési tényező 17-ről 160 W/m<sup>2</sup>K-re növelésével háromszorosára nő a pontbeli hőátbocsátási tényező értéke
- a konzol magassága nagyban befolyásolja a pontbeli hőátbocsátási tényezőt
  - azonos anyagú hőhídmegezákítóval rendelkező konzolokat vizsgálva a konzolmagasságot 6 cm-ről 20 cm-re növelve 2,4-2,8 szorosára nő a pontbeli hőátbocsátási tényező
  - azonos anyagú hőhídmegezákítóval nem rendelkező konzolokat vizsgálva a konzolmagasságot 6 cm-ről 20 cm-re növelve 2,4-2,8 szorosára nő a pontbeli hőátbocsátási tényező
- a konzol szélessége nem befolyásolja számottevően a pontbeli hőátbocsátási tényezőt
  - mind a négy vizsgált esetben az látszik a sávdigrammokon, hogy a 0,2x0,6 és a 0,2x0,1 geometriájú és azonos anyagú konzolok esetében az értékek közötti eltérés maximum 7%
- a hőhídmegezákító megléte kis mértékben csökkenti a pontbeli hőátbocsátási tényezőt
  - vasbeton fal esetében ez a csökkenés sehol sem haladja meg a 6%-ot
  - téglafal esetében egy kiugró értéket leszámítva az alumínium konzoloknál, ahol a csökkenés 13%, szintén nem haladja meg a csökkenés mértéke az 5%-ot

Majd a 66. és 68. ábra alapján a téglafalás modellek összehasonlítását is elvégeztem, amelyekre igazak a vasbeton modelleknél tett megállapítások. Összehasonlítva a vasbeton és a téglafal modelleket a következőket lehet megállapítani:

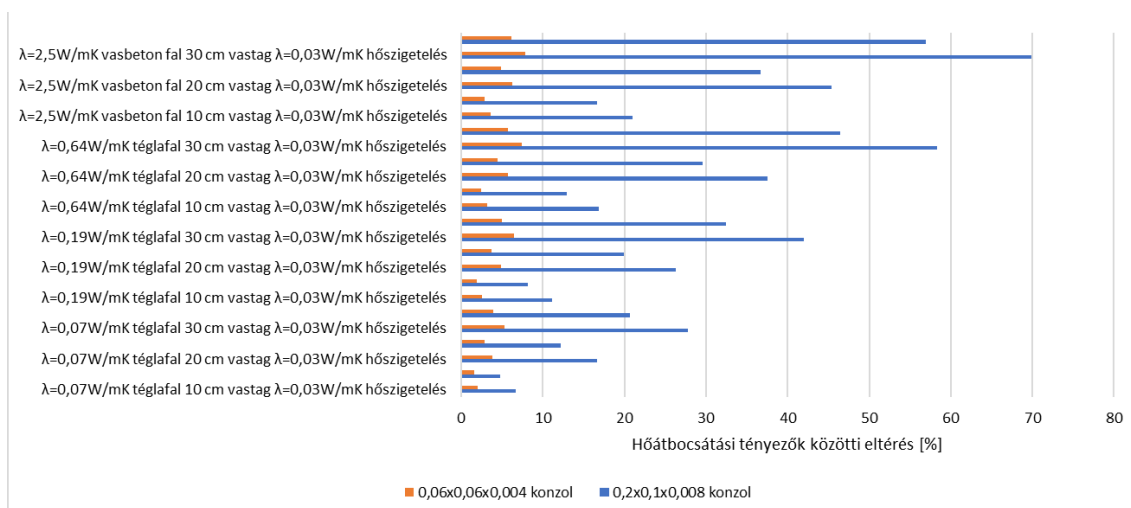
- téglafal esetében kisebb a magasabb konzoloknál az értékek szórása, mint vasbeton esetében
  - vasbeton fal esetében a konzol tulajdonságok jobban befolyásolják a pontbeli hőátbocsátási tényezőt

#### 6.3.4. A hőátbocsátási tényező romlásának vizsgálata a tartókonzolok hatására

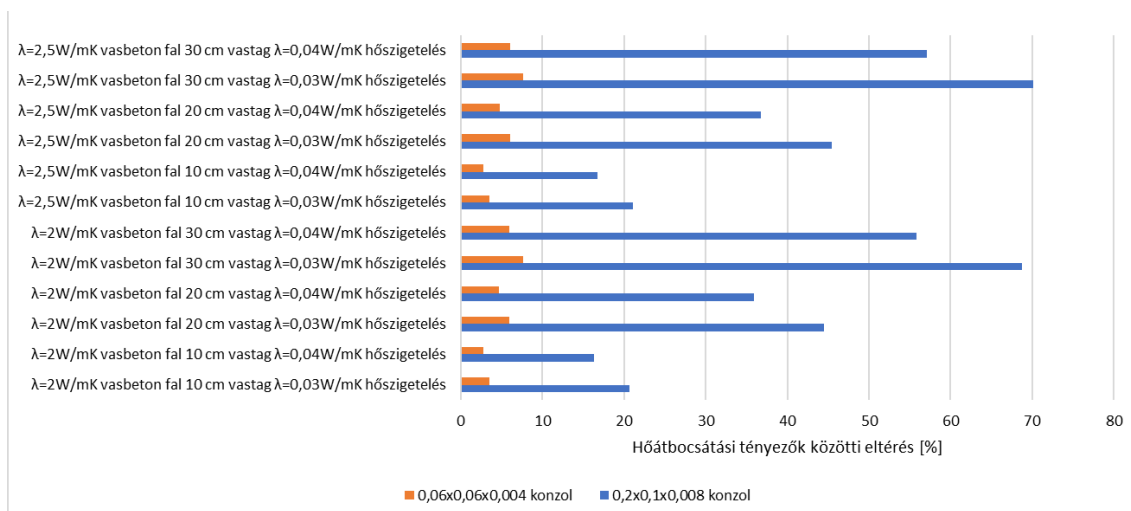
Az előző vizsgálatok legfontosabb megállapítása, hogy a tartókonzolok megléte, illetve azok mérete hatalmas eltéréseket tud okozni a pontbeli hőátbocsátási tényezőben, azaz a szimulációból adódó hőátbocsátási tényező és a konzolok figyelembevétele nélkül számolt hőátbocsátási tényező különbségében. Ebből kifolyólag fontosnak tartottam egy olyan összehasonlítást csinálni, ahol ezeket az eltéréseket százalékos formában is ábrázolom, azaz megnézem, hogy a pontbeli hőátbocsátási tényező hány %-a a korrekciók nélküli U-értéknek. Ehhez az 69.-72. ábrán csoportosított sávdiagrammokat használtam, ahol az egyik oszlop a kis konzolok, a másik oszlop a nagy konzolok esetében mutatja a %-os eltéréseket 20 és 30 cm falvastagságok, valamint hőhídmegegyenlítő használata / használata nélküli esetekben. A diagrammok elemzéséből az látszik, hogy hőhídmegegyenlítő használataival a hőátbocsátási tényezők közötti eltérés minden esetben 10% alatti, azonban a hőhídmegegyenlítő elhagyásával ez az érték 70% fölé is ugorhat. Mind a 4 diagramm képe nagyon hasonló, ugyanazok a trendek és értékek figyelhetők meg a falvastagságtól és a hőhídmegegyenlítő használatától függetlenül, ebből meglepően arra lehet következtetni, hogy ugyan a pontbeli hőátbocsátási tényező értékeiben okoznak eltéréseket ezek a tulajdonságok, de %-os eltérésekre vetítve nagyjából ugyanazt a képet kapjuk minden esetben. Ez a vizsgálat is megerősíti, hogy a pontbeli hőhidak minimalizálására a legjobb megoldás a lehetőségekhez képest a legkisebb geometriájú és legjobb anyagtulajdonságú konzolok kiválasztása.



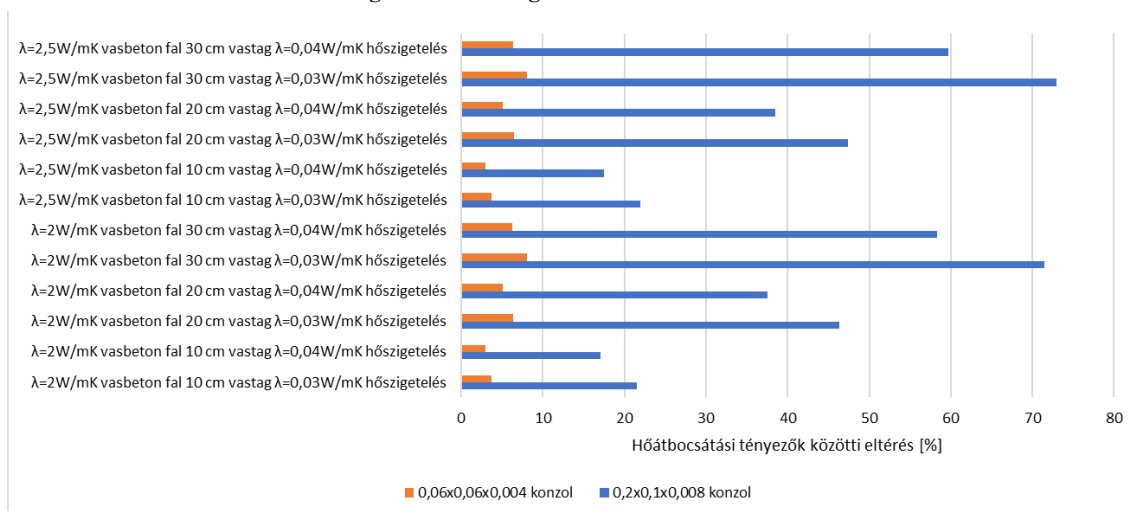
68. ábra: Hőátbocsátási tényezők közötti %-os eltérés 30 cm vastag falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50\text{ W/mK}$  dübelrel rögzített hőhídmegegyenlítővel ellátott konzolok esetén



69. ábra: Hőátbocsátási tényezők közötti %-os eltérés 30 cm vastag falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50 W/mK$  dübellel rögzített hőhídmegezikítő nélküli konzolok esetén



70. ábra: Hőátbocsátási tényezők közötti %-os eltérés 20 cm vastag falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50 W/mK$  dübellel rögzített hőhídmegezikítővel ellátott konzolok esetén



71. ábra: Hőátbocsátási tényezők közötti %-os eltérés 20 cm vastag falba 1 db 15 cm-es  $\lambda=50 W/mK$  dübellel rögzített hőhídmegezikítő nélküli konzolok esetén

#### 6.4. Korrekciós képlet létrehozása

Az előző fejezetekben az eredmények kiértékelése során azon paraméterek kiszűrése volt a célom, amelyeknek jelentős hatása van a pontbeli hőátbocsátási tényezőre. Erre többek között azért is volt szükség, hogy a korrekciós képlet kialakításánál tudjam melyik paramétereknek kell biztosan szerepelniük a számításban és melyek azok, amelyek elhanyagolhatók. A grafikonos kiértékelések során arra jutottam, hogy a konzol anyag és geometriai tulajdonságai, illetve a hőszigetelés paramétereit is biztosan figyelembe kell venni, azok szignifikáns hatása miatt. A hőhídmegszakítók megléte 5-6%-os csökkenést eredményez a pontbeli hőátbocsátási tényező értékekben, így ez a hatás nem mondható számottevőnek, de a számítás szempontjából érdemes lehet ezt a paramétert is vizsgálni. Az alapkoncepció a képlet létrehozásában a már létező, egyszerűsített módszernél alkalmazott (4.3.1) „dübelkorrekciós képlet” átalakítása és a konzolok esetére való aktualizálása volt. A képlet a következő:

$$\Delta U_f = \alpha * \frac{n_{db} * A_f * \lambda_f}{d_0} * \left(\frac{R_1}{R_{th}}\right)^2 \left[\frac{W}{m^2 * K}\right] \quad (18)$$

ahol:

- $n_{db}$ : rögzítőelemek egy négyzetméterre jutó darabszáma
- $A_f$ : egy rögzítőelem keresztmetszeti területe  $m^2$ -ben
- $\lambda_f$ : rögzítőelem hővezetési tényezője
- $R_1 = \frac{d_0}{\lambda_{hőszigetelés}}$  a rögzítés által átszűrt hőszigetelés hővezetési tényezője
- $R_{th} = R_{se} + \sum_i \frac{d_i}{\lambda_i} + R_{si}$  a keresztmetszet korrigálatlan hővezetési ellenállása
- $\alpha$ : korrekciós szorzó dübelelés esetében

Rögzítőelemek jelen esetben a konzolok, így a rögzítőelemekre vonatkozó tényezők esetében a konzol tulajdonságait kell figyelembe venni. A képlet eredeti formájában a tényezők között szerepel mind a hőszigetelésre, mind magára a rétegre vonatkozó paraméter, viszont dübelelésre és hőhídmegszakítóra nincs vonatkozó paraméter. Az elképzelésem szerint egy  $\alpha$ -tényezőhöz hasonló konstans szorzóval venném figyelembe a képletből hiányzó paraméterek hatását, ehhez egy táblázatos vizsgálatot készítettem. Az 54. ábrán lévő táblázat részletben megadtam az adott modellre vonatkozó összes paramétert és a szimuláció során számolt pontbeli hőátbocsátási tényezőt, illetve egy oszlopban minden vizsgált modell esetében kiszámoltam az adott paraméterekkel a dübelkorrekciós képlet eredményét a konzolokra

vonatkoztatva. Az 73. ábrán lévő táblázat részletben külön kiszámoltam az ugyanahhoz a paraméterkombinációhoz tartozó hőhídmegezakítóval rendelkező és nem rendelkező modellek esetéhez tartozó pontbeli hőátbocsátási tényezőket és megnéztem, hogy mennyi az eltérés a korrekciós képlet eredeti formájában számolt eredmények és a szimulációból nyert  $\chi$ -értékek között.

Paraméterek															
anyag	n	$\lambda d$	If	dbv	$\lambda bv$	df	$\lambda f$	dkv	$\lambda kv$	dhsz	$\lambda hsz$	konzol geometria	$\lambda k$	$\lambda hm$	dhm
tégla	1	50	0,15	0,015	0,8	0,38	0,72	0,01	0,8	0,1	0,03	0,06x0,06x0,004	17	0,25	0,005
tégla	1	50	0,15	0,015	0,8	0,38	0,72	0,01	0,8	0,1	0,03	0,06x0,06x0,004	17	0,25	0,02
tégla	1	50	0,15	0,015	0,8	0,38	0,72	0,01	0,8	0,1	0,03	0,06x0,06x0,004	17	0,5	0,005
tégla	1	50	0,15	0,015	0,8	0,38	0,72	0,01	0,8	0,1	0,03	0,06x0,06x0,004	17	0,5	0,02
tégla	1	50	0,15	0,015	0,8	0,38	0,72	0,01	0,8	0,1	0,04	0,06x0,06x0,004	17	0,25	0,005
tégla	1	50	0,15	0,015	0,8	0,38	0,72	0,01	0,8	0,1	0,04	0,06x0,06x0,004	17	0,25	0,02
tégla	1	50	0,15	0,015	0,8	0,38	0,72	0,01	0,8	0,1	0,04	0,06x0,06x0,004	17	0,5	0,005
tégla	1	50	0,15	0,015	0,8	0,38	0,72	0,01	0,8	0,1	0,04	0,06x0,06x0,004	17	0,5	0,02

72. ábra: Egyes téglá modellekhez tartozó paraméterek

Korrekciós képlet	Hőhídmegezakító			Hőhídmegezakító nélkül			Korrekció							
	$\chi$ számolt	$\chi$ szimuláció	$\Delta\chi$	$\Delta\chi$ %	$\chi$ számolt	$\chi$ szimuláció	$\Delta\chi$	$\Delta\chi$ %	szorzó	$\chi$ számolt	$\Delta\chi$ hm	$\Delta\chi$ %	$\Delta\chi$ hmnélkül	$\Delta\chi$ %
	0,0195142	0,0074869	0,0120273	260,65	0,0076925	0,0118217	253,68		0,4	0,0078057	0,0003188	104,26	0,0001132	101,47
	0,0195142	0,0073802	0,0121340	264,41	0,0076925	0,0118217	253,68		0,4	0,0078057	0,0004255	105,77	0,0001132	101,47
	0,0195142	0,0076384	0,0118758	255,48	0,0076925	0,0118217	253,68		0,4	0,0078057	0,0001673	102,19	0,0001132	101,47
	0,0195142	0,0076890	0,0118252	253,79	0,0076925	0,0118217	253,68		0,4	0,0078057	0,0001167	101,52	0,0001132	101,47
	0,0299295	0,0073003	0,0226292	409,98	0,0075194	0,0224101	398,03		0,25	0,0074824	0,0001821	102,49	-0,0000370	99,51
	0,0299295	0,0071737	0,0227558	417,21	0,0075194	0,0224101	398,03		0,25	0,0074824	0,0003087	104,30	-0,0000370	99,51
	0,0299295	0,0074623	0,0224672	401,08	0,0075194	0,0224101	398,03		0,25	0,0074824	0,0000201	100,27	-0,0000370	99,51
	0,0299295	0,0075076	0,0224219	398,66	0,0075194	0,0224101	398,03		0,25	0,0074824	-0,0000252	99,66	-0,0000370	99,51

73. ábra: Korrekciós szorzó keresése téglá modellek esetében

A vizsgálat során először megnéztem, hogy a már korábban tett következtetésem mennyire igazak a részletesen vizsgált modellek esetében is. Ahogy ez az 73. és 74. ábrákon lévő táblázatrésztelen is látszik, a  $\Delta\chi$ -értékekben a hőszigetelés hővezetési tényezőjének és vastagságának változtatásával történik először jelentős változás, a hőhídmegezakító tulajdonságainak, illetve a hőszigetelés hővezetési tényezőjének változtatásával 10%-on belüli eltérések fordulnak elő. Ugyanebben a táblázatban megvizsgáltam a többi paraméter hatását is és hasonlóan a korábbi elemzések eredményével arra jutottam, hogy a dűbelezés tulajdonságainak változtatása szintén maximum 10%-os eltéréseket okoz a pontbeli hőátbocsátási tényező értékében, viszont a konzol geometriájának és anyagának változása jelentős eltéréseket okoz. Ezek alapján azt a stratégiát választottam, hogy külön csoportonként fogom vizsgálni az adott hőszigetelés, fal és konzol tulajdonságokhoz tartozó eseteket és megnézem, hogy milyen konstans szorzóval érhetem el, hogy a korrekciós képlet lehetőleg 5-10%-os hibahatáron belül visszaadja a szimuláció eredményeit. Az 74. ábrán piros színnel

jelöltem az adott modellhez tartozó korrekciós szorzót, amely megválasztásánál igyekeztem mind a hőhídmegegyeztetővel rendelkező, mind a hőhídmegegyeztetővel nem rendelkező esetekben arra, hogy jó közelítéssel visszakapjam a valós pontbeli hőátbocsátási tényezőt. Vázkerámia anyagú tartófallal rendelkező modellek esetében jól látszódott, hogy a különböző modellekre négyesével tudok azonos szorzót megadni és csoportosítani őket aszerint, hogy egy csoportba tartozónak vettem az azonos hőszigetelés-, fal-, dübel- és konzoltulajdonságokkal rendelkező csoportokat. Emiatt a korrekciós szorzó táblázatos formában való megadása mellett döntöttem, ahol a táblázatokat úgy alakítottam ki, hogy külön vettem az adott falvastagsághoz és hővezetési tényezőhöz tartozó modelleket. Az 75. ábrán példaként a 38 cm vastag  $\lambda=0,72$  W/mK hővezetési tényezőjű fal táblázata látható. Téglafal esetében így összesen 7 db hasonló táblázat készült el az összes vizsgált falvastagságot és hővezetési tényezőt figyelembe véve. A táblázat felső sorában a különböző hőszigetelés tulajdonságokhoz, míg bal szélső oszlopában a különböző konzol hővezetési tényezőkhöz tartozó értékeket találni a konzol geometria függvényében. A többi falvastagságra és hővezetési tényezőre vonatkozó szorzótényezőket tartalmazó táblázat az alábbi drive címen érhető el: <https://bit.ly/34uWrKH>

38 cm téglafal $\lambda=0,72$ W/mK							
Konzol hővezetési tényező [W/m <sup>2</sup> K]	Hőszigetelés vastagság [m]						Konzol geometria [m x d]
	0,1		0,2		0,3		
	Hőszigetelés hővezetési tényező [W/m <sup>2</sup> K]						
	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	
17	0,320	0,200	2,000	1,200	5,360	3,440	0,06 x 0,004
	0,240	0,152	1,600	0,960	4,400	2,800	0,06 x 0,008
	0,280	0,168	1,760	1,120	4,800	3,040	0,2 x 0,004
	0,200	0,128	1,360	0,800	4,000	2,400	0,2 x 0,008
50	0,128	0,088	0,960	0,600	3,120	1,920	0,06 x 0,004
	0,096	0,064	0,720	0,440	2,240	1,440	0,06 x 0,008
	0,120	0,072	0,800	0,560	2,720	1,600	0,2 x 0,004
	0,080	0,048	0,600	0,360	1,920	1,120	0,2 x 0,008
160	0,048	0,032	0,360	0,240	1,280	0,880	0,06 x 0,004
	0,032	0,020	0,240	0,160	0,880	0,520	0,06 x 0,008
	0,040	0,026	0,320	0,200	1,040	0,640	0,2 x 0,004
	0,026	0,016	0,200	0,120	0,640	0,480	0,2 x 0,008

74. ábra: Korrekciós szorzókat tartalmazó táblázat téglafal esetében

Vasbeton tartófallal esetében is megvizsgáltam az egyes modellekhez tartozó értékeket és eltéréseket. Azt tapasztaltam a paraméterek hatásait vizsgálva, hogy vasbeton esetében a fal különböző vastagsága és hővezetési tényezőjének változása nincs jelentős hatással a pontbeli

hőátbocsátási tényezőre, így a korrekciós tényezőtől való eltérésre sem. Hasonlóan a téglamodell esetéhez a csoportosítások a konzol anyag és geometriai tulajdonságai, a hőszigetelés vastagság és hővezetési tényezője szerint történt, így egy szorzótényezőhöz 4 db modell hőhídmegszakítóval rendelkező és hőhídmegszakítóval nem rendelkező értékei tartoznak. Az 76. és 77. ábrán a vasbeton modelleket tartalmazó táblázat részletei láthatók. Ebben az esetben is törekedtem arra, hogy a szorzótényezővel korrigált képlet eredménye maximum 10%-os hibahatáron belül visszaadja a szimuláció során kapott értékeket. Leszámítva néhány kiugró értéket sikerült is tartani a hibahatárt, illetve törekedtem arra is, hogy inkább 100% feletti értékeket kapjak vissza, hogy a közelítés a biztonság javára történjen.

Paraméterek														
n	ld	lf	dbv	lbv	df	lf	dkv	lkv	dhsz	lhsz	konzol geometria	lk	lhm	dhm
1	50	0,15	0,015	0,8	0,3	2,5	0,01	0,8	0,1	0,03	0,06x0,06x0,004	50	0,25	0,005
1	50	0,15	0,015	0,8	0,3	2,5	0,01	0,8	0,1	0,03	0,06x0,06x0,004	50	0,25	0,02
1	50	0,15	0,015	0,8	0,3	2,5	0,01	0,8	0,1	0,03	0,06x0,06x0,004	50	0,5	0,005
1	50	0,15	0,015	0,8	0,3	2,5	0,01	0,8	0,1	0,03	0,06x0,06x0,004	50	0,5	0,02
1	50	0,15	0,015	0,8	0,3	2,5	0,01	0,8	0,1	0,04	0,06x0,06x0,004	50	0,25	0,005
1	50	0,15	0,015	0,8	0,3	2,5	0,01	0,8	0,1	0,04	0,06x0,06x0,004	50	0,25	0,02
1	50	0,15	0,015	0,8	0,3	2,5	0,01	0,8	0,1	0,04	0,06x0,06x0,004	50	0,5	0,005
1	50	0,15	0,015	0,8	0,3	2,5	0,01	0,8	0,1	0,04	0,06x0,06x0,004	50	0,5	0,02

75. ábra: Egyes vasbeton modellekhez tartozó paraméterek

Korrekciós képlet	Hőhídmegszakító			Hőhídmegszakító nélkül			Korrekció					
	$\chi$ számolt	$\chi$ szimuláció	$\Delta\chi$ %	$\chi$ számolt	$\chi$ szimuláció	$\Delta\chi$ %	szorzó	$\chi$ számolt	$\Delta\chi$ hm	$\Delta\chi$ %	$\Delta\chi$ hmnélkül	$\Delta\chi$ %
0,0700934	0,0118110	0,0582824	593,46	0,0123340	0,0071802	568,29	0,17	0,0119159	0,0001049	100,89	-0,0004181	96,61
0,0700934	0,0111970	0,0588964	626,00	0,0123340	0,0071802	568,29	0,17	0,0119159	0,0007189	106,42	-0,0004181	96,61
0,0700934	0,0120730	0,0580204	580,58	0,0123340	0,0071802	568,29	0,17	0,0119159	-0,0001571	98,70	-0,0004181	96,61
0,0700934	0,0116810	0,0584124	600,06	0,0123340	0,0071802	568,29	0,17	0,0119159	0,0002349	102,01	-0,0004181	96,61
0,1131017	0,0124440	0,1006577	908,89	0,0130760	0,0168535	864,96	0,11	0,0124412	-0,0000028	99,98	-0,0006348	95,15
0,1131017	0,0116870	0,1014147	967,76	0,0130760	0,0168535	864,96	0,11	0,0124412	0,0007542	106,45	-0,0006348	95,15
0,1131017	0,0127600	0,1003417	886,38	0,0130760	0,0168535	864,96	0,11	0,0124412	-0,0003188	97,50	-0,0006348	95,15
0,1131017	0,0122640	0,1008377	922,23	0,0130760	0,0168535	864,96	0,11	0,0124412	0,0001772	101,44	-0,0006348	95,15

76. ábra: Korrekciós szorzó keresése vasbeton modellek esetében

A 78. ábrán található a vasbeton modellekre vonatkozó szorzótényezőket összegyűjtő táblázat, ahogy említettem ebben az esetben elegendő volt egy táblázat létrehozása, mert a tartófal tulajdonságai mentén nem kellett elkülöníteni az eseteket. Vizsgálataim során a táblázatok sorai és oszlopai között igyekeztem összefüggéseket keresni, hogy az értékek határai kiterjeszthetők legyenek a későbbiekben. A következő összefüggéseket sikerült megállapítanom:

- az azonos tulajdonságokkal rendelkező, de a konzol hővezetési tényezőjében eltérő modellek szorzótényezőinek hányadosa jó közelítéssel megegyezik a konzol hővezetési tényező hányadosával, tehát a két mennyiség között egyenes arányosság állhat fent



- az azonos tulajdonságokkal rendelkező, de a konzol magasságában eltérő téglá modellek szorzótényezőinek hányadosa a legtöbb esetben 1,4 és 1,6 közé esik
- az azonos tulajdonságokkal rendelkező, de a konzol magasságában eltérő vasbeton modellek szorzótényezőinek hányadosa a legtöbb esetben 1,05 és 1,2 közé esik
- az azonos tulajdonságokkal rendelkező, de a konzol vastagságában eltérő modellek szorzótényezőinek hányadosa a legtöbb esetben 1,3 és 1,6 közé esik
- alacsony téglá hővezetési tényezőjű modellek esetében megfigyelhető, hogy az azonos tulajdonságokkal rendelkező 0,06x0,06x0,08 és 0,2x0,06x0,04 konzol geometriájú modellek korrekciós szorzói megegyeznek

Abból kifolyólag, hogy viszonylag állandó a szorzótényezők hányadosa, a táblázatban a köztes értékek lineáris interpolációval is megkaphatók. A hányadosok közötti szórás egyrészt annak köszönhető, hogy a megállapított szorzótényezők nem minden esetben ugyanolyan %-os hibával adják vissza a korrekciós képlet értékét, mert az adatok szórása nem minden esetben egyenletes.

Vasbeton tartófal							
Konzol hővezetési tényező [W/m <sup>2</sup> K]	Hőszigetelés vastagság [m]						Konzol geometria [m x d]
	0,1		0,2		0,3		
	Hőszigetelés hővezetési tényező [W/m <sup>2</sup> K]						
	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	
17	0,320	0,208	2,000	1,256	5,600	3,360	0,06 x 0,004
	0,240	0,160	1,680	1,040	4,800	2,880	0,06 x 0,008
	0,296	0,184	1,840	1,080	5,200	3,200	0,2 x 0,004
	0,224	0,136	1,480	0,880	4,160	2,560	0,2 x 0,008
50	0,136	0,088	1,040	0,640	3,200	2,080	0,06 x 0,004
	0,096	0,064	0,760	0,480	2,400	1,520	0,06 x 0,008
	0,120	0,080	0,920	0,560	2,800	1,760	0,2 x 0,004
	0,088	0,056	0,680	0,400	2,080	1,280	0,2 x 0,008
160	0,048	0,032	0,400	0,264	1,360	0,880	0,06 x 0,004
	0,032	0,021	0,272	0,176	0,920	0,560	0,06 x 0,008
	0,040	0,028	0,336	0,224	1,120	0,720	0,2 x 0,004
	0,030	0,019	0,232	0,144	0,800	0,480	0,2 x 0,008

77. ábra: Korrekciós tényezők vasbeton modellek esetében

## 7. Összefoglalás

A dolgozat célja az volt, hogy alátámasszam a mechanikai rögzítőrendszerek hatását a pontbeli hőhidakra és összefoglaljam a vizsgálatok eredményét. A kutatás során szélesebb skálán vizsgáltam a paraméterek hatását, mint a szakirodalmi vizsgálat során feltárt kutatások túlnyomó többsége, így a hazai gyakorlatban is alkalmazható hőhidkatalógust sikerült létrehoznom. A korrekciós képletet jelen dolgozat keretében a korrekciós tényezők táblázatos formájában adtam meg, úgy, hogy vizsgáltam a tényezők közötti lehetséges összefüggéseket. Mivel az értékek között tényleges összefüggések állnak fent, a hányadosok több esetben is állandónak mondhatók, így további vizsgálatokkal akár függvényekkel is megadhatók az adott modellekhez tartozó korrekciós szorzók vagy egy egyszerűsített számítási képlet is kidolgozható. Ehhez azonban pontosabb matematikai vizsgálatok is szükségesek. Összességében elmondható, hogy a numerikus szimulációk eredményei is jól mutatják aényt, miszerint a mechanikai rögzítéseknél csak a dübelezés figyelembevétele nem elegendő, a konzolok hatása a pontbeli hőátbocsátási tényezőre szintén számottevő. Ezen hatás elhanyagolása a rétegrendi hőátbocsátási tényező számításánál jelen vizsgálat szerint, akár  $0,077 \text{ W/m}^2\text{K}$  eltérést is okozhat a számolt és a szimulált eredmények között. Fontos megemlíteni, hogy ezt az eltérést 1 db konzol alkalmazása  $1 \text{ m}^2$ -nyi falfelületen okozza, a valóságban olyan esetek is előfordulnak, amikor 2-3 db tartókonzol is van ekkora felületen, így ez a különbség jóval nagyobb is lehet. Figyelembe véve, hogy a homlokzati falra vonatkozó hőátbocsátási tényező követelmény értéke  $0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$ , a konzol hatásának elhanyagolásával jóval a valós érték alatti értékeket kaphatunk úgy, hogy a valóságban az adott rétegrendi kialakítás nem felel meg az előírásoknak.

## 8. Irodalomjegyzék

- [1] “Infopark „D” épület - HAP | HAP | TERVEZŐIRODA KFT.” <http://hap.hu/portfolio/irodaepulet-d-bp-xi-infopark/> (accessed Nov. 02, 2020).
- [2] “Facade fiber cement material - EQUITONE.” <https://www.equitone.com/en/> (accessed Nov. 02, 2020).
- [3] M. Ibañez-Puy, M. Vidaurre-Arbizu, J. A. Sacristán-Fernández, and C. Martín-Gómez, “Opaque Ventilated Façades: Thermal and energy performance review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 79, no. May, pp. 180–191, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.05.059.
- [4] MSZ EN ISO 6946:2017, “Épületszerkezetek és épületelemek. Hővezetési ellenállás és hőátbocsátás. Számítási módszerek,” *Hungarian Stand. Inst.*, 2020.
- [5] A. Gagliano and S. Aneli, “Analysis of the energy performance of an Opaque Ventilated Façade under winter and summer weather conditions,” *Sol. Energy*, vol. 205, pp. 531–544, Jul. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.05.078.
- [6] MAGYAR JOGSZABÁLY TÁR, “7/2006 TNM Rendelet,” no. 3, 2020.
- [7] MSZ EN ISO 10211:2017, “Hőhidak az épületszerkezetekben. Hőáramok és felületi hőmérsékletek. Részletes számítások,” *Hungarian Stand. Inst.*, 2019.
- [8] B. Anderson, “Conventions for U-value calculations,” *Bre 4432006*, p. 2 to 3, 2006.
- [9] Hilti, “Átszellőztetett homlokzatburkolatok U-érték műszaki leírás,” pp. 1–32, [Online]. Available: [https://www.hilti.se/content/dam/documents/e1/eurofox-data/Technical\\_Manual\\_VF\\_Section\\_06\\_U-Value.pdf](https://www.hilti.se/content/dam/documents/e1/eurofox-data/Technical_Manual_VF_Section_06_U-Value.pdf).
- [10] MSZ EN ISO 10456:2008, “Építési anyagok és termékek. Hő- és nedvességtechnikai tulajdonságok. Táblázatos tervezési értékek, illetve eljárások a közölt és tervezési hőtechnikai értékek meghatározására (ISO 10456:2007),” *Hungarian Stand. Inst.*, 2008.
- [11] P. T. Bridge and C. C. Act, “Thermal Bridging in Rainscreen Cladding.”
- [12] T. Theodosiou, K. Tsikaloudaki, S. Tsoka, and P. Chastas, “Thermal bridging problems on advanced cladding systems and smart building facades,” *J. Clean. Prod.*, vol. 214, pp. 62–69, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.12.286.
- [13] T. G. Theodosiou, A. G. Tsikaloudaki, K. J. Kontoleon, and D. K. Bikas, “Thermal bridging analysis on cladding systems for building facades,” *Energy Build.*, vol. 109, pp. 377–384, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.10.037.
- [14] T. Theodosiou, K. Tsikaloudaki, and D. Bikas, “Analysis of the Thermal Bridging Effect on Ventilated Facades,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 38, pp. 397–404, 2017, doi: 10.1016/j.proenv.2017.03.121.

- [15] J. Šadauskiene, J. Ramanauskas, L. Šeduikyte, M. Daukšys, and A. Vasylius, “A simplified methodology for evaluating the impact of point thermal bridges on the high-energy performance of a Passive House,” *Sustain.*, vol. 7, no. 12, pp. 16687–16702, 2015, doi: 10.3390/su71215840.
- [16] J. Šadauskienė, J. Ramanauskas, L. Šeduikytė, and A. Buska, “Assessment of buildings with ventilated facade systems and evaluation of point thermal bridges,” *J. Sustain. Archit. Civ. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 59–71, 2015, doi: 10.5755/j01.sace.11.2.12606.
- [17] B. Z. García, B. A. Goikolea, J. M. G. Martín, and J. L. Hernández García, “Comparison of theoretical heat transfer model with results from experimental monitoring installed in a refurbishment with ventilated facade,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 410, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1755-1315/410/1/012104.
- [18] A. Levinskytė, R. Bliūdžius, A. Burlingis, and T. Makaveckas, “Dependencies of heat transmittance through the ventilated wall system on thermal conductivity of connectors crossing thermal insulation layer,” *MATEC Web Conf.*, vol. 282, no. 2019, p. 02089, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201928202089.
- [19] MSZ EN ISO 8990:2000, “Hőszigetelés. Hőátbocsátási tulajdonságok meghatározása állandósult állapotban. Kalibrált kamra és segédkamra (ISO 8990:1994),” *Hungarian Stand. Inst.*, vol. 2000, no. 5, 2000.
- [20] “Rainscreen Thermal Calculations | NVELOPE.” <https://nvelope.com/rainscreen-thermal-calculations.php> (accessed Nov. 02, 2020).
- [21] POROTHERM, “Alkalmazási és tervezési útmutató 2020,” 2020, [Online]. Available: <https://www.wienerberger.hu/letoltesek.html>.
- [22] YTONG, “Műszaki adatkatalógus 2020,” [Online]. Available: [https://www.ytong.hu/muszaki-prospektusok-arlist?gclid=Cj0KCQjwufn8BRCwARIsAKzP697IWc4zsIoIV1dPmKtqP1YeCBevAMJDWS3b6vW-Sfe\\_9xA15npr\\_TsaAsD7EALw\\_wcB](https://www.ytong.hu/muszaki-prospektusok-arlist?gclid=Cj0KCQjwufn8BRCwARIsAKzP697IWc4zsIoIV1dPmKtqP1YeCBevAMJDWS3b6vW-Sfe_9xA15npr_TsaAsD7EALw_wcB).
- [23] ALLFACE, “Műszaki katalógus.” [Online]. Available: <http://www.allface.com/index-en.html>.
- [24] KEIL, “Műszaki adatkatalógus,” 2020, [Online]. Available: <https://keil-fixing.de/en/system/undercut-system/>.
- [25] EUROFOX, “Artikelliste | articlelist 2010,” 2010, [Online]. Available: [http://lambdawebshop.shoprenter.hu/custom/lambdawebshop/image/data/Gyártói\\_katalógusok/EUROFOX\\_Artikelliste\\_Partlist.pdf](http://lambdawebshop.shoprenter.hu/custom/lambdawebshop/image/data/Gyártói_katalógusok/EUROFOX_Artikelliste_Partlist.pdf).
- [26] ComsolMultiphysics, “Heat Transfer Module,” *Manual*. pp. 1–222, 2015.