



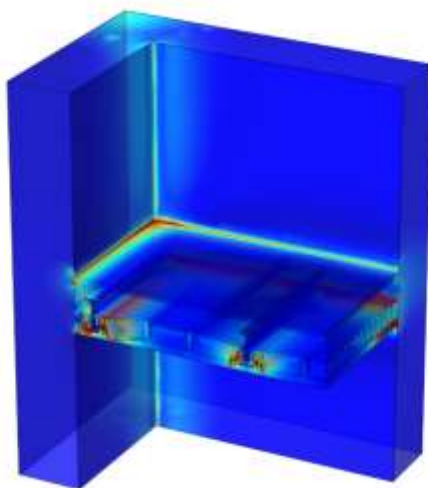
Budapesti Műszaki-és Gazdaságtudományi Egyetem

Építőmérnöki Kar

Építőanyagok- és Magasépítés Tanszék

TDK Dolgozat

Történeti épületek födém szerkezeteinek higrotermikus elemzése



Készítette:

Petresevics Fanni, LM25TC, MSc hallgató

Konzulensek:

Dr. Nagy Balázs

Dr. Déry Attila

Budapest, 2022.11.01.

Tartalom

1. Ábrajegyzék	4
2. Táblázatjegyzék	5
3. Absztrakt	6
3.1. Absztrakt	6
3.2. Summary	7
4. Bevezetés	9
5. Szakirodalmi áttekintés, alapismeretek	11
5.1. Vizsgált hagyományos födémszerkezetek bemutatása	11
5.1.1. Poroszsüveg födém	14
5.1.2. Monier-födém	16
5.1.3. Horcsik- (Kleine-) födém	17
5.1.4. Bohn-födém	18
5.1.5. E-gerendás födém	19
5.2. Kapcsolt hő- és nedvességtranszport modellezés	20
5.2.1. Méretezési szabványok	22
6. Modellezés és szimuláció	23
6.1. Födémek modellezése	24
6.1.1. Rétegrendi kialakítások	25
6.2. Anyagtulajdonságok	26
6.3. Numerikus számítási módszer, fizika	28
6.3.1. Hőtranszport	29
6.3.2. Nedvességtranszport	31
7. Szimulációk kiértékelésének módszertana	33
7.1. Többlet hővesztesség meghatározása	33

7.2. Saját léptékben mért hőmérséklet	35
8. Eredmények	36
8.1. Hőtechnikai szimulációk eredményei	36
8.2. Higrotermikus szimulációk eredményei	36
8.3. Eredmények vizualizálása	37
8.4. Eredmények kiértékelése, összehasonlítása	43
9. Összefoglalás	47
10. Irodalomjegyzék	48

1. Ábrajegyzék

1. ÁBRA: BUDAPESTI NAGYPOLGÁRI LAKÓHÁZAK (FOTÓ: MAJOR KATA - WE LOVE BUDAPEST).....	9
2. ÁBRA: MEGÉPÜLT POROSZSÜVEG FÖDÉM (FOTÓ: KVARC ÉPÍTÉSZ STÚDIÓ).....	14
3. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM VÁZLATOS ÁBRÁJA (SAJÁT ÁBRA).....	15
4. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM VÁZLATOS ÁBRÁJA (SAJÁT ÁBRA).....	17
5. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM VÁZLATOS ÁBRÁJA (SAJÁT ÁBRA).....	17
6. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM VÁZLATOS ÁBRÁJA (SAJÁT ÁBRA).....	18
7. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM VÁZLATOS ÁBRÁJA (SAJÁT ÁBRA).....	19
8. ÁBRA: NEDVESSÉGÁRAM ELOSZLÁS ÁBRA FA FÖDÉM-FAL CSATLAKOZÁS ESETÉBEN [29]	21
9. ÁBRA: HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ VÁZLATOS FOLYAMATÁBRÁJA [14].....	23
10. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM KÜLÖNBÖZŐ KIALAKÍTÁSÚ GEOMETRIAI MODELLJEI	25
11. ÁBRA: VAKOLAT, HABARCS, BETON, VASBETON ÉS ÉGETETT KERÁMIA NEDVESSÉGTÁROLÓ KÉPESSÉGE	28
12. ÁBRA: FA ÉS SALAKFELTÖLTÉS NEDVESSÉGTÁROLÓ KÉPESSÉGE	28
13. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	38
14. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	38
15. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	38
16. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	38
17. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	38
18. ÁBRA: POROSZSÜVEG FÖDÉM NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN.....	38
19. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN.....	39
20. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	39
21. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	39
22. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN.....	39
23. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN.....	39
24. ÁBRA: MONIER-FÖDÉM NEDVESSÉGÁRAM ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN.....	39
25. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	40
26. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	40
27. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	40
28. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	40
29. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN.....	40
30. ÁBRA: HORCSIK-FÖDÉM NEDVESSÉGÁRAM ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	40
31. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	41
32. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	41
33. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	41
34. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	41
35. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMİKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN.....	41

36. ÁBRA: BOHN-FÖDÉM NEDVESSÉGÁRAM ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	41
37. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	42
38. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓ ESETÉN	42
39. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM HŐMÉRSÉKLET ELOSZLÁS ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	42
40. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM RELATÍV NEDVESSÉGTARTALOM ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN .	42
41. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM HŐÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	42
42. ÁBRA: E-GERENDÁS FÖDÉM NEDVESSÉGÁRAM SŰRŰSÉG ÁBRÁJA HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓ ESETÉN	42
43. ÁBRA: HŐTECHNIKAI ÉS HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓK Ψ_{2DPARH} HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	43
44. ÁBRA: HŐTECHNIKAI ÉS HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓK Ψ_{2DMER} HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	43
45. ÁBRA: HŐTECHNIKAI ÉS HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓK L3D 3D-S CSOMÓPONTI HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	44
46. ÁBRA: HŐTECHNIKAI ÉS HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓK X TÖBBLET HŐVESZTESÉGEINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	45
47. ÁBRA: HŐTECHNIKAI ÉS HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓK F_{RSI} SAJÁT LÉPTÉKBEN MÉRT HŐMÉRSÉKLETEINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA	46

2. Táblázatjegyzék

1. TÁBLÁZAT: SZIMULÁCIÓHOZ SZÜKSÉGES ANYAGTULAJDONSÁGOK	28
2. TÁBLÁZAT: HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓKBÓL KAPOTT ADATOK	36
3. TÁBLÁZAT: HŐTECHNIKAI SZIMULÁCIÓKBÓL SZÁMOLT EREDMÉNYEK	36
4. TÁBLÁZAT: HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓKBÓL KAPOTT ADATOK.....	37
5. TÁBLÁZAT: HIGROTERMIKUS SZIMULÁCIÓKBÓL SZÁMOLT EREDMÉNYEK.....	37

3. Absztrakt

3.1. Absztrakt

Magyarország meglévő épületállományának számottevő részét a 19. és 20. században elterjedt hagyományos technológiákkal készült épületek alkotják. Az 1800-as évek elején a fafödémek és boltozatok voltak a fő vízszintes teherhordó szerkezetek, a század második felében megjelentek a hajlított acélgerendákból készült különböző födémek. Az 1910-es évekre pedig kifejlődött a mai gyakorlatban vasbetonnak nevezett anyag, így a következő évtizedekben a világháborúk hatására elindulnak a próbálkozások az előregyártás felé és kialakulnak az előfeszített, valamint zsaluzóelemes födém rendszerek. Ezek az olykor több, mint 100 éves födémek azonban egyre kevésbé képesek kielégíteni napjainkban a folyamatosan változó igényeket, előírásokat. Az építések során a minőségi építőanyagok hiánya miatt bevett szokás volt, hogy nem a megadott anyagokból, nem a kiírt rétegrend alapján készültek el a szerkezetek, így jellemzően már egy egyszerűnek vélt felújítási munkálat során is problémás lehet ezen szerkezetek rekonstrukciója.

A jelenleg érvényben lévő 7/2006-os TNM rendelet értelmében a felújítandó épületszerkezeteknek is meg kell felelniük a hőtechnikai követelményeknek, azonban a jellemzően ismeretlen rétegrendi felépítés miatt ezen hagyományos épületszerkezetek energetikai ellenőrzése sokszor nehézségekbe ütközik. A rekonstrukciós munkálatokra sok esetben funkcióváltás miatt kerül sor, amely hatására különböző külső és belső nedvességhatások érhetik a szerkezetet. Nagyvárosi bérházakra jellemző tetőtérbeépítések esetében a korábban zárófödémként funkcionáló szerkezet közbenső födém szerepét veszi át, így megváltoznak a szerkezetet érő hatások. Az épület használata során keletkező, a páravándorlás során kicsapódott nedvesség és a kezdeti építési nedvesség is jelentős nedvességtechnikai teher az épületszerkezetekre nézve. Dolgozatomban a hazai gyakorlatban leginkább elterjedt hagyományos födém típusok (Monier-födém, Horcsik-födém, poroszsüveg födém, Bohn-födém, E-gerendás födém) higrotermikus szimulációját végeztem el, melyek segítségével megvizsgáltam a födémek hő- és nedvességtechnikai tulajdonságait. A vizsgálatokhoz először elkészítettem a választott födém típusok 3D-s fal-födém csatlakozások csomópontjainak geometriai modelljét, majd pedig Comsol Multiphysics véges elemes numerikus multifizikai szoftver segítségével lefuttattam a szimulációkat.

A kutatás keretében vizsgált, hagyományos födémszerkezetekre kapott hő-és nedvességtechnikai jellemzők hasznosíthatóak az épületenergetikai számítások során, valamint hozzájárulnak a hagyományos födémszerkezetek megfelelő rekonstrukciós munkálatainak elvégzéséhez.

3.2. Summary

A significant part of Hungary's existing building stock is made up of buildings built in the 19th and 20th centuries using traditional technologies. At the beginning of the 1800s, wooden slabs and domes were the main horizontal load-bearing structures, in the second half of the century various slabs made of bent steel beams appeared. By the 1910s, the material known in today's practice as reinforced concrete had developed, so in the following decades, as a result of the World Wars, attempts were made towards pre-fabrication that led to the development of prestressed and formwork slab systems. However, these sometimes more than 100-year-old slabs are rarely able to satisfy today's constantly changing needs and specifications. Due to the lack of quality building materials during the constructions, it was a common practice that the structures were not made of the specified materials, not based on the published layer order, so the reconstruction of these structures can typically be problematic even during an apparently simple renovation work.

According to the Hungarian 7/2006 TNM regulations the building structures to be renovated must also comply with the thermal requirements, however, due to the typically unknown layered structure, the verification of energetic conformity of these traditional building structures often encounters difficulties. In the case of attic installations typical of apartment buildings in big cities, the structure that previously functioned as a closing slab takes over the role of an intermediate slab, so the effects on the structure change. Moisture generated during the use of the building, condensation and the initial construction moisture also have significant effect on building structures. In many cases, the reconstruction works are carried out due to a change of function, which can cause various external and internal moisture effects to affect the structure. In my thesis, I performed a hygrothermal simulation of the most common traditional slab types in domestic practice (Monier slab, Horcsik (Kleine) slab, Prussian slab, Bohn slab, E-beam slab). With the help of the results of the numerical simulations I examined the heat and moisture transport properties of the slabs. Firstly I created the geometric model of the 3D wall-slab

connections of the selected slab types in advance, and then I ran the simulations using Comsol Multiphysics finite element numerical multiphysics software.

The material datas related to heat and moisture transport obtained for traditional slab structures examined in the framework of this research can be used during building thermal calculations and contribute to the completion of appropriate reconstruction works of traditional slab structures.

4. Bevezetés

A 19. század végére Budapest világvárossá nőtte ki magát, amely hatására drasztikusan megnövekedett az ország lakásállománya, az épületek szorosan egymás mellé épültek, valamint megjelentek a többszintes lakóházak is. Magyarországon az építőipar államosítása előtt a hazai kivitelező cégek és tervezők számos különféle fűdém szerkezetet alakítottak ki, sok esetben külföldi példák



1. ábra: Budapesti nagypolgári lakóházak
(fotó: Major Kata - We Love Budapest)

alapján. Az 1867-es külföldi szabadalmaztatás után egyre jobban elterjedt a vasbeton, mint építőanyag használata, ezzel együtt lassan kikezdte a fafűdémek addigi hozzávetőleges egyeduralmát. 1909-ben megjelent az első magyarországi vasbeton szabvány, amelytől kezdve a kísérletezéseket felválthatta a szabályozott alkalmazás. Az I. világháborúig még zárófűdémként alkalmaztak sűrűgerendás fafűdémeket annak tömörsége és tűzgátló képessége miatt, de az 1920. évi békediktátum eredményeképp az ország fakitermelő erdői elcsatolásra kerültek, emiatt a fafűdémek építése egyre jelentéktelenebbé vált.

A klímaváltozás és a drasztikusan csökkenő energiahordozó készletek miatt egyre több szakértő kezdett el foglalkozni a szerkezetek, épületek hőtechnikai tulajdonságaival, hogy az épületeinknek jobb legyen a hőátbocsátási tényezőjének értéke, mely hatására kisebb lesz a hőveszteség, mely magában hordozza a csökkenő fenntartási költségeket is. Az elmúlt években sok változás történt az épületenergetika területén, részben a műszaki fejlődés, részben az irányelvek és rendeletek változása miatt. A szigorodó előírások eredményeképp egyre több esetben válik szükségessé a meglévő fűdém szerkezetek megerősítése, felújítása, javítása. A jelenlegi szabványok és jogszabályok előírják, hogy a korábbi időszakokban épített épületeknek is meg kell felelni a mai modern követelmények előírásainak. Azonban a hőátbocsátási tényezőtől túl jelenleg nincs sem a vonalmenti hőátbocsátási tényezőkre vonatkozóan, sem pedig a nedvességtranszportra vonatkozóan előírt nedvességtechnikai követelmény. Az épületeink hőveszteségeinek számítása során a hőátbocsátási tényezők mellett a vonalmenti hőátbocsátási tényezők segítségével leírt hőhidak hatását is figyelembe kell vennünk azokon a helyeken, ahol többdimenziós hőáramlás, hőáramsűrűségváltozás alakul ki az épületszerkezetekben a

környező szerkezetekhez viszonyítva. Ugyanezen elv szerint azokban az esetben, ahol a nedvességáram sűrűségének (fluxusának) nagysága változik a környezetéhez képest, nedvességhidaknak nevezhetjük. Az építményeken belüli páratartalom és hőmérséklet eloszlásának numerikus szimulációjával könnyedén előre jelezhetjük az adott épületelem életciklusa alatti viselkedését, amely megkönnyítheti többek között az építészeti kulturális örökség fenntartását is. A magyar és külföldi szakirodalomban azonban kis mennyiségű, hiányos és leegyszerűsített forrás áll rendelkezésünkre a régi hagyományos födémek hőtechnikai tulajdonságaival kapcsolatban, illetve sokszor maga az ismeretlen rétegrendi kialakítás is hátráltatja az ellenőrzési lehetőségeket.

A numerikus szimulációs technológiák az építőipari digitalizáció előretörésével nagy fejlődésnek indultak az elmúlt években, így szinte már minden modellezhető és vizsgálható számítógépes technológiákkal. Jelenleg több olyan numerikus szoftver is van a piacon, amelyekkel hatékonyan vizsgálható az épületszerkezetek higrotermikus viselkedése, azonban ez elemzések pontossága nagy mértékben függ a felhasznált matematikai modellek hatékonyságától és a bemenő adatok pontosságától. A dolgozatomban Comsol Multiphysics szoftver segítségével készítettem részletes, végeselemmódszeren alapuló hőtechnikai, valamint kapcsolt hő-és nedvességtranszport (HAM) szimulációkat a Magyarországon leginkább elterjedt hagyományos födém szerkezetek teljesítményének értékelésének céljából.

5. Szakirodalmi áttekintés, alapismeretek

5.1. Vizsgált hagyományos födém szerkezetek bemutatása

A födémek a helyiségek lefedésére, vízszintes térelhatárolásra szolgáló szerkezetek. A födémeknek a térelhatároláson és a rájuk lévő terhek viselésén kívül fontos szerepe még az épületek vízszintes irányú kimerevítése is. Födémek nélkül az épületek vékony falai nem tudnának a szélnyomásnak ellenállni. Lényeges azonkívül az is, hogy a födémek behorgonyzó hatása megakadályozza a több emelet magas falak kihajlását; a födémek révén az ilyen falak kihajlási hossza egy emelet magasságnyra csökken. A különböző anyagú és fajtájú síkfödémeket a rájuk ható terhelések hajlításra veszik igénybe. A födémek falakra vagy kiváltógerendákra támaszkodnak.

A történelmi időkben a födém céljára csak a faanyagú és boltozott szerkezetek álltak rendelkezésre, az emeletek közti födémeket kis magasságú boltozatokkal építették meg. Ezek nagy falvastagságot igényeltek, így nem voltak gazdaságosak. A vasnak és vasbetonnak az épületszerkezetek terén való felhasználása lehetővé tette az alul síkfelületű födémek alkalmazását nagyobb támaszközök esetén is. Ezek előnyös kis szerkezeti magasságuk és kedvezőbb teherátadásuk miatt általánosan használhatóbbá váltak és jóformán teljesen kiszorították a boltozott és faanyagú födémeket.

A födémektől megkívánt követelmények a következők [1]:

- kellő szilárdság/teherbírás
- kellő rugalmasság
- kis szerkezeti magasság
- kis önsúly
- alul-felül sík elhatárolás
- nedvességátvitellel szemben való viselkedés
- jó hőszigetelő képesség
- jó hanggátló/hangszigetelő képesség
- egyszerű és gyors előállíthatóság
- tűzbiztonság
- vezetékek könnyű elhelyezhetősége

- esztétikai szempont
- gazdaságosság

A födémek részei a következők:

1. teherhordó rész (nyers födém)
2. feltöltés:

Hőszigetelő, hanggátló, szintkiegyenlítő szerep, amelynek anyaga fapadlóknál homok, hidegpadlóknál pedig salak. Utóbbi könnyűségénél fogva terhelési, laza halmaz és lyukacsossága következtében hőszigetelési és hanggátlási, olcsósága miatt pedig gazdaságossági szempontból jól megfelelő feltöltési anyag. Az olyan födémeknél, ahol nagy feltöltési vastagság adódik, a súly kisebbítése végett még fapadló esetén is salakfeltöltést alkalmaznak és csak a falfelületekkel közvetlenül érintkező részekben készül egy kb. 3-5 cm vastag homok réteg.

3. padlószerkezet:

A padlók súlyviszonyait a lakóházak födémének méretezésekor figyelembe kell venni. Olyan középületeknél azonban, ahol fennáll a későbbi átalakítás lehetősége, a födémeket nehezebb hidegpadló feltételezésével kell megtervezni.

A födémek osztályozása:

- anyaguk szerint:
 - fafödémek
 - szilárd/masszív födémek
- szerkezeti jellegük szerint:
 - gerendafödémek: szorosan egymás mellé elhelyezett, előre elkészített gerendákból állnak
 - gerendás, illetve bordás födémek: egymástól távol álló gerendákból és gerendaközoket áthidaló valamilyen szerkezetből állnak
 - lemezszerű födémek
 - nagyméretű elemekből (födémpanelek) álló födémek

A dolgozatban a továbbiakban a Magyarországon leginkább elterjedt födémek közül a Horcsik-, a Bohn-, a Monier-, az E-gerendás, valamint a poroszsüveg födémekkel foglalkozom, amelyek

a szilárd anyagú (masszív) födémek közé sorolhatók. Ezen födémek csoportosítása a következő:

- acélgerendás födémek:
 - acélgerendák közti téglaboltozat: **poroszsüveg födém**
 - acélgerendák közti csömöszölt betonboltozat
 - acélgerendák közti vasbeton lemezfödémek:
 - felül-/alulbordás födém: **Monier-födém**
 - acélgerendák közti vasbetétes téglalemez födém: **Horcsik födém**
 - acélgerendák közti pallókból, lapokból és egyéb thb építőlemezekből épített födémek
- vasbeton gerendás födémek
 - egy. vasbeton gerendák: **ÉTI/Weiler gerendák + vasbetétes téglalemez/téglatálcás födém vagy E jelű béléstestek**
- monolit jellegű vasbeton födémek
 - vasbeton lemezfödém
 - alul-/felülbordás lemezfödém
 - kazettás vasbeton födém
 - monolitos gerendák közti vasbetétes téglalemez födém
 - gombafödém
 - sűrűbordás vasbeton födém
 - idomtestes/vastégla födém: **Bohn-födém**
 - födémpanelök

Fontos megemlíteni, hogy nagyban elterjedt födém típus a Mátrai-födém is, azonban a bonyolult vasalása és geometriai kialakítása miatt jelen dolgozat kereteibe nem fért bele ennek a födém típusnak a vizsgálata.

5.1.1. Poroszsüveg födém

A poroszsüveg födém az acélgerendás födémek típusába tartozik, amely födémek vegyes anyagúak, mégpedig bizonyos távolságban elhelyezett acélgerendákból és a közöket áthidaló valamilyen szerkezetből állnak. Előnyük gyors építhetőségük, aránylagos könnyűségük, az építés időtartamára nem kell alátámasztani őket, esetleg a gerendaközöket áthidaló szerkezeteket a gerendák elhelyezése után is



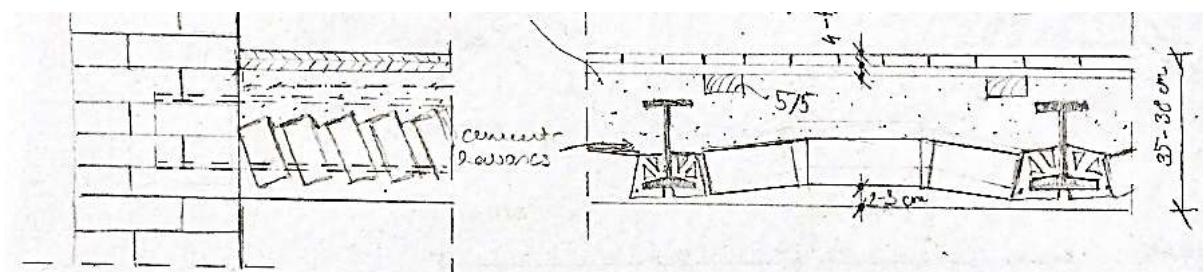
2. ábra: Megépült poroszsüveg födém (fotó: Kvarc Építész Stúdió)

meg lehet építeni. A 19. század második felében már látták, hogy a speciális elemek gyártása nem kifizetődő, tömegigényt csak olcsó falazótégelákkal elégíthetnek ki, így terjedt el a 19. század hatvanas éveitől a poroszsüveg boltozat. E szerkezet lett Közép-Európában 1870-1935 között a legáltalánosabban használt nehéz, tűzálló és-gátló, teherbíró födém. Hazánkban e szerkezet az 1870-1920-as évek között a városi bérházépítés típusszerkezete volt. A 20. század első évtizedétől kezdve azonban fokozatosan szorult háttérbe a gerendás-betételemes szerkezetek mögött, de a második világháború nehéz légoltalmifödém-igénye ismét életre keltette, majd építése a 1950-es években szűnt meg.

A legtöbbet közepes lakóházi terek felett építették 4,0-6,5 méteres fesztávon. Különbséget szokás tenni a vasgerendás beton vagy vasalt beton födém és a vasgerendás téglaboltozatos födém között, pedig a téglaboltozatos szerkezet is tipikusan hátöntéssel készült. A hátöntés a merevséget fokozta, a téglákat kötötte össze és síkfelületet képezett a további építéshez, a nagyobb terhelés elviselésére szánt szerkezeteket gyakran vasalt hátbetonozással készítették. A födémeket homok vagy salak feltöltéssel építették, annak ellenére, hogy tudták a salak korrodálja az I gerenda kiálló fejét. Viszonylag hamar rájöttek arra is, hogy a vakpadló párnafáit célszerű a vas fejlemezére fektetni, így elkerülhető volt, hogy a vakpadló leszálljon a

fejlemezre, ezzel azonban a feltöltés célja értelmét veszítette. A földem szélső gerendáit falkötővasakkal a falba horgonyozták, földemnyílások mellett a szélső gerendákat szintén hasonló módon horgonyozták ki. A téglaboltozat egyszerűen felülhetett az I gerendára, ahol a szélső elemeket orrtéglaként alakították ki, a színvonalasabb szerkezeteket orrtéglával vagy boltozatindító betontalppal látták el, utóbbi azonban vakolt mennyezeten szürke elszíneződéseket okozott. Több különböző kialakítási módja létezett; építettek egyenes övű poroszsüveg boltozatot, amely azonban a jelentős feszítési igény és bonyolult ékelése miatt nem vált be. Ritkább szerkezetek közé tartozott az emelt poroszsüveg boltozat, amely a gerendázatra helyezett magasítópofákon fekvő, emelt boltmezőkkel készült.

A szerkezet teherbírását maga a gerendázat határozta meg, a közönséges vastartós téglaboltozat általában kisebb gerendákkal és 3,0-6,5 m közötti fesztávokkal épült, a masszív és üreges szerkezetek fesztávolságai 3,0-8,5 m között voltak. A nagyobb fesztávolságok áthidalására segéd tartókat alkalmaztak: monolit vasbeton vagy bádogtartós mestergerendákat építettek be. A vas földemgerendákat a falban kötővassal tolóvasakhoz horgonyozták vagy a falban fekvő falkötővashoz erősítették. Nagyobb szerkezetekben a vasakat átfűzték a falközépig benyúló gerendákon, vastag falban a gerendák néha rájuk szegecselt toldalékokkal csatlakoztak a kötővasakhoz vagy minden 3.-6. nyúlt be a falba a kötővasakig. A 19. század vége felé kialakult, hogy nagy falnyílások esetében a földem vasgerendáit a falban vasgerenda fogta össze. Nagy terhelésű, nagyméretű gerendákat néha rájuk szegecselt pótövekkel látták el, az egymás mellett fekvő tartókat rájuk szegecselt összefogó lemezekkel/pántokkal rögzítettek egymáshoz, általában 1,0 m körüli kiosztással. A hengerelt gerendák a 19.század végéig inkább öntöttvas oszlopokra, később már hengerelt vasszerkezetekre ültek rá. [2]



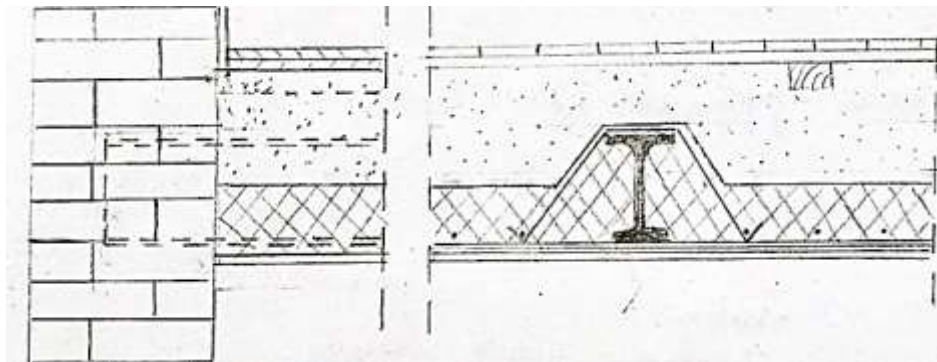
3. ábra: Poroszsüveg földem vázlatos ábrája (saját ábra)

A 20.század elejére kialakult a szerkezet hazai építési gyakorlata, melynek műszaki feltételeit a Magyar Mérnök- és Építész Egylet ajánlása tartalmazza:

- a födémvastagság nem lehet 30 cm-nél kevesebb, de legalább 11 cm-rel magasabb legyen a legnagyobb vasgerenda magasságánál
- a vasgerendákat ólom-míniummal vagy más rozsdavédő mázzal kell ellátni, betonba burkolt gerendákat rozsdavédő mázzal nem szabad bevonni
- a vasgerendák távolsága 140 cm-nél nagyobb ne legyen
- a boltozat ívmagassága rétegenként váltakozva legalább 2,5-3 cm
- a záradék felett legalább 8 cm feltöltés szükséges
- a födém 1:4 keverési arányú portland-cementtel javított fehérmészhabarccsal készüljön
- téglaboltozatból készült szélső mező vasgerendáit 150 cm távolságban 15 mm-es vagy 120 cm-es távolságban 12 mm-es vonórudakkal kell összekötni a határfalon készített koszorúgerendával, vagy határfal mellé helyezett vasgerendával
- vasbeton lemez szélső lemez esetében a lemez legalább 6 cm vastag legyen és a mellé helyezett vasgerenda felső övét teljesen körül fogva, a túlsó oldal orrtéglájához csatlakozzon

5.1.2. Monier-födém

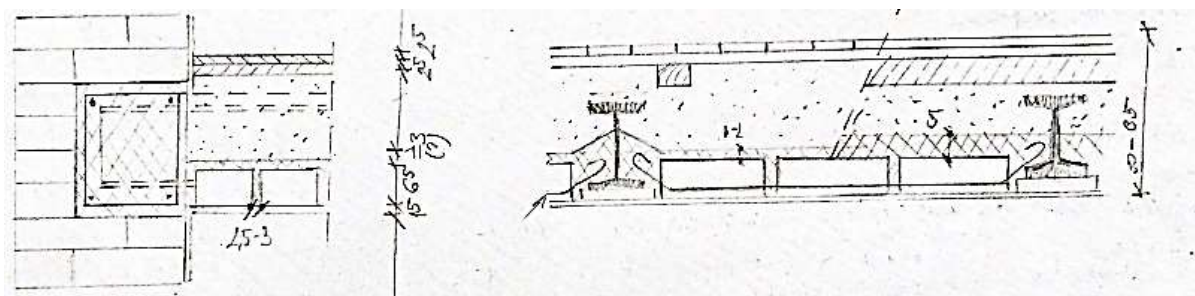
A 19.-20. század fordulója előtt Magyarországon is kezdtek elterjedni a betonból és vasbetonból épülő szerkezetek, így egyre több födém is ezen anyagok felhasználásával készült. 1890 körül a felülbordás, alul sík szerkezetű vasalt beton Monier-födém terjedt el leginkább hazánkban. A födém kialakítása során az acélgerendát bebetonozták, amely korrózióvédelmet biztosított az acélgerendák számára, valamint megakadályozta a keresztmetszetek kibicsaklását is, ezáltal növelve a teherbíró képességet is. Eredetileg a vasalást igyekeztek átfűzni a gerendán, valamint alul átfűzött pótvasalást alkalmaztak a gerenda környéki repedések elkerülése érdekében. A későbbi számítások során a takarékoság érdekében a vasbeton lemez szélességébe beleszámították a pótvasalás felhajlítások közeit is, így a lemezvastagság a legtöbb esetben a minimálisan megengedett 8 cm-re adódott. [3]



4. ábra: Monier-födém vázlatos ábrája (saját ábra)

5.1.3. Horcsik- (Kleine-) födém

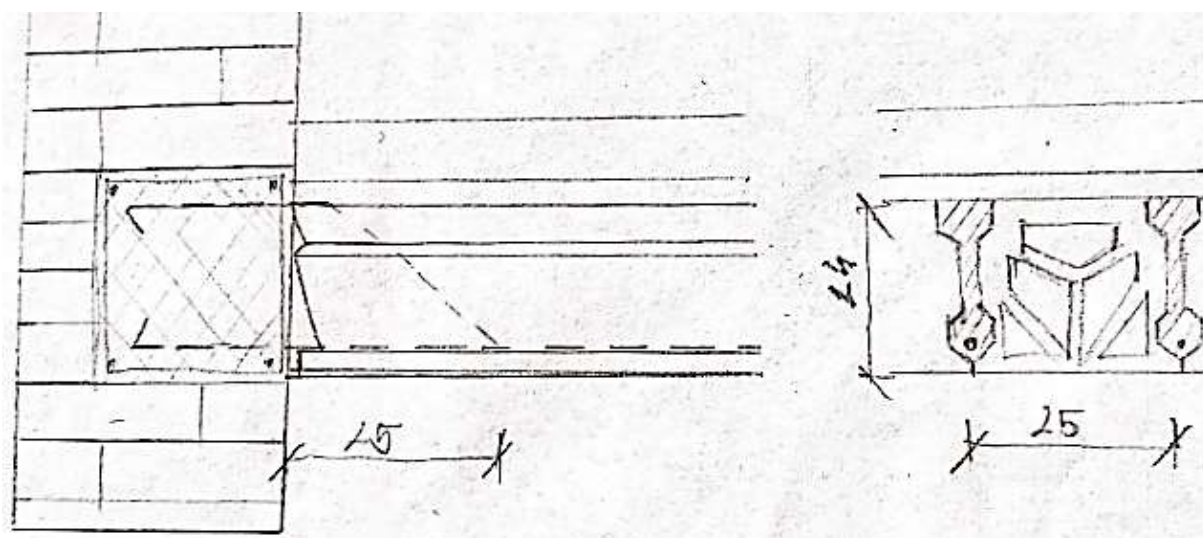
A gazdasági válság okán az építőipar is utolérte a spórolás, így terjedt el a téglabetétes vasbeton lemezes Horcsik-födém, amelynek szabadalmát 1934-ben nyújtották be. Külföldön ez a típusú födém a Kleine-födém nevet viselte, tulajdonképpen a Horcsik-födém lemeze ennek a födémnek az utánpótlása volt. A födém jóval olcsóbb volt a tömörlemez megoldásoknál, hiszen kevés betont igényelt és a téglabetéteket bontott téglából is készíthették, népszerűsége egészen a második világháború utánig kitartott, egészen addig, amíg az előregyártott betételes födémek kerültek előtérbe. A födém kialakítása felülbordás volt, így könnyen megoldhatóvá tette a vezetékezést, a gerendák távolsága 1,3-1,6 m, a téglabetétek közötti 2,5 cm-es merőleges hézagok portlandcementből készült kibetonozásába vasbetéteket fektettek, a párhuzamos hézagoknak 2 cm szélesnek kellett lenniük. A téglák fölé rábetonozás került, amelyet csak abban az esetben számoltak hozzá a minimum 7 cm-es födémlemez magasságához, ha a vastagsága 3-5 cm között volt. Ezt a típusú födémeket koszorúval készítették, amely kialakítása során a lemezvastagságnak és szélességnek megfelelő sávot homokkal töltötték ki, majd a födém készítése során behelyezték a szükséges vasalást és kibetonozták. [3]



5. ábra: Horcsik-födém vázlatos ábrája (saját ábra)

5.1.4. Bohn-födém

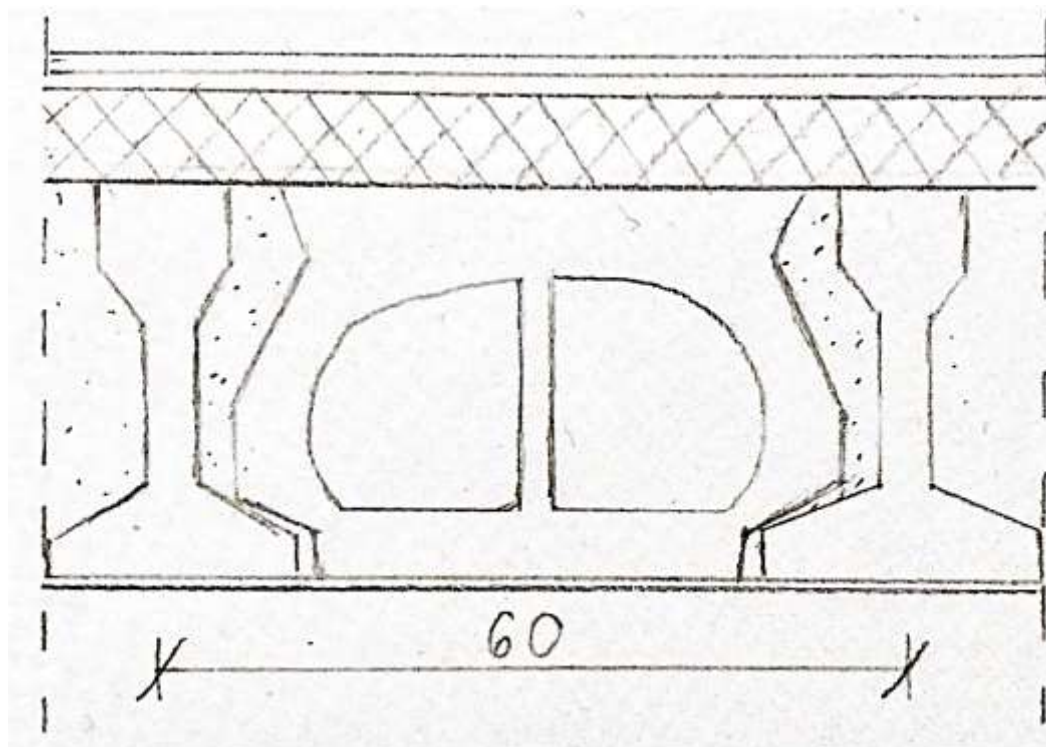
Az üreges téglák elterjedésével a kerámiákat, illetve idomtégglákat a vasbeton szerkezetek kialakításához is felhasználták. Mésztartalmú anyagból csak vastagabb falvastagságú béléstesteket lehetett gyártani, ezt a hátrányt igyekeztek előnnyé változtatni a vastégla födémek. Ezt oly módon tették, hogy a béléstesteket is bevonták a födém erőjátékába és a béléstest felső részét a nyomófeszültség felvételére alkalmasan alakították ki. Hazánkban a leginkább elterjedt vasbetetes téglafödém a Bohn-födém volt, amelyet 1934-től kezdve gyártottak a békéscsabai, valamint az óbudai téglagyárban, egészen az 1980-as évekig. A födém szerkezet téglamagassága 24 cm, bordatávolsága 25 cm, téglahossza 30 cm volt. A kitörhető oldallapjaival negatív nyomatékot tudott felvenni, kitörhető felső lapjai pedig megkönnyítették a süllyesztett elemek, vezetékek befogadását, valamint csökkentette a feltöltés mértékét. Teherbírása a vasalás kialakításától függött, megfelelő kialakítással alkalmas volt az egyre növekvő födémterhek elviselésére is. Egyik nagy előnye közé tartozott, hogy szabálytalan alakú formák lefedésére is alkalmasnak bizonyult külön alátámasztó vagy kiegészítő szerkezetek használata nélkül is. Az 1960-as évektől kezdve feltöltés nélkül, könnyű felbetonozással és minimális hangcsillapító réteggel készült. [2]



6. ábra: Bohn-födém vázlatos ábrája (saját ábra)

5.1.5. E-gerendás födém

1952-ben kezdtek el előregyártott födémgerendákat gyártani, amelyet az akkori Építéstudományi Intézet (ÉTI) fejlesztett ki. A gyártást kétféle keresztmetszettel indították; a kisebb falközök áthidalására alkalmas F és a nagyobbra G jelűeket. Kezdetben a gerendák közeit féltégla vastag boltozattal vagy téglabetétes vasbeton lemezzel töltötték ki, később megszülettek a BH tálcák és a B100, valamint B60-as béléstestek. Az előregyártott födémek hagyományos rétegrendje a következő volt: szerkezet-feltöltés-burkolat. Amíg a födémfeltöltés anyaga salak volt, addig nem volt igény arra, hogy a födém felül is sík legyen, azonban a kopogó hangokat elnyelő úsztatóréteg elterjedésével már fellépett a felső sík felület igénye is. Ennek hatására kialakult az új igényeknek megfelelő és gazdaságosabb előregyártott gerenda típusa; az E-gerenda. Ezek a gerendák feszítettek kialakításúak, 19 cm magasságúak és 2,40-6,60 m méretű falközök mérethatárai között 60 cm-es lépcsőkben gyártják. Hozzá gyártották az alacsonyabb EB-jelű – EB60/19, EB30/19, EB60/24 – béléstesteket. 1968-1990 között Magyarországon hatalmas népszerűségnek örvendett ez a födém típus, hiszen a legtöbb családi lakóház B30-as falazótéglából, monolit vasbeton koszorúval, E-gerendás födémmel és hagyományos ácsszerkezettel készült. [2]



7. ábra: E-gerendás födém vázlatos ábrája (saját ábra)

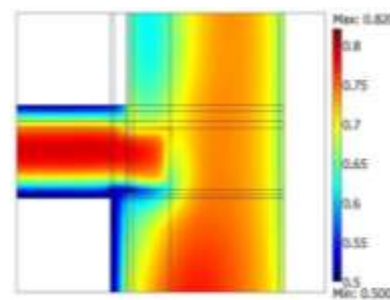
5.2. Kapcsolt hő- és nedvességtranszport modellezés

A 19. század elejére a termodinamika és a hővezetés témaköre került az épületfizika középpontjába. A kapcsolt hő- és nedvességtranszport modellezésével az 1930-as években kezdtek foglalkozni, ekkor jelentek meg az első módszerek, amelyek a páradiffúziót a hőtranszporthoz kapcsolták állandósult állapotban. 1937-ben Teesdale [4] kiadott egy tanulmányt a falakban és padlásokon kialakuló kondenzációról, majd 1958-ban Glaser [5] a publikációjában egy számítási módszertant dolgozott ki falak higrotermikus teljesítményének kiszámítására a kritikus felületi hőmérséklet, páratartalom és páralecsapódás elkerülése érdekében. Azonban ez a számítási módszer eredetileg hűtőházak könnyűszerkezetes falainak a vizsgálatára vonatkozott, és ezért a „normál” térelhatároló szerkezetek közül leginkább a könnyűszerkezetes rétegrendek vizsgálatára alkalmas, melyeknél kicsi a nedvességkapacitás, nem számottevő a kiindulási építési nedvesség és nincs vízfelvétel csapóesőből. Philip és De Vries [6] 1957-ben mutatta be a talajok konjugált hő- és nedvességtranszportjáról szóló munkáját, majd egy évvel később publikálta az általánosított egyenleteket is. Az ötvenes évek végén és a hatvanas évek már léteztek olyan számítógépes szoftverek, amelyek segítségével a modellekben figyelembe lehetett venni a gőzdiffúziót, a kapilláris vízzállítást, a kezdeti nedvességet, a párolgási hőt és a tranziens körülményeket. A probléma ezekkel a modellekkel azonban az volt, hogy feltételezték, hogy a nedvességtranszport felosztható gőz- és folyadékáramra, azonban porózus anyagokban ezek külön nem mérhetők. Később a számítógépes technológiák fejlődése lehetővé tette a két- és háromdimenziós geometriák modellezését is, majd a 2000-es évektől kezdődően már a teljes épületszint modellezésére helyeződhetett a hangsúly. Az elmúlt évtizedekben számos kutatás született a témában, amelyek főleg Rode [7], Künzl [8], Grunewald [9], Hagentoft [10], de Wit [11], Van Schijndel [12], Hens [13] és Dr. Nagy Balázs [14] neveihez fűződnek.

Épületfizika és épületenergetika területén az épületek és épületrészek hőtechnikai modellezése már rég óta széles körben használatos. Azonban a hőhidakért legnagyobb részben felelős épületszerkezeti csatlakozások higrotermikus elemzésével már jóval kevesebb publikáció foglalkozik [14]. Azt is meg kell említeni, hogy ugyan jelen kutatásban higrotermikus vizsgálatok alatt csak kapcsolt hő- és nedvességtranszporttal foglalkoztunk, azonban kutatásokban számos esetben a „HAM” rövidítés alatt levegőtranszportot is értenek. Mivel ezekben az esetekben különböző légzárósági modelleket használnak [15], így főleg

hőszigeteléssel ellátott vagy könnyű szerkezeteknél a légáteresztő képesség hőhidakra gyakorolt hatása jelentős lehet, ellenben légzáró falazott szerkezetek esetében a légáteresztésnek nincs jelentős hatása a hőátbocsátási tényezőre [16]. Az elmúlt évek kutatásai alapján akár azt is mondhatnánk, hogy az épületelemek és a sík épületszerkezetek [17], mint tömör falazott falak [18], előregyártott panelek [19], szigetelt falazott vagy beton [20], könnyűbeton falak [21], könnyű favázas falak [22] vagy különböző burkolati szerkezetek [23] higrotermikus szimulációi egyre nagyobb körben elterjedtek, azonban épületszerkezetek csatlakozásai és a hőhidak modellezése még gyerekcipőben jár. A többdimenziós szimulációk készítésének a lehetősége a Fraunhofer Intézet által fejlesztett WUFI 2D bemutatásával kezdődött a 2000-es években. 2011-ben bemutatták validált, egész épületre kiterjedő szimulációs szoftverüket, majd 2013-ban pedig ennek összekapcsolási lehetőségeit a többdimenziós hőhídszimulációval.

A hagyományos épületszerkezetek rekonstrukciója során kitüntetett szerepet kap a felhasznált anyagok higrotermikus viselkedésének megfelelő ismerete, amelyhez az elmúlt években egyre több alkalommal használtak numerikus szimulációkat.[24]–[26] A modellezésbe bevont állapotfüggvények azonban jellemzően nem szabványosítottak és túlzottan parametrizáltak, emiatt voltak,



8. ábra fa földem-fal csatlakozás
esetében [29]

akik próbálkoztak kompaktabb, kevesebb paraméterszámmal rendelkező függvények kidolgozásával.[26] Találhatunk még néhány kutatást, amelyekben Comsol Multiphysics-et használtak többdimenziós numerikus szimulációk készítéséhez [12][27], illetve néhányan foglalkoztak fal-földem csatlakozások (8. ábra) [28], [29] és nyílászáró beépítések [30] két- és háromdimenziós szimulációjával, hogy megvizsgálják a különböző anyagtulajdonságok hatását, azonban jóformán több szakirodalom nem köthető ehhez a témához. Ez többek között azért is problémás, mert épületszerkezetek higrotermikus viselkedése jóval kedvezőtlenebb lehet, amennyiben a számítások során a kapcsolt hő-és nedvességtranszportot is figyelembe vesszük a hőtechnikai számítások mellett. Dr. Nagy Balázs ásványgyapottal hőszigetelt kerámia falazóblokkok esetében megvizsgálta [31], hogy milyen eredmények adódnak a hőátbocsátási tényezőre abban az esetben, ha csak hőtechnikai szimulációt végzett el, illetve amikor figyelembe vette a kapcsolt hő-és nedvességtranszportot is a számítások során. Az

eredményei azt mutatták, hogy akár 30%-os eltérés is adódhat a hőátbocsátási tényezők katalógus értékei és a HAM-szimulációk eredményei közt. Ez az eredmény is alátámasztja a hőtechnikai szimulációk mellett a higrotermikus elemzés fontosságát.

5.2.1. Méretezési szabványok

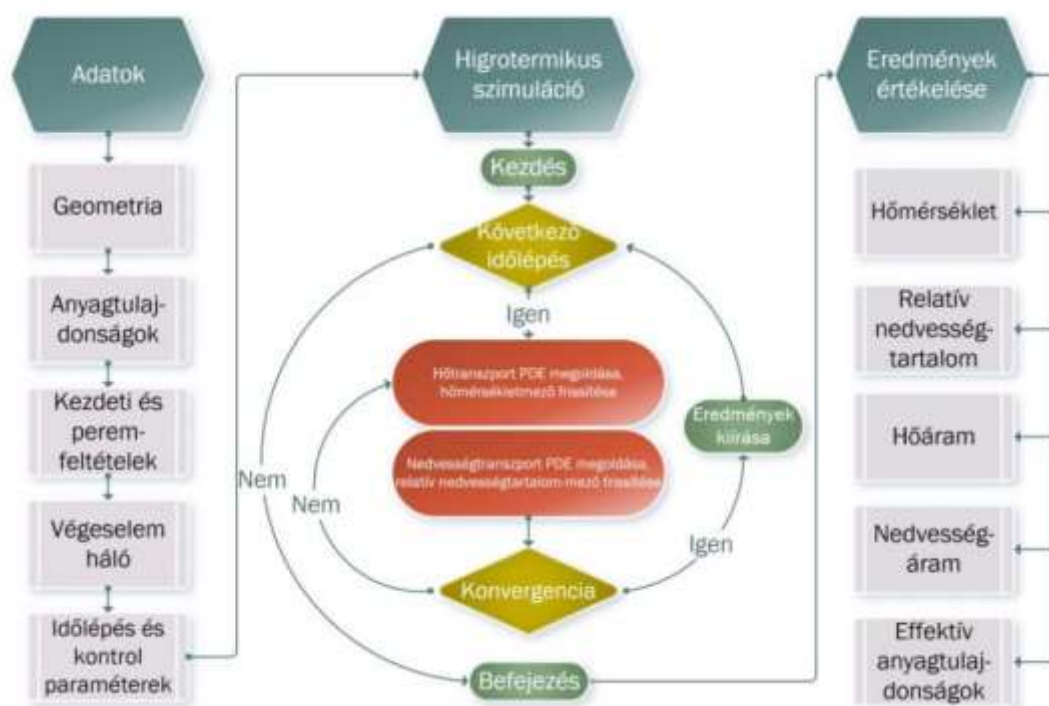
A szerkezeten belüli nedvességviszonyok megfelelőségénél azt kell megvizsgálni, hogy a nedvességforrás és nedvességtranszport folyamatok eredményeképpen nem alakulnak e tönkremenetelhez vezető állapotok a szerkezetek belsejében. A szerkezetek nedvességtechnikai ellenőrzéséről jelenleg az MSZ EN 24140 [32] rendelkezik, amely alapvetően Glaser módszertanát [5] használja, amely egy feltételezett állandósult állapotban a szerkezeten keresztüli páradiffúzió hatására az egyes szerkezeti rétegek eltérő páradiffúziós és hővezetési ellenállása miatt esetlegesen kondenzálódó nedvességtartalom nagyságát, valamint egy feltételezett kiszáradási időszakban a leadható nedvesség nagyságát vizsgálja egy grafikai módszerrel. Azonban a módszertannal számolt eredmények sok esetben félrevezetőek, amely az alábbi főbb hiányosságainak köszönhetőek:

- elhanyagolja a kapilláris nedvességvezetést
- elhanyagolja a nedvességgel szállított hőt, a nedvességfelvétel és az elpárologtatás hatását a szerkezetek energiamérlegére
- elhanyagolja az anyagjellemzők hőmérséklet és nedvességtartalom függését
- elhanyagolja a pontos nedvességkapacitást

Az MSZ EN 24140 [32] szerinti számítás történhet az MSZ EN ISO 13788 [33] vagy az MSZ 24140 [32] szabvány szerint, illetve bizonyos esetekben a Glaser-módszernél pontosabb számítási módszertanok alapján, mint például többdimenziós vízgőzáramok számításánál, valamint ha a szerkezetben a telítési vízgőzpárányomásnál nagyobb vízgőznyomás keletkezik, akkor a számítást az MSZ EN 15026 [34] alapján kell elvégezni. Ez a szabvány a dinamikus kapcsolt hő-és nedvességtranszport modellezésnek elméletét és számításait foglalja össze, amely során a kibővített anyagtulajdonságoknak köszönhetően a Glaser-módszerhez képest sokkal pontosabb eredményeket kaphatunk. A kutatás során az MSZ EN 15026 [34] szabvány szerinti HAM szimulációkat végeztem, amely sokkal pontosabb fizikai modellekre épül.

6. Modellezés és szimuláció

A higrotermikus numerikus modellezéshez COMSOL Multiphysics 5.6 [35] végeselemes szoftvert alkalmaztam. A modellezés során a matematikai egyenletek az energia és nedvesség-megmaradás törvényén alapulnak. A modellezés közben egyszerűsítéseket kellett alkalmazni: a geometria állandó, nincs hőmérséklet vagy nedvességtartalom-változás miatti alakváltozás; nincs változás az anyagtulajdonságokban állagromlás vagy öregedés miatt; a hőmérséklet vagy nedvesség miatt nem zajlanak le kémiai reakciók; a szorpciós látens hő egyenlő a kondenzáció vagy a párolgás látens hőjével; nincs hiszterézis a nedvességtárolási képességben, melynek elhanyagolt a hőmérsékletfüggése; végezetül pedig a páradiffúzió és a folyadéktranszport csak az anyagok relatív nedvességtartalmától függ. A szimulációkban a háromdimenziós geometriai modelleket használtam, az anyagtulajdonságok szabványokon alapulnak. Az anyagtulajdonságok laboratóriumi méréseken és szabványokon alapulnak, a peremfeltételeket a vonatkozó szabványok alapján állítottam be az állandósult állapotbéli szimulációkban. A dolgozatban a higrotermikus szimulációt Dr. Nagy Balázs doktori értekezésében [14] ismertett állandósult állapotra vonatkozó módszertan alapján végeztem, amelynek folyamatábrája a következő 9. ábrán látható:



9. ábra: Higrotermikus szimuláció vázlatos folyamatábrája [14]

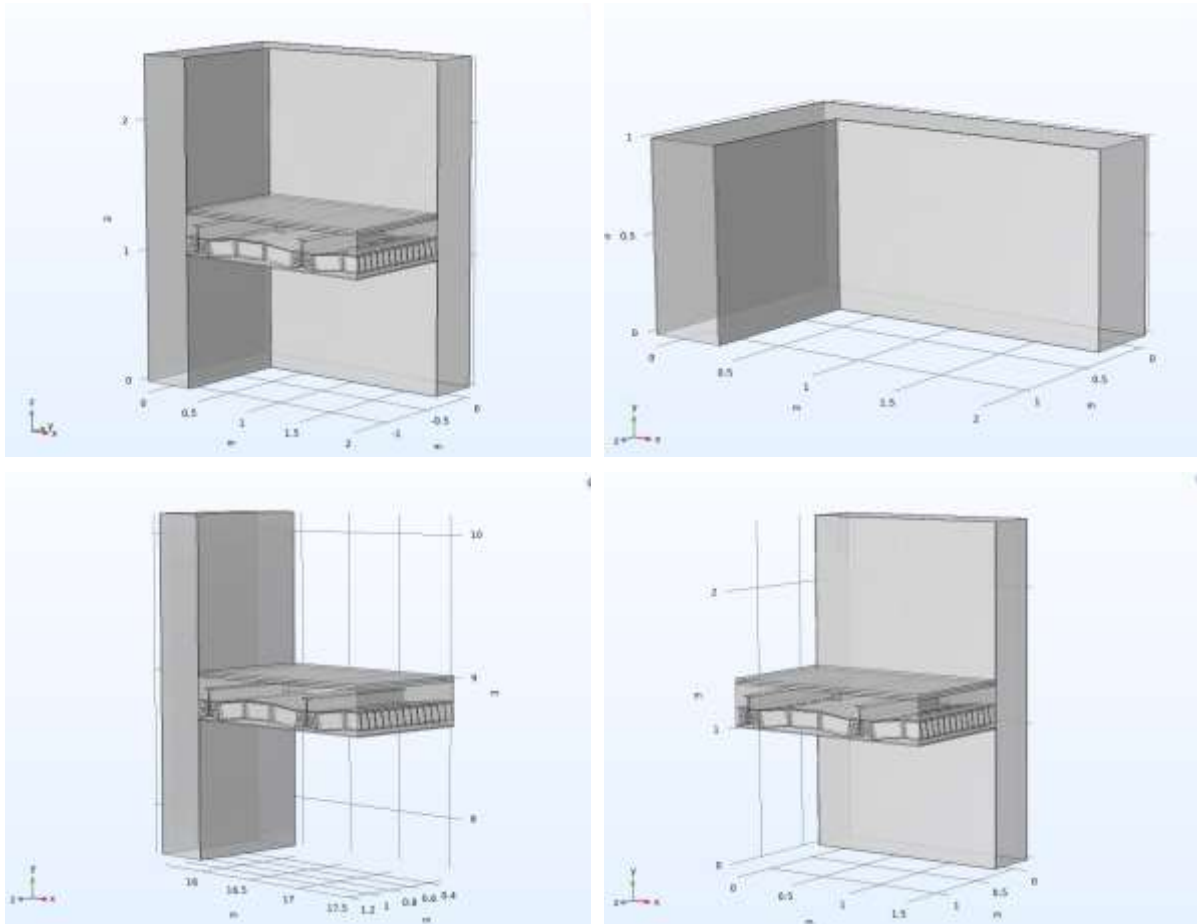
6.1. Födémek modellezése

A numerikus szimuláció megkezdéséhez első lépésben fel kellett építeni a geometriai modelleket. Ugyan erre Comsol Multiphysics-ben is van lehetőség, de nehezen kezelhető felület. A födémek modelljeit ezért AutoCAD 2023-ban készítettem, a geometriát szilárdtestként vettem fel, így a kimentett dwg formátumot a Comsol Multiphysics egyéb átalakítások nélkül is meg tudja nyitni. A számítási kapacitás végeessége miatt, azonban egyszerűsítésekre volt szükség a geometria kialakítása során. Dr. Nagy Balázs és Paulik Emese egy korábbi kutatásukban [36] megvizsgálták, hogy födémlemezek vasalásának numerikus szimulációja esetén mekkora eltérést okoz az eredmények közt, ha a betonacélt nem hengerként, hanem 8-szög alapú hasábként modellezik és arra jutottak, hogy az eltérés kevesebb, mint 1%, viszont mind a hálófelbontás, mind a futtatási idő drasztikusan csökkent. Emiatt a szilárdtestek kialakításánál kör helyett, 8-szögeként határoztam meg a betonvas keresztmetszetét, valamint mellőztem az ívek használatát. A vasalást csak a poroszsüveg- és a Bohn-födém esetében modelleztem külön, vasalt födémlemezek és a koszorú esetében a bonyolult és sok esetben bizonytalan geometriai kialakítások miatt a vasalást magasabb beton hővezetési tényező felvételével vettem figyelembe. Jelen kutatás kereteiben továbbá elhanyagolásra kerültek a különböző gerendák rögzítésére szolgáló gerendakapcsok és vonóvasak. Összesen 20 db különböző geometriai modell készült, födémenként 4 db, amelyekre azért volt szükség, hogy meg tudjam határozni a falfelületek és a csatlakozások hőveszteségeit külön-külön. A következő geometriai modellek készültek födémenként:

- 2-irányú fal-födém sarok csatlakozás
- fal-födém csatlakozás a teherhordási irányra merőlegesen
- fal-födém csatlakozás a teherhordási iránnyal párhuzamosan
- falsarok kialakítás

Mivel a vizsgált födém típusok mindegyike gerendás födém, amelyek jellemzője, hogy azonos traktusok ismétlődéséből épülnek fel, így mindegyik esetben 1,5 traktust modelleztem le, amely 2 gerendát és 1,5 födémmezőt fed le, ezek szélessége minden esetben meghaladja a minimális 1 méter szélességet. Függőleges irányban fél-fél szintmagasságot vettem figyelembe, így 2,5 méter magas modelleket készítettem. A teherhordásra merőleges/párhuzamos fal-födém csatlakozások esetében mindig csak az aktuális irányban vettem figyelembe a falcsatlakozást

az MSZ EN ISO 10211:2017 [37] szerinti legalább 1 m hosszan. Falsarok kialakításánál pedig a falakat 1 méter magasságban a födémek nélkül modelleztem. A poroszsüveg födém geometriai kialakítása következő 10. számú ábrán látható:



10. ábra: Poroszsüveg födém különböző kialakítású geometriai modelljei

6.1.1. Rétegrendi kialakítások

A modellezés során a hőtechnikailag nem releváns rétegeket elhanyagoltam, így az alábbi rétegrendi kialakításokat vettem figyelembe:

- **poroszsüveg-födém**
 - 1-3 cm vakolat ívmagasság függvényében
 - I km. vasgerendák, közöttük poroszsüveg téglaboltozat habarcskitöltéssel
 - salakfeltöltés ívmagasság függvényében
 - 2 rtg. szalagparketta vakgerendázatra fektetve
- **Monier-födém**

- 1 cm vakolat
- I km. vasgerendák, közöttük 10 cm vastag beton födémlemez felülbordás kialakítással
- 15 cm salakfeltöltés
- 2 rtg. szalagparketta vakgerendázatra fektetve
- **Horcsik-födém**
 - 1 cm vakolat
 - I km. vasgerendák, közöttük 6,5 cm magas falazótéglából álló födémfalca 2 cm vastag habarcskitöltéssel
 - 16 cm salakfeltöltés
 - 2 rtg. szalagparketta vakgerendázatra fektetve
- **Bohn-födém**
 - 1 cm vakolat
 - 24 cm Bohn-tégla
 - 4 cm felbeton
 - 2 rtg. szalagparketta vakgerendázatra fektetve
- **E-gerendás födém**
 - 1 cm vakolat
 - 19 cm E-jelű gerenda, közte B60/19-jelű béléstestek
 - 4 cm felbeton
 - 2 rtg. szalagparketta vakgerendázatra fektetve

6.2. Anyagtulajdonságok

A higrotermikus elemzéssel a hőmérséklet és a nedvességtartalom függvényében változó anyagtulajdonságokat is figyelembe vehetők, így az anyagok valós termikus viselkedése is jobban közelíthető. Emiatt a teljes kapcsolt hő- és nedvességtechnikai szimulációk elvégzéséhez lényegesen több bemeneti paraméter ismeretére van szükség, mint egyszerű hőtechnikai szimulációk esetében. A HAM szimulációkhoz az anyagok hővezetési tényezőjén és páradiffúzió ellenállásán kívül szükség van a sűrűség, a fajhő, a szorpciós izoterma és a folyadéktranszport tényező, illetve adott esetben ezek hőmérséklet és nedvességtartalom szerinti változásának ismeretére. A vizsgálat során alkalmazott anyagtulajdonságok, mint a λ_i

hővezetési tényező, f_T hőmérséklet-átszámítási együttható, f_ψ nedvesség-átszámítási együttható és μ páradiffúziós ellenállási szám (70%-os nedvességtartalomig érvényes) az MSZ EN ISO 10456 [38] alapján lettek felvéve. A relatív páratartalomtól függő nedvességtárolási képességet (lásd 8., 9., 10., és 11. ábra), vízfelvételi képességet, nedvességgel szembeni ellenállást minden esetben a WUFI 6 szoftver adatbázisa [39] alapján lett meghatározva. A hőtechnikai szimulációk során az anyagok effektív hővezetési tényezője szabvány szerinti konstans értékkel lettek felvéve, míg a HAM szimulációk során kétváltozós függvényként szerepelnek, amelyeket az MSZ EN ISO 10456 [38] alapján határoztam meg:

$$\lambda_2 = \lambda_1 * F_T * F_m \quad (1)$$

ahol:

- λ_1 : első környezeti állapot hővezetési tényezője $[\frac{W}{mK}]$
- λ_2 : második környezeti állapot hővezetési tényezője $[\frac{W}{mK}]$
- F_T : hőmérséklet – átszámítási együttható $[\frac{1}{K}]$
- F_m : nedvesség – átszámítási együttható $[\frac{m^3}{m^3}]$

$$F_T = e^{f_T(T_2-T_1)} \quad (2)$$

ahol:

- f_T : hőmérséklet – átszámítási együttható
- T_1 : az első környezeti állapot hőmérséklete $[K]$
- T_2 : a második környezeti állapot hőmérséklete $[K]$

$$F_m = e^{f_u(u_2-u_1)} \quad (3)$$

ahol:

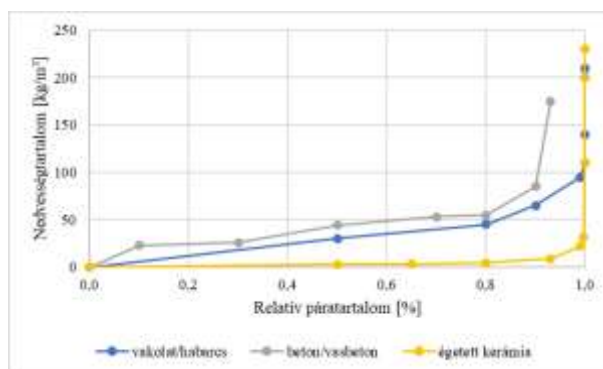
- f_u : nedvesség – átszámítási együttható
- u_1 : az első környezeti állapot szerinti nedvességtartalom $[\frac{m^3}{m^3}]$
- u_2 : az első környezeti állapot szerinti nedvességtartalom $[\frac{m^3}{m^3}]$

Az egyes anyagokhoz tartozó anyagtulajdonságokat a következő 1. számú táblázat tartalmazza:

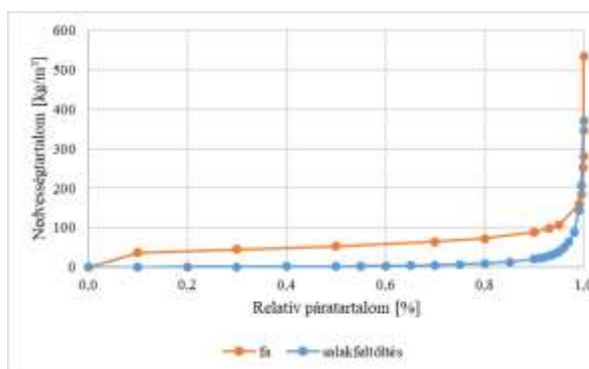
anyagtulajdonságok	hővezetési tényező λ_1 [W/mK]	hőmérséklet-átzámitási együttható f_T [1/K]	nedvesség-átzámitási együttható f_Ψ [m ³ /m ³]	pára diffúziós ellenállási szám μ [1]	folyadéktranszport-tényező 80%-os nedvességtartalomnál $D_{w80\%}$ [m ² /s]	folyadéktranszport-tényező 100%-os nedvességtartalomnál $D_{w100\%}$ [m ² /s]
<i>vakolat</i>	0,80	0,001	4	10	1,09E-10	2,49E-08
<i>égetett kerámia</i>	0,80	0,001	10	10	3,00E-05	7,57E-08
<i>beton</i>	2,00	0,001	4	100	1,84E-08	2,00E-07
<i>vasbeton</i>	2,50	0,001	4	130	1,84E-08	2,00E-07
<i>fa</i>	0,18	1,400	80	5	4,00E-12	5,00E-12
<i>salakfeltöltés</i>	0,45	0,001	4	10	7,46E-09	7,00E-05
<i>habarcs</i>	0,80	0,001	4	10	1,09E-10	2,49E-08
<i>betonvas</i>	50,00	-	-	1000	-	-
<i>levegő</i> $d=1,3$ cm	0,81	-	-	1	-	-
<i>levegő</i> $d=2$ cm	0,13	-	-	1	-	-
<i>levegő</i> $d=6$ cm	0,36	-	-	1	-	-
<i>levegő</i> $d=1,13$ cm	0,07	-	-	1	-	-

1. táblázat: Szimulációhoz szükséges anyagtulajdonságok

Az anyagok WUFI 6 adatbázisa alapján meghatározott nedvességtároló képességét a következő 11. és 12. ábrák mutatják:



11. ábra: Vakolat, habarcs, beton, vasbeton és égetett kerámia nedvességtároló képessége



12. ábra: Fa és salakfeltöltés nedvességtároló képessége

6.3. Numerikus számítási módszer, fizika

A dolgozat keretein belül Comsol Multiphysics 5.6 szoftver segítségével végeztem állandósult állapotban kapcsolt hő- és nedvességtranszport szimulációt, amely során a legújabb prEN 15026:2022 [40] szabványt vettem figyelembe. Az állandósult állapot egyenletei időtől függetlenek és nem veszik figyelembe az anyagok hő- és nedvesség kapacitását, azonban a hővezetési tényező korrigálásra kerül a nedvességtároló képesség és a hőmérséklet alapján, valamint a futtatási idejük jelentősen rövidül a szimulációk során.

6.3.1. Hőtranszport

A hőtranszportra vonatkozó parciális differenciálegyenlet első tagja hővezetésből adódó hőáramokat, a második tagja az evaporációból adódó hőáramokat veszi figyelembe. Amennyiben csak hőtechnikai szimuláció készül, úgy csak az első tagot kell figyelembe venni, alakja a következő:

$$\nabla q = \nabla[\lambda_{eff} \nabla T + L_v \delta_p \nabla(\varphi p_{sat}(T))] = 0 \quad (4)$$

ahol:

- $\nabla = (\frac{\delta}{\delta x}, \frac{\delta}{\delta y}, \frac{\delta}{\delta z})$: nabla vektoriális differenciáloperátor
- q : hőáramsűrűség [$\frac{W}{m^2}$]
- Q : hőforrás [$\frac{W}{m^3}$]
- $\lambda_{eff} = \lambda_{10,dry} \cdot e^{f^T(T_2-10^\circ C)} \cdot e^{f_\psi(u_2)}$: effektív hővezetési tényező [$\frac{W}{mK}$] [38]
- T : abszolút hőmérséklet [K]
- L_v : fázisváltás látens hője [$\frac{J}{kg}$]
- $\delta_p = \frac{\delta_a}{\mu}$: páradiffúziós/páravezetési tényező [$\frac{kg}{msPa}$]
- μ : páradiffúziós ellenállási szám [1]
- φ : relatív nedvességtartalom [1]
- p_{sat} : telítési párányomás [Pa]

A (4) egyenlet csak hőtechnikai modellezés és szilárd testek esetében a következőképpen alakul [41]:

$$\nabla * q = Q = 0 \quad (5)$$

$$q = -\lambda_{eff} * \nabla * T \quad (6)$$

A hőtranszport peremfeltételeire vonatkozó egyenletek az prEN 15026:2022 [40] értelmében a következők:

– külső peremfeltétel:

$$q_o - n * q = \alpha * (T_{ext} - T) \quad (7)$$

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

$$\alpha = \frac{1}{R_{se}} = 17 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

ahol:

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

– belső peremfeltétel:

$$-n * q = \alpha * (T_{int} - T) \quad (8)$$

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

$$\alpha = \frac{1}{R_{si}} = 8 \left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$$

ahol:

- q_o : konvektív hőáramsűrűség $\left[\frac{W}{m^2} \right]$
- $-n * q$: a felületre normális befele mutató hőáramsűrűség
- α : hőátadási tényező $\left[\frac{W}{m^2 * K} \right]$

- T_{int} : *belső hőmérséklet [K]*
- T : *felület hőmérséklete [K]*

A hőtechnikai szimulációk során a metszősíkok adiabatikusak, látens hőáramok nincsenek a modellben.

6.3.2. Nedvességtranszport

A nedvességtranszportra vonatkozó parciális differenciálegyenlet első tagja a nedvesség áramok folyadéktranszportjára, míg második tagja nedvesség áramok páratranszportjára vonatkozik és alakja szilárd testek esetében a következő:

$$\nabla g = \nabla [\xi D_w \nabla \varphi + \delta_p \nabla (\varphi p_{sat}(T))] = G = 0 \quad (9)$$

ahol:

- $\nabla = (\frac{\delta}{\delta x}, \frac{\delta}{\delta y}, \frac{\delta}{\delta z})$: *nabla vektoriális differenciáloperátor*
- g : *nedvességáram sűrűség $[\frac{kg}{m^2 s}]$*
- G : *nedvességforrás $[\frac{kg}{m^3 s}]$*
- $\xi = \frac{\delta w}{\delta \varphi} [\frac{kg}{m^3}]$: *differenciális nedvesség kapacitás*
- D_w : *diffúziós/folyadéktranszport tényező $[\frac{m^2}{s}]$*

A nedvességtranszport peremfeltételeinek meghatározásakor lehetőség van helyi időjárás adatok alkalmazására, így jelen dolgozatban az értékeket nem az MSZ EN 24140 [32], hanem Dr. Nagy Balázs kutatása [31] alapján határoztam meg, amelyek egy Budapesti, átlagos januári időjárást vesznek figyelembe. A peremfeltételek a következők:

- külső peremfeltétel:

$$-n \cdot g = d_z [\beta_e (\varphi_e \cdot p_{sat}(T_e) - \varphi_{se} \cdot p_{sat}(T_{se}))] \quad (10)$$

$$\varphi_e = 0,73$$

$$T_e = 0,9^\circ\text{C}$$

ahol:

- $\beta_e = \frac{\delta_a}{s_{d,se}}$: külső felületek nedvességtranszport együtthatója $[\frac{\text{kgK}}{\text{WsPa}}]$
- $s_{d,se} = \frac{1}{67+90 \cdot \nu} [\frac{\text{s}}{\text{m}}]$
- φ_e, φ_{se} : külső levegő és felületek relatív nedvességtartalma [1]
- T_e, T_{se} : külső levegő és felületek hőmérséklete [K]

– belső peremfeltétel:

$$-n \cdot g = d_z [\beta_i (\varphi_i \cdot p_{\text{sat}}(T_i) - \varphi_{si} \cdot p_{\text{sat}}(T_{si}))] \quad (11)$$

$$\varphi_e = 0,41$$

$$T_e = 20^\circ\text{C}$$

ahol:

- $\beta_i = \frac{\delta_a}{s_{d,si}}$: felületek nedvességtranszport együtthatója $[\frac{\text{kgK}}{\text{WsPa}}]$
- φ_i, φ_{si} : belső levegő és felületek relatív nedvességtartalma [1]
- T_i, T_{si} : belső levegő és felületek hőmérséklete [K]

7. Szimulációk kiértékelésének módszertana

Mind a hőtechnikai szimulációk, mind a hígtermikus szimulációk segítségével meghatároztam a modellek belső felületeinek hőveszteségét és minimum hőmérsékletét. A kapcsolt hő- és nedvességtranszport szimulációkban a geometriai modellek és az anyagtulajdonságok megegyeznek a korábbiakban használtakkal, de a szimulációkban figyelembe vannak véve a látens hőáramok és az anyagok nedvességgel szembeni viselkedése, így ezektől a szimulációktól pontosabb eredmények várhatók. A hőveszteségek alapján meghatározható, hogy 1 K hőmérsékletkülönbség hatására mekkora hőáram alakul ki 1 m²-nyi felületen. A belső felület minimum hőmérsékletéből számítható a csomópont saját léptékben mért hőmérséklete, amely állagmegóvási problémák kezeléséhez hasznos tényező. A számítások során az MSZ EN ISO 10211:2017 [37] szerinti számítási módszertant alkalmaztam.

7.1. Többlet hőveszteség meghatározása

A numerikus szimulációk segítségével meghatározott csomóponti többlet hőveszteségek meghatározásához első lépésben meg kell határozni a 3 dimenziós szimulációból kapott L_{3D} csomóponti hőátbocsátási tényezőt:

$$L_{3D} = \frac{Q_{3D}}{\Delta T} \quad (12)$$

ahol:

- L_{3D} : 3D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező [$\frac{W}{K}$]
- Q_{3D} : 3D szimulációval meghatározott teljes felületi hőáram [W]
- ΔT : külső és belső hőmérsékletek különbsége [K]

Következő lépésben a teherhordási iránnyal párhuzamos és merőleges irányban lévő fal-födém csatlakozások és a falsarok 2 dimenziós szimulációjából kapott L_{2D} csomóponti hőátbocsátási tényezőit kell meghatározni:

$$L_{2D} = \frac{Q_{2D}}{l_j * \Delta T} \quad (13)$$

- L_{2D} : 2D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező [$\frac{W}{mK}$]

- Q_{2D} : 2D szimulációval meghatározott teljes felületi hőáram [W]
- ΔT : külső és belső hőmérsékletek különbsége [K]
- l_j : csatlakozási hossz [m]

A teherhordási iránnyal párhuzamos és merőleges irányban lévő fal-födém csatlakozások, valamint a falsarok Ψ vonalmenti hőátbocsátási tényezőjének meghatározásához szükség van a fal U korrigálatlan hőátbocsátási tényezőjének kiszámítására, valamint a geometriai modellekből le kell kérni a megfelelő csatlakozási hosszakat:

$$\Psi = L_{2D} - \sum_{j=1}^{N_i} U_j * l_j \quad (14)$$

ahol:

- Ψ : vonalmenti hőátbocsátási tényező [$\frac{W}{mK}$]
- L_{2D} : 2D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező [$\frac{W}{K}$]
- Q_{2D} : 2D szimulációval meghatározott teljes felületi hőáram [W]
- U_j : a két vizsgált teret elválasztó j 1D épületelem hőátbocsátási tényezője [$\frac{W}{m^2K}$]
- l_j : az a hossz, amelyen U_j érvényes [m]

A csomópontra számolt 3 dimenziós hőátbocsátási tényezőjéből kivonva a falfelületekre fajlagosított hőátbocsátási tényezőt, valamint a csatlakozási hosszakra vonatkoztatott vonalmenti hőátbocsátási tényezőket megkapjuk, hogy mekkora az adott szerkezeti kialakítás χ többlet hővesztesége:

$$\chi = L_{3D} - \sum_{i=1}^{N_i} U_i * A_i - \sum_{j=1}^{N_i} \Psi_j * l_j \quad (15)$$

ahol:

- L_{3D} : 3D szimulációból kapott csomóponti hőátbocsátási tényező [$\frac{W}{K}$]
- U_i : a két vizsgált teret elválasztó i 1D épületelem hőátbocsátási tényezője [$\frac{W}{m^2K}$]
- A_i : az a felület, amelyen az U_i érték érvényes

- Ψ_j : vonalmenti hőátbocsátási tényező $[\frac{W}{mK}]$
- l_j : az a hossz, amelyen Ψ_j érvényes $[m]$

7.2. Saját léptékben mért hőmérséklet

A nem megfelelően kialakított szerkezeti részletek esetében, megfelelő hőmérséklet és nedvességtartalom viszonyok esetében penészesedési probléma állhat elő a belső felületeken. Ennek ellenőrzésére szolgál az f_{Rsi} saját léptékben mért hőmérséklet, amely a DIN 4108-2 [42] értelmében, ha 0,7-nél kisebb értéket eredményez, akkor állagvédelmi szempontból nem megfelelő épületszerkezeti kialakításról beszélhetünk és fennáll a penészesedés lehetősége. Hazánkban szigorúbb értelmezés alapján ez az érték 0,8 is lehet, amely értelmezés főleg tapasztalaton és az MSZ EN 24140 [32] 17. oldalán található C3. ábrán alapul. A numerikus szimulációkból lekért minimum belső felületi hőmérséklet alapján az alábbi módon számítható a csomóponti kialakítás saját léptékben mért hőmérséklete:

$$f_{Rsi} = \frac{T_{s,min} - T_e}{T_i - T_e} [1] \quad (16)$$

ahol:

- f_{Rsi} : saját léptékben mért hőmérséklet $[K]$
- $T_{s,min}$: belső felületen mért minimum hőmérséklet $[K]$
- T_e : a külső levegő hőmérséklete $[K]$
- T_i : a belső levegő hőmérséklete $[K]$

8. Eredmények

A számításokhoz szükséges geometriai modellekből lekért hosszakat és felületeket a dolgozat melléklete tartalmazza.

8.1. Hőtechnikai szimulációk eredményei

A hőtechnikai szimulációk eredményei alapján meghatározott többlet hőveszteségek és saját léptékben mért hőmérsékletek számításához szükséges adatokat a 2. táblázat tartalmazza:

modell	hőveszteségek hőtechnikai szimulációból				U_{fal} [W/m ² K]	ΔT [K]	$T_{\text{s,min}}$ [°C]
	Q_{teljes} [W]	$Q_{\text{merőleges}}$ [W]	$Q_{\text{párhuzamos}}$ [W]	Q_{fal} [W]			
poroszszüveg födém	242,850	144,390	85,428	98,413	1,439	25	9,92
Monier-födém	288,880	187,790	89,956	116,060	1,439	25	10,65
Horcsik-födém	281,060	165,720	90,531	106,610	1,439	25	5,79
Bohn-födém	198,850	92,313	92,112	95,821	1,439	25	12,98
E-gerendás födém	200,820	90,747	95,008	78,199	1,439	25	9,37

2. táblázat: Hőtechnikai szimulációkból kapott adatok

A hőtechnikai szimulációból megkapott adatok segítségével a dolgozat 6.3.1 fejezetében ismertetett számítási módszertan alapján a 3. táblázatban látható eredmények születtek:

Hőtechnikai szimulációk									
modell	csomóponti 3D hőátbocsátási tényező	csomóponti 2D hőátbocsátási tényező			vonalmenti hőátbocsátási tényező			többlet hőveszt.	saját léptékben mért hőm.
	L_{3D} [W/K]	$L_{2Dpárh}$ [W/mK]	L_{2Dmer} [W/mK]	L_{2Dfal} [W/mK]	$\Psi_{2Dpárh}$ [W/mK]	Ψ_{2Dmer} [W/mK]	Ψ_{2Dfal} [W/mK]	χ [W/K]	f_{Rsi} [°C]
poroszszüveg födém	9,714	3,574	3,596	3,937	0,488	0,510	0,265	-0,077	0,597
Monier-födém	11,555	3,598	3,601	4,642	0,462	0,465	0,250	0,033	0,626
Horcsik-födém	11,242	3,621	3,703	4,264	0,528	0,610	0,265	0,424	0,432
Bohn-födém	7,954	3,684	3,693	3,833	0,558	0,566	0,250	0,033	0,719
E-gerendás födém	8,033	3,800	3,781	3,128	0,595	0,575	0,250	0,118	0,575

3. táblázat: Hőtechnikai szimulációkból számolt eredmények

8.2. Higrotermikus szimulációk eredményei

A higrotermikus szimulációk eredményei alapján meghatározott többlet hőveszteségek és saját léptékben mért hőmérsékletek számításához szükséges adatokat a 4. táblázat tartalmazza:

modell	hővesztések higrotermikus szimulációból				U_{fal} [W/m ² K]	ΔT [K]	$T_{s,min}$ [°C]
	Q_{teljes} [W]	$Q_{merőleges}$ [W]	$Q_{párhuzamos}$ [W]	Q_{fal} [W]			
poroszsüveg födém	190,840	113,400	66,256	76,090	1,451	19,1	13,22
Monier-födém	227,910	145,230	70,250	89,685	1,451	19,1	16,54
Horcsik-födém	218,590	126,950	70,682	82,409	1,451	19,1	12,91
Bohn-födém	160,770	74,087	74,140	74,093	1,451	19,1	12,28
E-gerendás födém	161,580	72,330	75,745	60,510	1,451	19,1	13,25

4. táblázat: Higrotermikus szimulációkból kapott adatok

A higrotermikus szimulációból megkapott adatok segítségével a dolgozat 6.3.2 fejezetében ismertetett számítási módszertan alapján a 5. táblázatban látható eredmények születtek:

Higrotermikus szimulációk									
modell	csomóponti 3D hőátbocsátási tényező	csomóponti 2D hőátbocsátási tényező			vonalmonti hőátbocsátási tényező			többlet hőveszt.	saját léptékben mért hőm.
	L_{3D} [W/K]	$L_{2Dpárh}$ [W/mK]	L_{2Dmer} [W/mK]	L_{2Dfal} [W/mK]	$\Psi_{2Dpárh}$ [W/mK]	Ψ_{2Dmer} [W/mK]	Ψ_{2Dfal} [W/mK]	χ [W/K]	f_{Rsi} [°C]
poroszsüveg födém	9,992	3,629	3,697	3,984	0,515	0,584	0,280	-0,046	0,645
Monier-födém	11,932	3,678	3,705	4,696	0,514	0,541	0,265	0,086	0,819
Horcsik-födém	11,445	3,701	3,836	4,315	0,580	0,593	0,280	0,495	0,629
Bohn-födém	8,417	3,882	3,879	3,879	0,728	0,725	0,265	0,080	0,596
E-gerendás födém	8,460	3,966	3,945	3,168	0,732	0,711	0,265	0,189	0,646

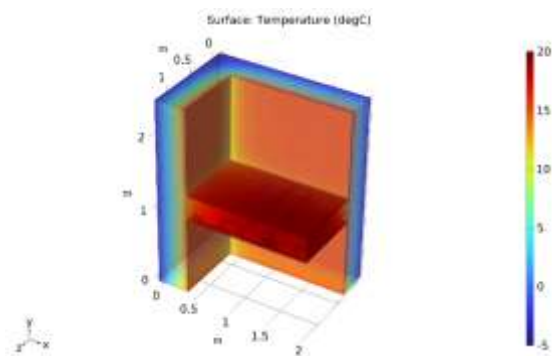
5. táblázat: Higrotermikus szimulációkból számolt eredmények

8.3. Eredmények vizualizálása

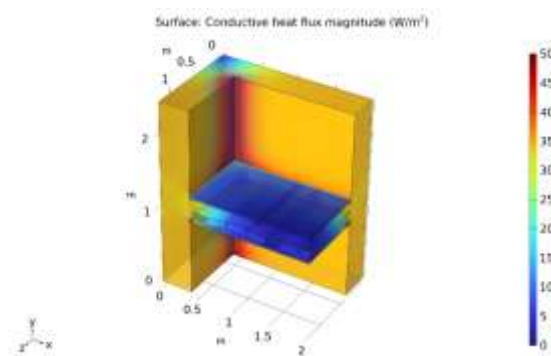
Comsol Multiphysics 5.6 szoftverben végzett numerikus szimulációk során az eredmények vizualizálására is lehetőség nyílik. A hőtechnikai szimulációk során minden födém típusra lekértem a fal-födém csatlakozás csomópontok hőmérsékleteloszlás és hőáramsűrűség ábráit, míg higrotermikus szimulációk során ezeken kívül lekértem a relatív nedvességtartalom és a nedvességáram sűrűség ábrákat. Jelen dolgozat keretein belül a terjedelmi korlátok miatt csak az 5 teljes fal-födém modell kicsinyített ábrái kerülnek bemutatásra. A teljes felbontású modellek, valamint a teherhordási irányra párhuzamos és merőleges fal-födém csatlakozások és a falsarok csomópontjainak ábrái a dolgozat mellékleteihez csatolva találhatóak.

– *poroszsüveg födém:*

A poroszsüveg födém hőtechnikai szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást és hőáram sűrűséget mutató eredményábrák a 13. és 14. ábrákon kerülnek bemutatásra:

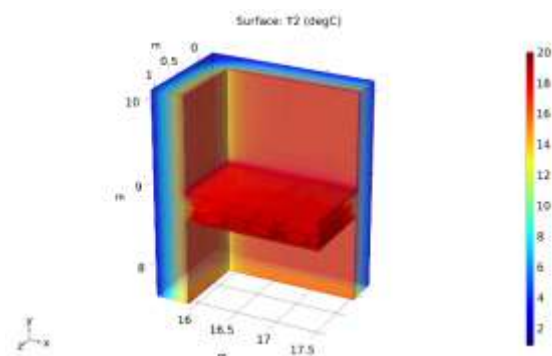


13. ábra: Poroszsüveg földem hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

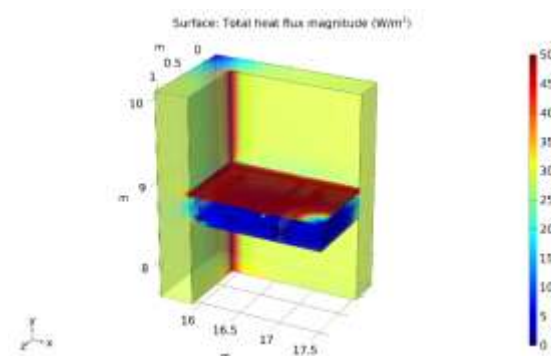


14. ábra: Poroszsüveg földem hőáram sűrűség ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

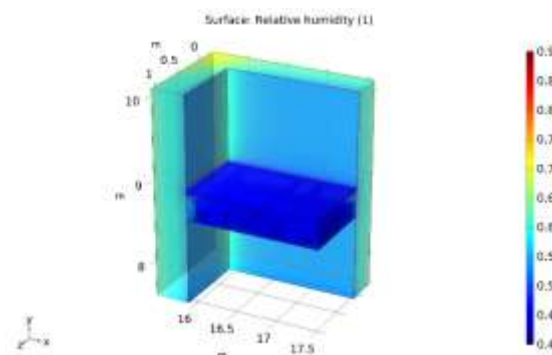
A poroszsüveg földem higrotermikus szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást, hőáram sűrűséget, relatív nedvességtartalmat és nedvességáram sűrűséget mutató eredményábrák a 15.-17. ábrákon kerülnek bemutatásra:



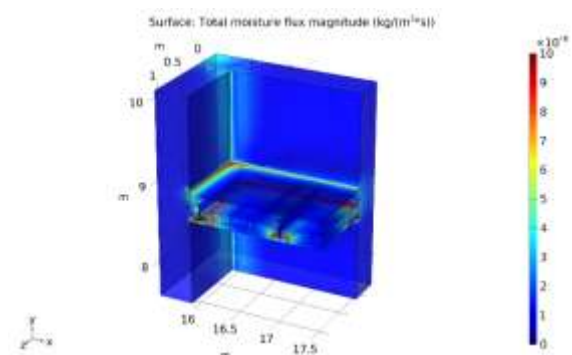
15. ábra: Poroszsüveg földem hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimuláció esetén



16. ábra: Poroszsüveg földem hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimuláció esetén



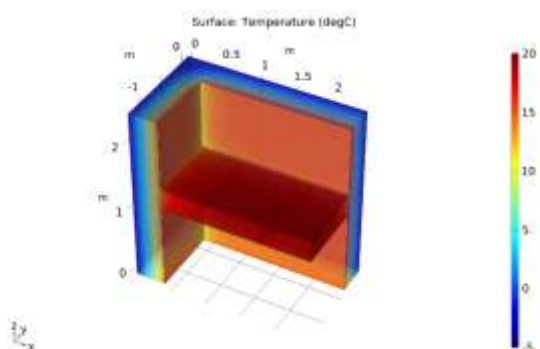
17. ábra: Poroszsüveg földem relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimuláció esetén



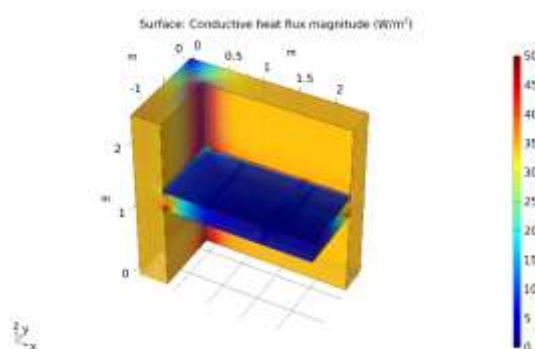
18. ábra: Poroszsüveg földem nedvességáram sűrűség ábrája higrotermikus szimuláció esetén

– *Monier-födém:*

A Monier-födém hőtechnikai szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást és hőáram sűrűséget mutató eredményábrák a 19. és 20. ábrákon kerülnek bemutatásra:

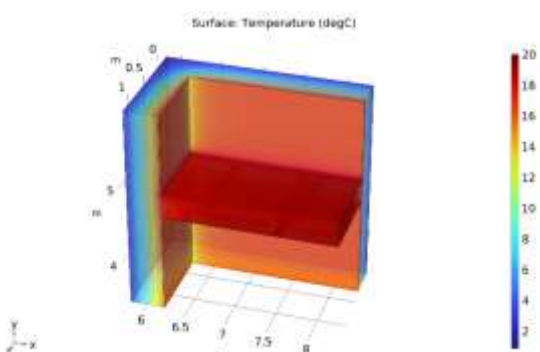


19. ábra: Monier-födém hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

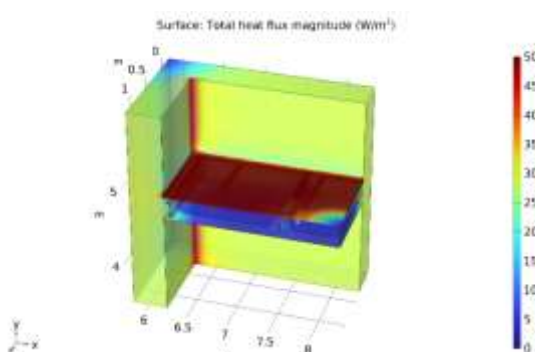


20. ábra: Monier-födém hőáram sűrűség ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

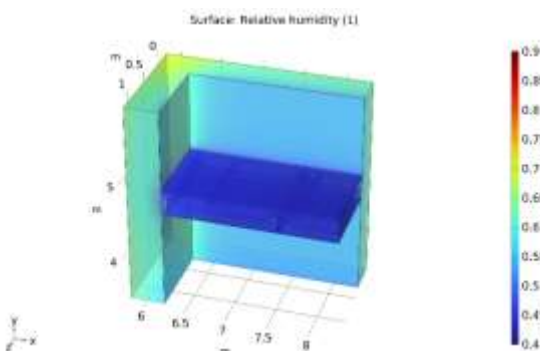
A Monier-födém higrotermikus szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást, hőáram sűrűséget, relatív nedvességtartalmat és nedvességáram sűrűséget mutató eredményábrák a 21.-24. ábrákon kerülnek bemutatásra:



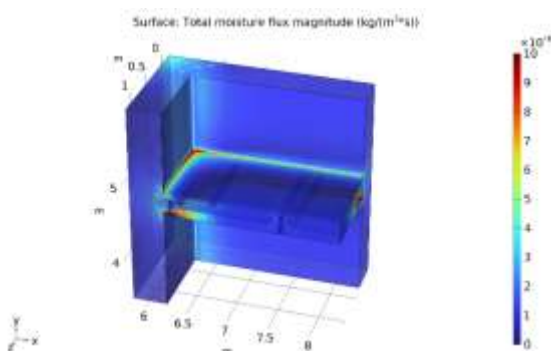
21. ábra: Monier-födém hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimuláció esetén



22. ábra: Monier-födém hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimuláció esetén



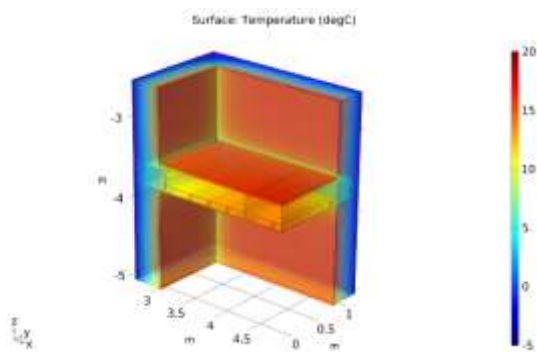
23. ábra: Monier-födém relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimuláció esetén



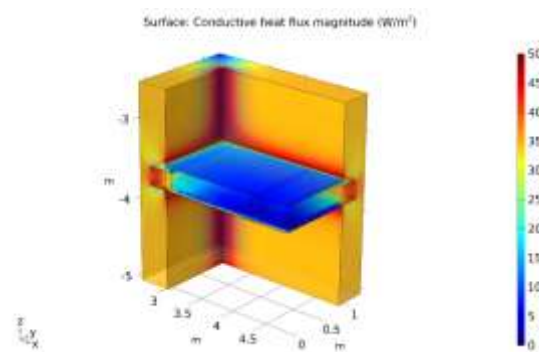
24. ábra: Monier-födém nedvességáram eloszlás ábrája higrotermikus szimuláció esetén

– *Horcsik-födém:*

A Horcsik-födém hőtechnikai szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást és hőáram sűrűséget mutató eredményábrák a 25. és 26. ábrán kerülnek bemutatásra:

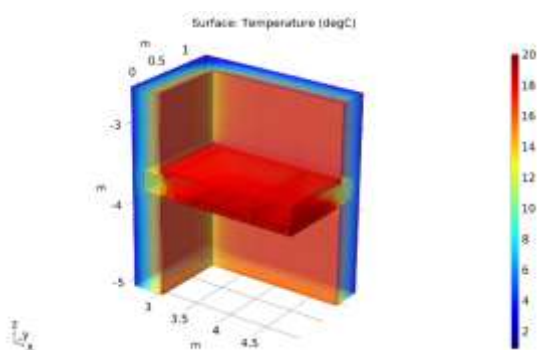


25. ábra: Horcsik-födém hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

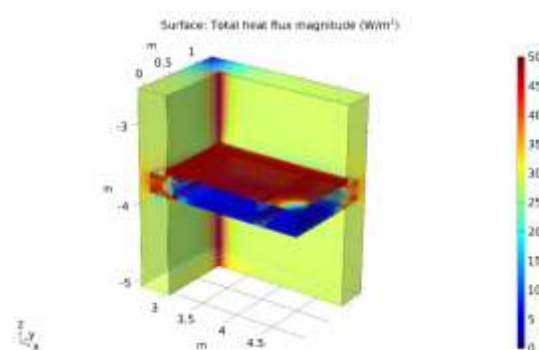


26. ábra: Horcsik-födém hőáram sűrűség ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

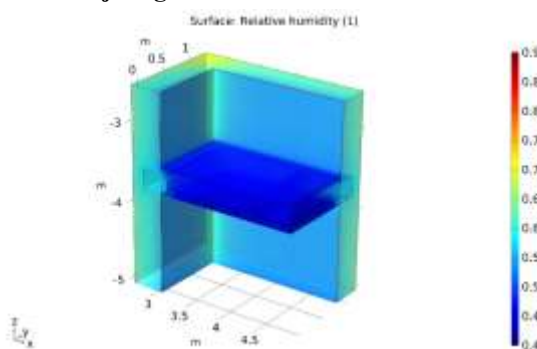
A Monier-födém higrotermikus szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást, hőáram sűrűséget, relatív nedvességtartalmat és nedvességáram sűrűséget mutató eredményábrák a 27.-29. ábrákon kerülnek bemutatásra:



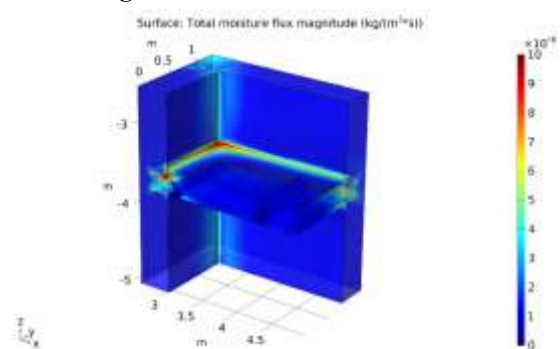
27. ábra: Horcsik-födém hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimuláció esetén



29. ábra: Horcsik-födém hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimuláció esetén



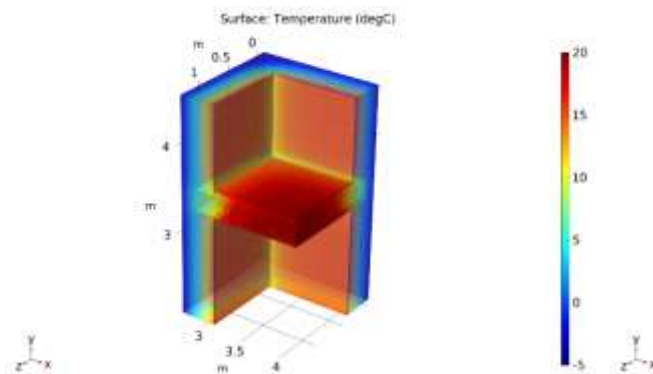
28. ábra: Horcsik-födém relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimuláció esetén



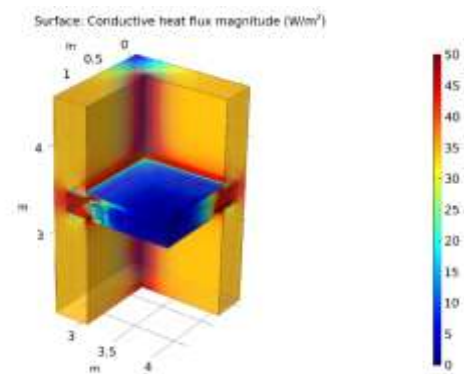
30. ábra: Horcsik-födém nedvességáram eloszlás ábrája higrotermikus szimuláció esetén

– *Bohn-födém:*

A Bohn-födém hőtechnikai szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást és hőáram sűrűséget mutató eredményábrák a 31. és 32. ábrákon kerülnek bemutatásra:

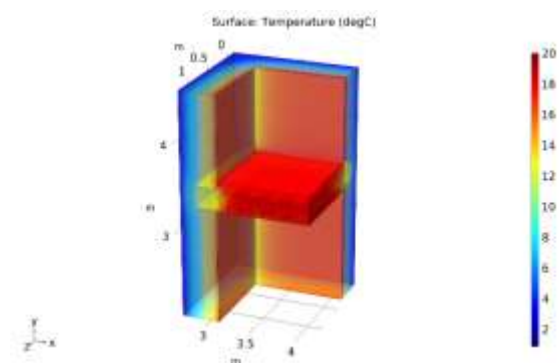


31. ábra: Bohn-födém hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

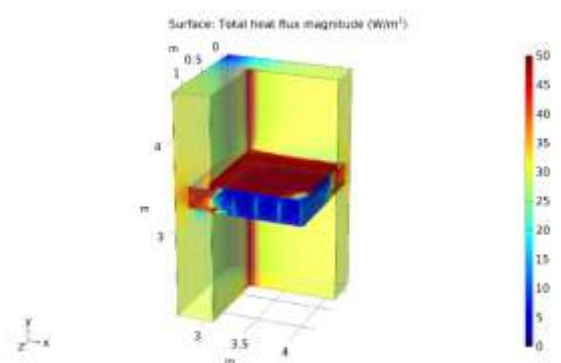


32. ábra: Bohn-födém hőáram sűrűség ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

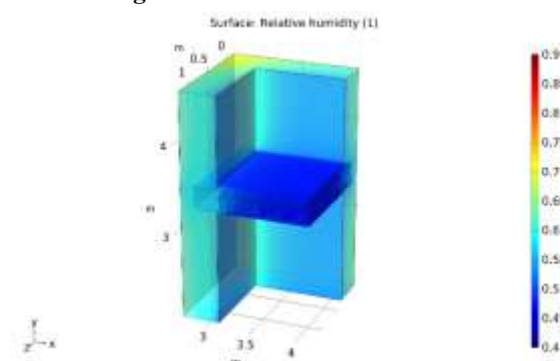
A Bohn-födém higrotermikus szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást, hőáram sűrűséget, relatív nedvességtartalmat és nedvességáram sűrűséget mutató eredményábrák a 33.-36. ábrákon kerülnek bemutatásra:



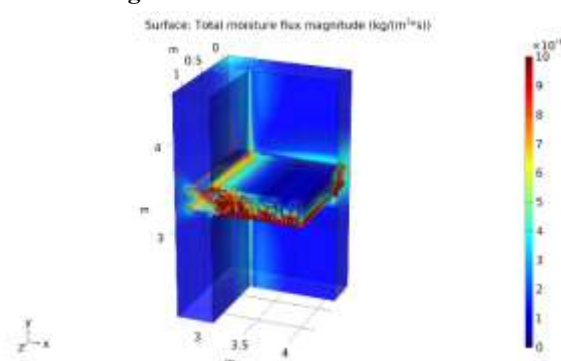
33. ábra: Bohn-födém hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimuláció esetén



35. ábra: Bohn-födém hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimuláció esetén



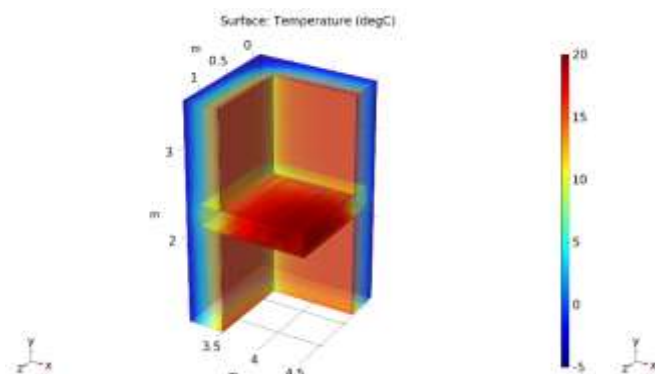
34. ábra: Bohn-födém relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimuláció esetén



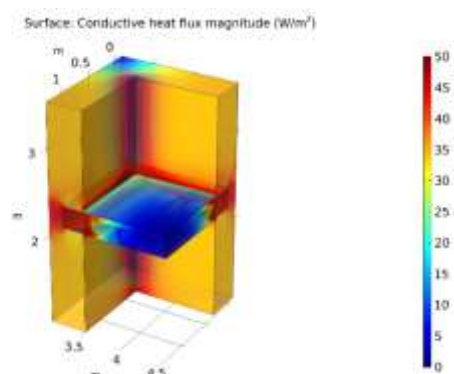
36. ábra: Bohn-födém nedvességáram eloszlás ábrája higrotermikus szimuláció esetén

– *E-gerendás födém:*

Az E-gerendás födém hőtechnikai szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást és hőáram sűrűséget mutató eredményábrák a 37. és 38. ábrákon kerülnek bemutatásra:

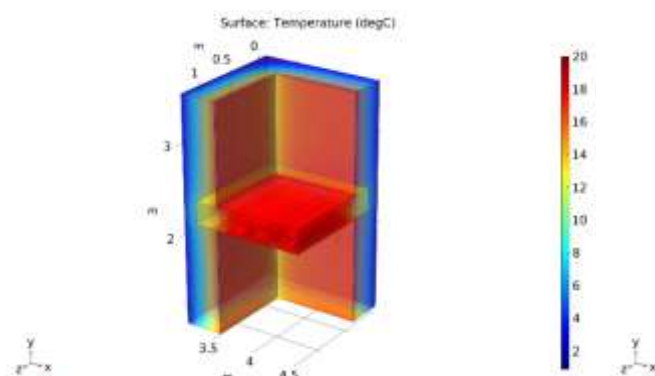


37. ábra: E-gerendás földem hőmérséklet eloszlás ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

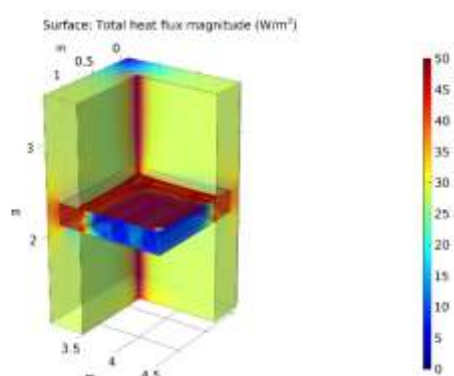


38. ábra: E-gerendás földem hőáram sűrűség ábrája hőtechnikai szimuláció esetén

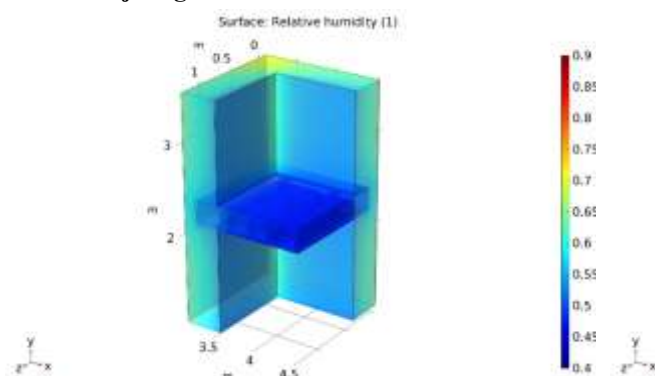
Az E-gerendás földem higrotermikus szimulációjához tartozó hőmérséklet eloszlást, hőáram sűrűséget, relatív nedvességtartalmat és nedvességáram sűrűséget mutató eredményábrák a 39.- 42. ábrákon kerülnek bemutatásra:



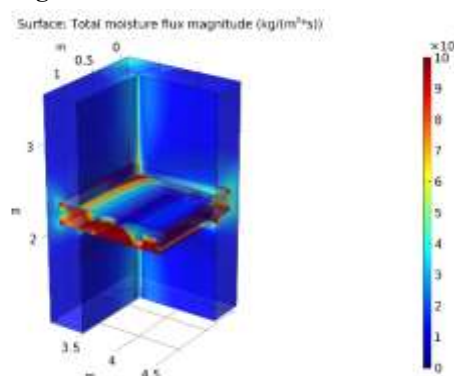
39. ábra: E-gerendás földem hőmérséklet eloszlás ábrája higrotermikus szimuláció esetén



41. ábra: E-gerendás földem hőáram sűrűség ábrája higrotermikus szimuláció esetén



40. ábra: E-gerendás földem relatív nedvességtartalom ábrája higrotermikus szimuláció esetén

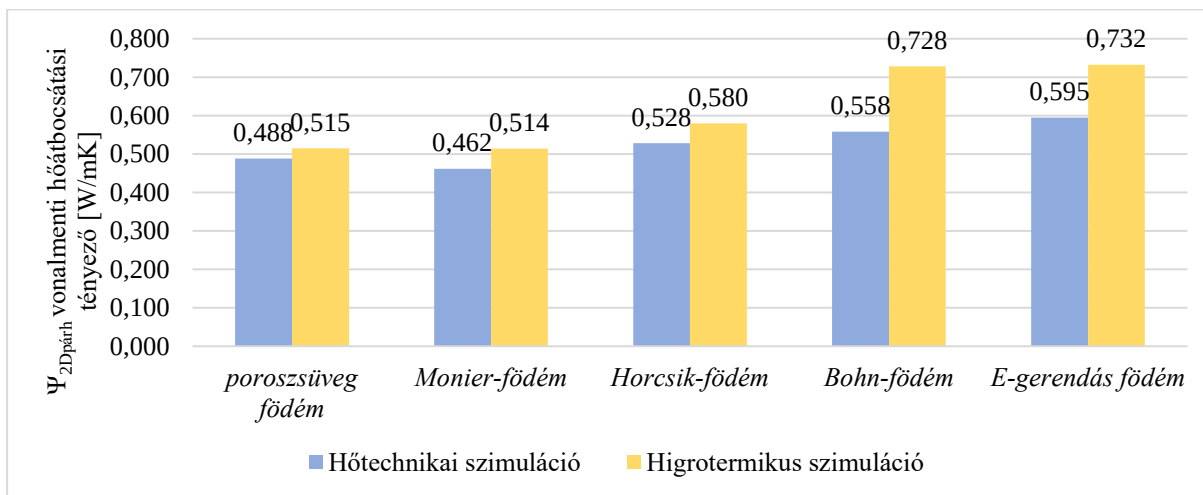


42. ábra: E-gerendás földem nedvességáram sűrűség ábrája higrotermikus szimuláció esetén

8.4. Eredmények kiértékelése, összehasonlítása

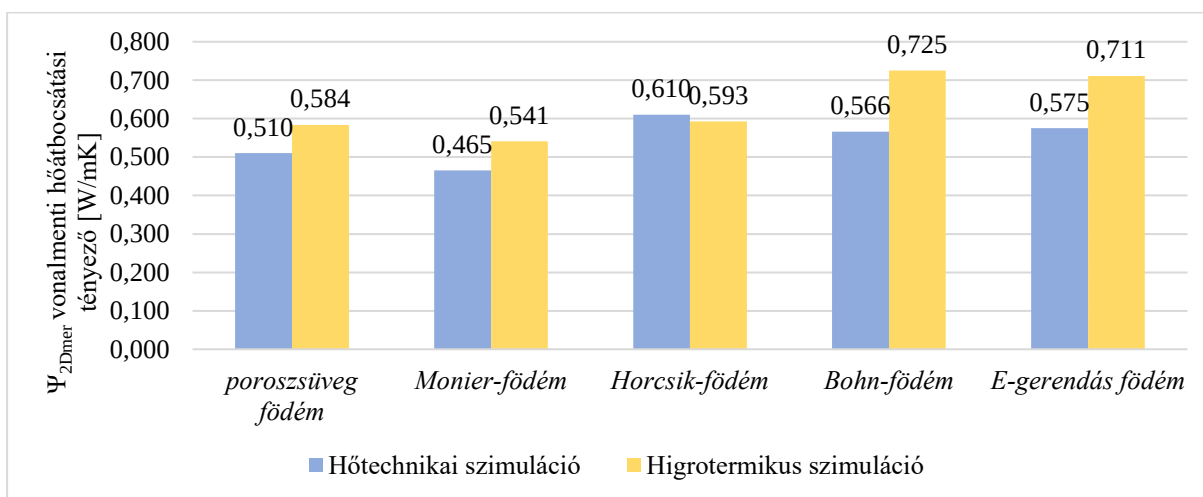
A hőtechnikai és higrotermikus szimulációk eredményeinek összehasonlítását Excel-ben készített oszlopdiagrammok segítségével végeztem el:

- Ψ vonalmenti hőátbocsátási tényezők összehasonlítása



	poroszsüveg földem	Monier-födém	Horcsik-födém	Bohn-födém	E-gerendás földem
eltérés [%]	5,5%	11,3%	9,8%	30,5%	23,0%

43. ábra: Hőtechnikai és higrotermikus szimulációk $\Psi_{2Dpárh}$ hőátbocsátási tényezőinek összehasonlítása

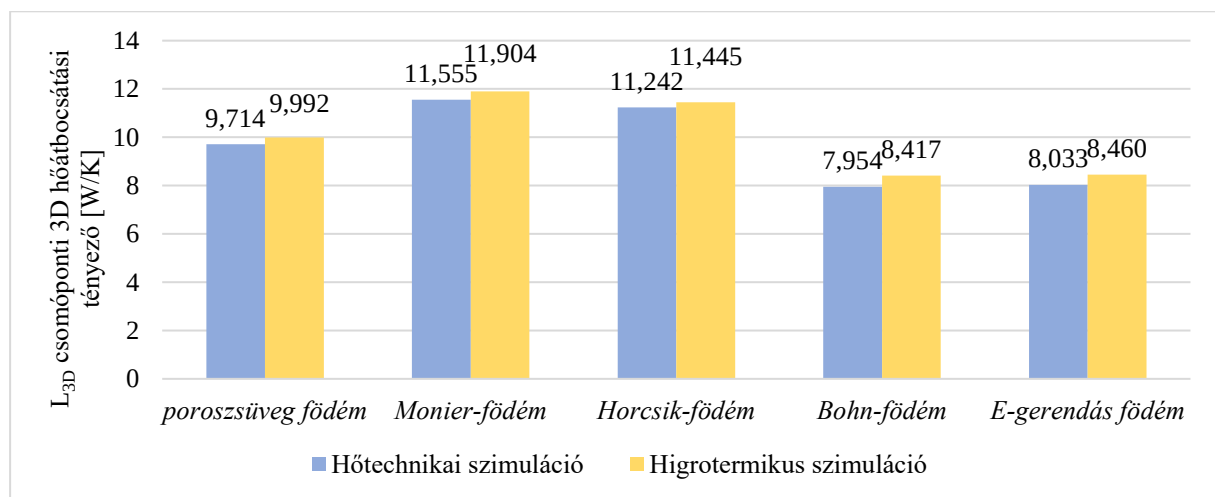


	poroszsüveg földem	Monier-födém	Horcsik-födém	Bohn-födém	E-gerendás földem
eltérés [%]	14,5%	16,3%	-2,8%	28,1%	23,7%

44. ábra: Hőtechnikai és higrotermikus szimulációk Ψ_{2Dmer} hőátbocsátási tényezőinek összehasonlítása

A fal-födém csatlakozások mentén minden esetben nagy vonalmenti hőhidak keletkeznek, ami főleg a hőtechnikailag helytelen és hiányos kialakításnak, valamint a gyenge anyagminőségeknek tudható be. A 43. és 44. ábrán lévő grafikonok alapján elmondható, hogy a higrotermikus szimuláció során a Horcsik-födém teherhordási irányra merőleges esetét leszámítva minden esetben nagyobb vonalmenti hőátbocsátási tényezők adódnak, mind a hőtechnikai szimulációk során. A legnagyobb %-os eltérés a szimulációk között a Bohn-födém teherhordási iránnyal párhuzamos esetben adódik, ekkor a HAM szimuláció 30,5%-kal nagyobb vonalmenti hőátbocsátási tényezőt eredményez.

– *L_{3D} csomóponti 3D-s hőátbocsátási tényezők összehasonlítása*

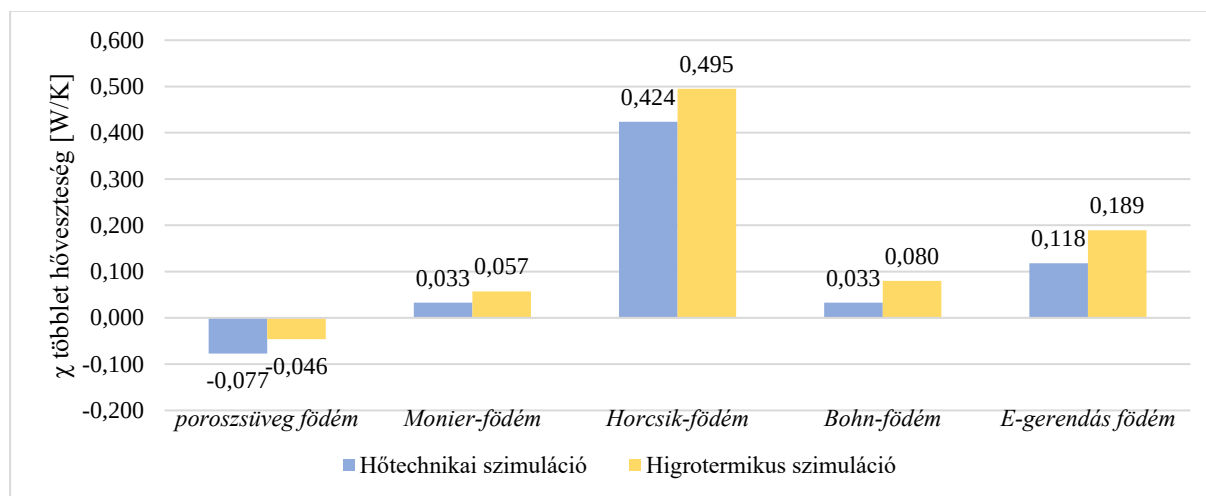


	poroszsüveg födém	Monier-födém	Horcsik-födém	Bohn-födém	E-gerendás födém
eltérés [%]	2,9%	3,3%	1,8%	5,8%	5,3%

45. ábra: Hőtechnikai és higrotermikus szimulációk L3D 3D-s csomóponti hőátbocsátási tényezőinek összehasonlítása

A csomóponti hőátbocsátási tényezők a 45. ábrán látható módon minden födém típus esetében nagyobbra adódnak HAM szimulációk során, amikor részletesebb anyagtulajdonságokat is figyelembe veszünk. Alapvetően nincs nagy eltérés a szimulációk eredményei közt, a legnagyobb különbség Bohn-födém esetében 5,8%-ra adódik, azonban ez nem jelenti azt, hogy nem szükséges higrotermikus szimulációkat végezni. Ahogy azt a csatlakozási hőhidak esetében láthattuk, a vonalmenti hőhidak esetében már jóval nagyobb eltérések adódnak, amelyek miatt a többlet hőveszteségeket jóval alábecsülhetjük, ha csak hőtechnikai szimulációkat végzünk.

– χ többlet hőveszteségek összehasonlítása

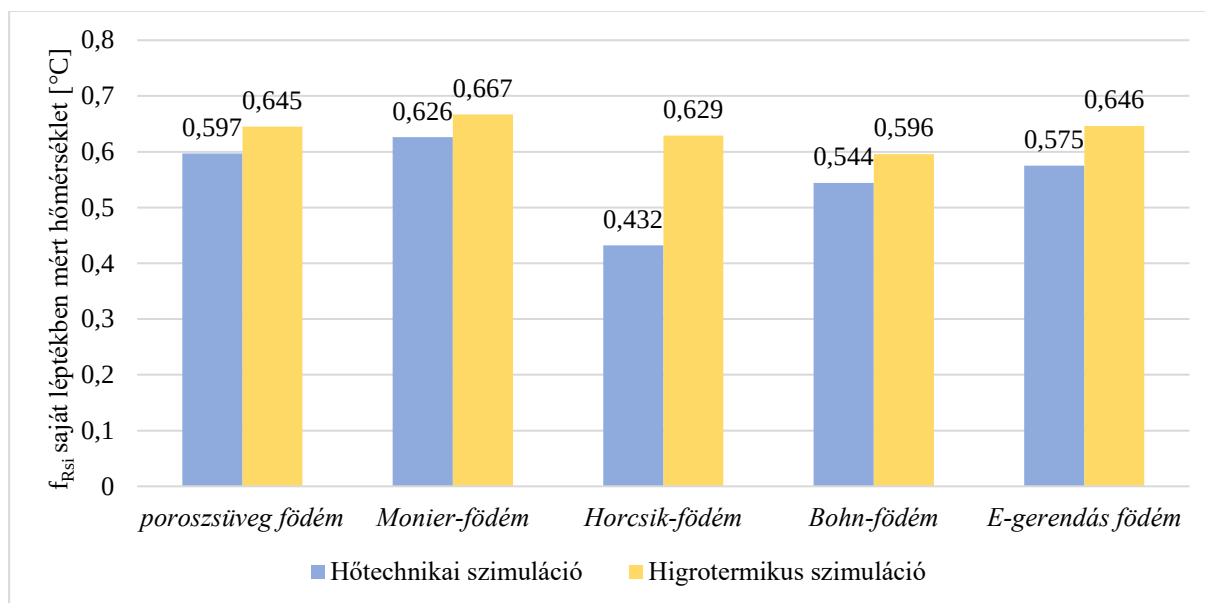


	poroszsüveg födém	Monier-födém	Horcsik-födém	Bohn-födém	E-gerendás födém
eltérés [%]	-40,3%	72,7%	16,7%	142,4%	60,2%

46. ábra: Hőtechnikai és higrotermikus szimulációk χ többlet hőveszteségeinek összehasonlítása

A többlet hőveszteségek esetében a poroszsüveg födémén kívül minden esetben nagyobbra adódnak higrotermikus szimulációk esetében. A poroszsüveg födémnél viszont negatív értékeket kapunk mindkét szimuláció esetében, ez azt jelenti, hogy tulajdonképpen a falsarok többlet hővesztesége elhanyagolható, a hőveszteség a fal-födém csatlakozási hosszain keletkezik. A Monier- és Bohn-födémek esetében olyan kis pontbeli hőátbocsátási tényezők keletkeznek, hogy ezekben az esetekben nem feltétlenül szükséges 3D-s szimulációt végezni a csomóponti hőveszteségek meghatározásához. Ellenben a Horcsik- és az E-gerendás födémeknél jóval nagyobb többlet hőveszteségek keletkeznek a csomópontban, ezek a födém típusok koszorúval kerültek kialakításra, így a nagy eltérés az anyagok hővezetési tényezőiben is hozzájárul a nagyobb hőveszteségek kialakulásához. A 46. ábra alapján látható, hogy a szimulációk közti eltérés 72,7% a Monier-födém esetében és 142,4% Bohn-födém esetében, viszont ekkor elhanyagolhatóan kicsi hőveszteségekről beszélhetünk, így érdekesebb az E-gerendás födémhez tartozó 60,2%-ot mértékadónak tekinteni. Alapvetően elmondható, hogy a pontosabb eredmények érdekében érdekesebb higrotermikus szimulációt végezni a hőveszteségek meghatározásához, hiszen ekkor a valóságot jobban megközelítő értékeket kapunk a pontosabb anyagtulajdonságok figyelembevételé miatt.

– f_{Rsi} saját léptékben mért hőmérsékletek összehasonlítása



	poroszsüveg födém	Monier-födém	Horcsik-födém	Bohn-födém	E-gerendás födém
eltérés [%]	8,0%	6,5%	45,6%	9,6%	12,3%

47. ábra: Hőtechnikai és higrotermikus szimulációk f_{Rsi} saját léptékben mért hőmérsékleteinek összehasonlítása

A saját léptékben mért hőmérséklet meghatározására állagvédelmi okokból van szükség. A 47. ábrán látható eredmények alapján elmondható, hogy összes födém típus eredménye 0,7 alatti számot eredményez, ez azt jelenti, hogy a csomóponti kialakítások állagvédelmi szempontból nem megfelelők, penészesedés léphet fel. A poroszsüveg födém, a Horcsik- és az E-gerendás födém hőtechnikai szimulációjának eredménye pedig 0,6-nál is kisebb eredményt adott. A hőtechnikai szimulációk minden födém típus esetében kisebb értékeket eredményeznek, ami annak köszönhető, hogy ekkor a 2. és 4. táblázat értelmében jóval kisebb minimum hőmérsékletek adódnak a belső felületeken, mint HAM szimulációkor, valamint nagyobb a külső és belső felületek közötti hőmérsékletkülönbség is.

9. Összefoglalás

Dolgozatomban Comsol Multiphysics 5.6 végeselemes numerikus multifizikai szoftver segítségével végeztem hőtechnikai és higrotermikus szimulációkat a Magyarországon leginkább elterjedt 5 hagyományos fűdétípus fal-fűdém csomópontjaira, majd a szimulációs eredmények alapján meghatároztam a csomópontok többlet hőveszteségeit. Erre azért van nagy szükség, mert az építőiparban és az örökségvédelemben egyre nagyobb az igény olyan számítási módszerekre, amelyek képesek megbecsülni az épületek hosszútávú hő és nedvességtechnikai viselkedését. Erre egy jó megoldás lehet a csomóponti kialakítások higrotermikus szimulációja, azonban alkalmazása még nem széles körben elterjedt a szakmában. A kutatásomban született eredmények alátámasztják a kapcsolt hő-és nedvességtranszport szükségességét, hiszen látható, hogy sokkal pontosabb és részletesebb eredmény születtek, mint csak hőtechnikai szimulációk alkalmazásakor. Jellemzően olyan csomóponti kialakításakor lehet különösen fontos a higrotermikus szimulációk alkalmazása, amelyeknél sok különböző hőtechnikai tulajdonságú anyag található, valamint ahol ezek az anyagok nedvességre érzékenyek, ilyenkor az eredmények pontossága nagyban függ a bemenő adatok pontosságától is.

Fontos kiemelni, hogy a kutatás során az anyagtulajdonságok meghatározásakor osztrák adatbázist alkalmaztam, emiatt további kutatási lehetőség lehet magyarországi specifikus anyagtulajdonságok vizsgálata, valamint az anyagtulajdonságok laboratóriumi mérések során való meghatározása. A modellek pontosításával, a bemenő fizika bővítésével, mint például az üreges fűdémek esetében a légáramlás figyelembevételével, valamint több fűdétípus vizsgálatával még átfogóbb és egzaktabb eredmények kaphatók. A többlet hőveszteségek, valamint a saját léptékben mért hőmérsékletek minél pontosabb becslése nagyon fontos tényező az állagvédelmi vizsgálatoknál, valamint a felújítási változatok megtervezésénél. Ez nagy segítség lehet hazai viszonylatban, ugyanis főleg a budapesti, valamint a nagyvárosi épületállomány jelentős része a kutatásban is szereplő fűdétípusokból készült, amelyek már sok esetben 100-150 évesek és felújításra szorulnak. Ezért az MSc diplomamunkámban a kutatást folytatva és az eredményeket felhasználva felújítási opciókat dolgozok ki az egyes fűdétípusokra, valamint további kiértékelési módszerekkel elemzem a szimulációs eredményeket.

10. Irodalomjegyzék

- [1] L. Széll, *Magasépítéstan I.* Tankönyvkiadó, 1978.
- [2] A. Déry, *Öt könyv a régi építészetéről, 1-5. kötet.* Terc Kft, 2010.
- [3] Á. Pattantyús-Ábrahám, *Épületrehabilitáció, Tartószerkezetek helyreállítása, átépítése és megerősítése.* Terc Kft, 2013.
- [4] L. V. Teesdale, “Condensation in Walls and Attics,” *Am. Build. Build. Age*, p. 12, 1937.
- [5] H. Glaser, “Wärmeleitung und Feuchtigkeitsdurchgang durch Kühlraumisolierungen,” *Kältetechnik*, vol. 10, no. 3, pp. 86–91, 1958.
- [6] J. R. Philip and D. A. De Vries, ““Moisture movement in porous materials under temperature gradients,” *Trans. Am. Geophys. Union*, vol. 38, no. 2, pp. 222–232, 1957.
- [7] C. Rode, “Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions,” Technical University of Denmark (DTU), 1990.
- [8] H. M. Künzeli, “Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components One- and two-dimensional calculation using simple parameters,” 1995.
- [9] J. Grunewald, “Diffusiver und konvektiver Stoff- und Energie- transport in kapillarporösen Baustoffen,” Technische Universität Dresden, 1996.
- [10] C.-E. Hagendoft and T. Bomberg, ““1D-HAM Coupled Heat, Air and Moisture A.XXI Transport in Multi-layered Wall Structures,” 2000.
- [11] M. H. de Wit, “Heat, air and moisture in building envelopes,” 2009.
- [12] A. W. M. Van Schnijndel, “Integrated Heat Air and Moisture Modeling and Simulation,” Eindhoven University of Technology,” 2007.
- [13] H. L. S. C. Hens, “Combined heat, air, moisture modelling: A look back, how, of help?,” *Build. Environ.*, vol. 91, pp. 138–151, Sep. 2015, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2015.03.009.
- [14] B. Nagy, “Hygrothermal Behavior of Modern Masonry Building Constructions,” 2019.

- [15] L. Wang and H. Ge, “Effect of air leakage on the hygrothermal performance of highly insulated wood frame walls: Comparison of air leakage modelling methods,” *Build. Environ.*, vol. 123, pp. 363–377, 2017.
- [16] B. Nagy and E. Tóth, “Hygrothermal behaviour of hollow and filled ceramic masonry blocks,” *Int. RILEM Conf. Mater. Syst. Struct. Civ. Eng. 2016*, vol. 112, pp. 279–288, 2016.
- [17] J. Sýkora, M. Šejnoha, and J. Šejnoha, “Homogenization of coupled heat and moisture transport in masonry structures including interfaces,” *Appl. Math. Comput.*, vol. 219, no. 13, pp. 7275–7285, 2013.
- [18] J. Sýkora, J. Vorel, T. Krejčí, M. Šejnoha, and J. Šejnoha, “Analysis of coupled heat and moisture transfer in masonry structures0,” *Mater. Struct.*, vol. 42, no. 8, pp. 1153–1167, 2009.
- [19] P. Pihelo, M. Lelumees, and T. Kalamees, “Influence of Moisture Dry-out on Hygrothermal Performance of Prefabricated Modular Renovation Elements,” *Energy Procedia*, vol. 96, pp. 745–755, 2016.
- [20] M. Ibrahim, E. Wurtz, P. H. Biwole, P. Achard, and H. Sallee, “Hygrothermal performance of exterior walls covered with aerogel-based insulating rendering,” *Energy Build.*, vol. 132, pp. 241–251, 2014.
- [21] T. Colinart, D. Lelievre, and P. Glouannec, ““Experimental and numerical analysis of the transient hygrothermal behavior of multilayered hemp concrete wall,” *Energy Build.*, vol. 112, pp. 1–11, 2016.
- [22] R. McClung, H. Ge, J. Straube, and J. Wang, “Hygrothermal performance of crosslaminated timber wall assemblies with built-in moisture: field measurements and simulations,” *Energy Build.*, vol. 71, pp. 95–110, 2014.
- [23] P. Pihelo, H. Kikkas, and T. Kalamees, “Hygrothermal Performance of Highly Insulated Timber-frame External Wall,” *Energy Procedia*, vol. 96, pp. 685–695, 2016.
- [24] V. Vitiello, R. Castelluccio, and M. Del Rio Merino, “Experimental research to evaluate

- the percentage change of thermal and mechanical performances of bricks in historical buildings due to moisture,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 244, May 2020, doi: 10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118107.
- [25] P. Šťastný, J. Gašparík, and O. Makýš, “Analysis of moisture and salinity of historical constructions before and after the application of REMEDIATIONS,” *J. Build. Eng.*, vol. 41, p. 102785, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.JOBE.2021.102785.
- [26] V. Cabrera, R. López-Vizcaíno, Á. Yustres, M. Á. Ruiz, E. Torrero, and V. Navarro, “A functional structure for state functions of moisture transfer in heritage building elements,” *J. Build. Eng.*, vol. 29, p. 101201, May 2020, doi: 10.1016/J.JOBE.2020.101201.
- [27] K. Abahri, R. Belarbi, and A. Trabelsi, “Contribution to analytical and numerical study of combined heat and moisture transfers in porous building materials,” *Build. Environ.*, vol. 46, no. 7, pp. 1354–1360, Jul. 2011, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2010.12.020.
- [28] M. Bianchi Janetti, F. Ochs, and R. Pfluger, “Coupling Forced Convection in Air Gaps with Heat and Moisture Transfer inside Constructions.”
- [29] M. Bianchi Janetti, F. Ochs, and W. Feist, “3D Simulation of Heat and Moisture Diffusion in Constructions.”
- [30] B. Nagy and C. Tömböly, “Hygrothermal Analysis of Window Construcion Joints,” *Zb. Rad. Građevinskog Fak.*, vol. 34, pp. 91–100, 2018.
- [31] B. Nagy, “Designing insulation filled masonry blocks against hygrothermal deterioration,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 103, pp. 144–157, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.05.005.
- [32] Magyar Szabvány, “MSZ EN 24140:2015, Épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számításai,” 2015.
- [33] Hungarian Standard Institute, “MSZ EN ISO 13788 Épületszerkezetek és épületelemek hő- és nedvességtechnikai viselkedése. A kritikus felületi nedvességet és a szerkezeten belüli páralecsapódást megelőző belső felületi hőmérséklet. Számítási módszerek.” .

- [34] Hungarian Standard Institute, “MSZ EN 15026:2007, Hygrothermal performance of building components and building elements. Assessment of moisture transfer by numerical simulation,” 2007.
- [35] COMSOL, “Comsol Multiphysics 5.6 [computer program].” Accessed: Sep. 01, 2021. [Online]. Available: Comsol Multiphysics 5.6 [computer program].
- [36] B. Nagy and E. Paulik, “Vasbeton szerkezetek hővezetési tulajdonságai,” *Műszaki Ellenőr Mag.*, 2016.
- [37] MSZ EN ISO 10211:2017, “Hőhidak az épületszerkezetekben. Hőáramok és felületi hőmérsékletek. Részletes számítások,” *Hungarian Stand. Inst.*, 2019.
- [38] 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.
- [39] Fraunhofer IBP, “WUFI PRO 6.6 [computer program].” Accessed: Oct. 24, 2022. [Online]. Available: <https://wufi.de/en/2022/06/29/release-wufi-pro-6-6-and-wufi-2d-4-4/>.
- [40] H. Künzle (Fraunhofer IBP) *et al.*, “prEN 15026:2007, Hygrothermal performance of building components and building elements. Assessment of moisture transfer by numerical simulation.” 2022.
- [41] ComsolMultiphysics, “Heat Transfer Module,” *Manual*. pp. 1–222, 2015.
- [42] M. H. Spitzner, “Neue DIN 4108-2 – „Mindestanforderungen an den Wärmeschutz“, Änderungen beim Anwendungsbereich, Mindestwärmeschutz und Wärmebrücken ,” 2013.