



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

Magastetők energetikai felújítása során előforduló építési hibák numerikus szimulációval történő vizsgálata

TDK

Pásztélyi Boldizsár

Konzulens: Dr. Nagy Balázs

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Építőmérnöki kar

Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

2019

Tartalom

1. Összefoglaló	2
2. Bevezetés	4
3. Anyagok és módszerek	12
3.1. Anyagok	12
3.2. Módszertan	15
4. Végeelem háló vizsgálata	20
5. Felújítási esetek	25
5.1. Hőtechnikai szimuláció és a kapcsolt hő- és nedvességtranszport szimuláció összehasonlítása.....	25
5.2. Kiindulási állapot – szigetetlen tetőszerkezet (v0)	26
5.3. Kőzetgyapot hőszigetelés a szarufák között (v1)	28
5.4. Kőzetgyapot hőszigetelés a szarufák között kiegészítő belsőoldali hőszigeteléssel (v2)	29
5.5. PIR hab szigetelés a szarufák felett (v3)	30
5.6. Kőzetgyapot hőszigetelés a szarufák között és PIR hab szigetelés a szarufák felett (v4)	31
5.7. Összehasonlítás.....	32
6. Építési hibák.....	33
6.1. Hőszigetelés hézagos beépítése	34
6.2. Gyengébb minőségű hőszigetelés alkalmazása	40
6.3. Gyengébb minőségű fóliák használata.....	45
6.4. Kombinált esetek	48
7. Összegzés	56
8. Köszönetnyilvánítás.....	57
9. Irodalomjegyzék	58

1. Összefoglaló

A magastető jellegzetes építészeti formaképző elem, amely gondoskodik a csapadékvíz lehető leggyorsabb levezetéséről és az épület lefedését szolgálja. A hagyományos magastető szerkezetek alapvetően három fő részből állnak. A fedélszékből, a héjazattartó elemekből, és a héjazatból, ami a tulajdonképpeni térelhatároló szerepet tölti be.

Napjainkban egyre több tetőtérbeépítés történik, mely során az addig a fűtött téren kívül eső padlásrészt, lakótérre alakítják át. Ezen felújítások illetve átépítések egyik legfontosabb eleme a tetőszerkezet hő- és páratechnikai szigetelése.

Dolgozatomban a magastetők szigetelésekor különböző építési hibákból (gyengébb minőségű hőszigetelő anyag használata, rosszul beépített hőszigetelés, gyengébb minőségű fólia) adódó épületenergetikai veszteségeket vizsgáltam, és hasonlítottam össze egymással. Több modellt készítettem a meglévő, illetve a helyesen felújított szerkezetekről, és ezeket hasonlítottam össze az építési hibákkal kivitelezett modellekkel.

A vizsgálatok során készítettem egy hőtechnikai szimulációt, és egy hő- és nedvességtechnikai szimulációt. A végén a kapott eredményeket összehasonlítottam.

A kutatás rámutathat, hogy az építés során egy kis odafigyelés és jobb anyag használat a későbbiekben milyen gyorsan megtérül ezekben az esetekben.

Abstract

The high rooftop is a typical structural form constituting element, which takes care of the fastest way of the drainflow and serves as covering for the building. The traditional high rooftop structures are made of three main parts: the untrussed, the roofage-holder and the roofage itself, which has basically the role of the space-delimiter.

Nowadays there are more and more rooftop-build in, in which they the so far as a loft-functioning space, that has had no heating before, to livingspace reshape. One of the most important part of these reshaping is the heat- and vapourtechnique isolation of the rooftop structure.

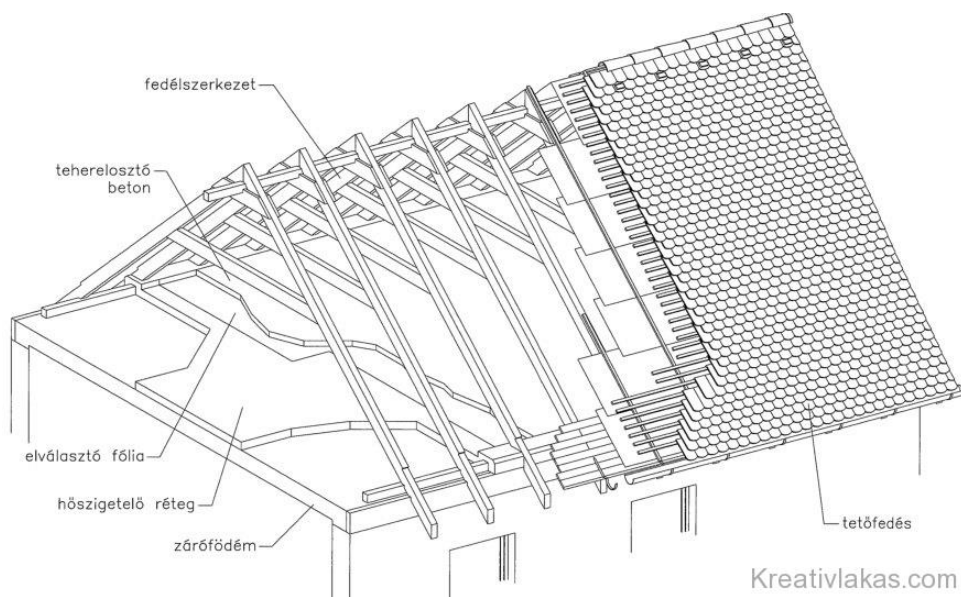
This study is examining the from the various structural errors implied construction-energetical losses occurring during the isolation of high rooftops (the use of low-quality heat isolation material, badly built-in heat isolation, low-quality foil) and comparing them to each other. There are several constructed models of the “current” and the right reshaped structures and they are compared to the with structural errors implemented models.

During the examinations I prepared a heat-technical simulation and a heat- and vapourtechnical simulation. At the end of the simulations I compared the results to each other.

The research shows well, that attentiveness and better material use during the building-phase will produce better results, and what is more it will get a payback quite fast in these cases.

2. Bevezetés

Európa szerte az elmúlt évezredben legerjedtebb és legmeghatározóbb épülettípusok a magas tetős házak voltak. Ennek ellenére mégis azt kell mondjuk, hogy a tetőtér beépítés tipikusan a XX. század találmánya. A régebbi időkben jellemzően ezek az épületek kéthéjű hidegtetővel készültek, és az így keletkező helyet legfőképpen tárolásra használták. A hagyományos magastetők alapvetően két fő részből állnak, a fedélszerkezetből és a tetőfedésből. [1]



1. ábra: Magastető részei [2]

Fedélszerkezet: a magastető teherhordó váza, mely viseli és továbbítja a terheket a koszorúra, a födémre, a falakra és a gerendákra. Ez határozza meg a tető formáját. A fedél- vagy tetőszerkezeteket önsúlyra, hóteherre, szélnyomásra, szélszívásra és az építést vagy javítást végző emberek súlyára kell méretezni. [2]

Leggyakrabban alkalmazott hagyományos fedélszékek:

Ebbe a csoportba soroljuk a legrégebbi idők óta épített fa fedélszerkezeteket, amelyeknek már annyira ismertek a szerkesztési elvei, csomóponti megoldásai, típusai és építési módjai, hogy a gyakorlott ácsok külön tervek nélkül is megfelelően elkészítik őket.

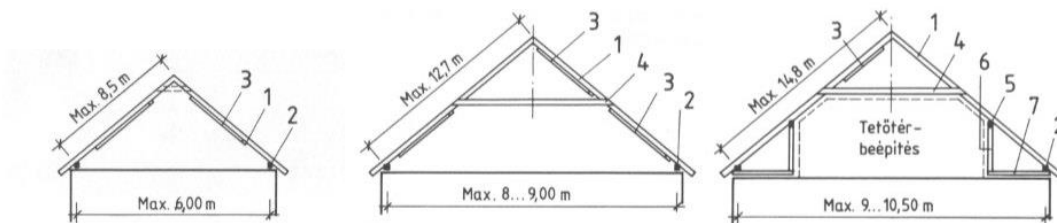
Az üres fedélszék szerkezeti elemei a szarufa, a szelemenek, a kötőgerenda, a cserépléc és a hosszirányú merevítést szolgáló viharléc. Közbenső alátámasztás nélküli, alul a talpszelemenekre támaszkodó, szarufapárokából álló, hosszirányban vihardeszkával merevített fedélszerkezet. Az ilyen típusú fedélszékeknel a legegyszerűbb a tetőtér beépítés megoldása. A

szarufák hossza, keresztmetszetüktől függően, maximum 3-4 m, a fedett fesztávolság pedig 6 m.

Az üres fedélszéknél nagyobb fesztávolság lefedésére alkalmas a torokgerendás fedélszék. A fedélszék torokgerendája két féle képpen kapcsolódhat a szarufához, hagyományos fakötéssel vagy szegezett kötéssel. A fedélszék hosszirányú merevítését ez esetben is viharlécekkal biztosítják.

A torokgerendás fedélszék általában 8-10 m falnyílás alátámasztására alkalmas, ami nagyobb fesztávolságokat jelent mint az üres fedélszék esetében. A torokgerenda csatlakozási pontja a hajlításra is igénybe vett szarufákhoz középen lenne, azonban ez nagy mértékben csökkentené a kihasználható tér alkalmazását a későbbi beépítések kapcsán, illetve beépítetlen esetben is igen zavaró lenne, így ezt a felső harmadban szokták elhelyezni.

A szelemenés fa fedélszék olyan fedélszerkezetek, amelynek a szarufáit szelemenek támasztják alá. Mivel ezzel nagyobb fesztávolság fedhető le, így a torokgerendás fedélszerkezeteknél alkalmazzák. Mivel a szelemeneket alátámasztó szerkezetek az épület földemjére támaszkodnak, a szarufák a szelemenek felett toldhatók is. A lefedhető fesztáv (a talpszelemenek távolsága) nagyobb, mint az egyszerű torokgerendás fedélszerkezetek esetében, akár 9-10,5 m is lehet.



2. ábra: Fedélszék kialakítása [3]

Állószékes fedélszék, amelyben a szarufákat alátámasztó szelemeneket állószék vagy állószékek támasztják alá. Ez utóbbiak számától függően megkülönböztetünk egy állószékes (gerinc alatt állószékekkel alátámasztott szelemenés), két állószékes (két állószékekkel alátámasztott szelemenés), három állószékes fedélszerkezetet. Az ilyen jellegű fedélszék utólagos tetőtéri beépítése elég nehézkes a szarufákat alátámasztó oszlopok miatt.

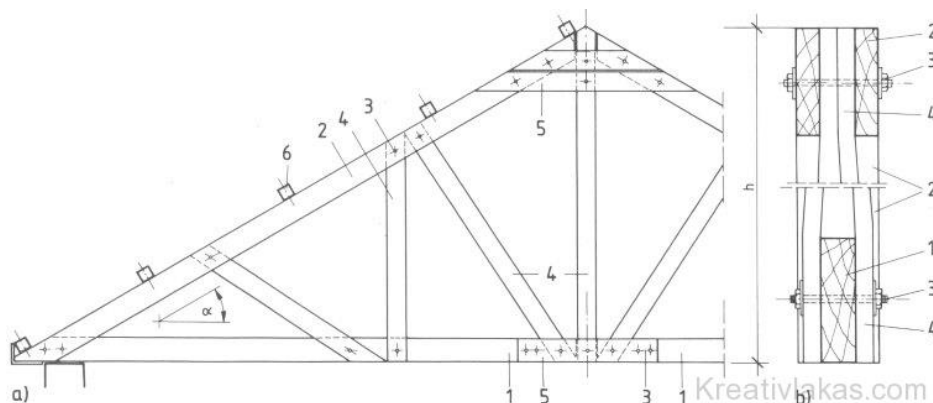
Ezen kívül még sok hagyományos fedélszék típus létezik, most a teljesség igénye nélkül csak a legelterjedtebbeket és a leggyakrabban előfordulókat említettem meg.

Korszerű fedélszerkezetek

A korszerű fa fedélszerkezetek kialakítása, felépítése és kapcsolatai jelentősen eltérnek az eddig ismertetett hagyományos fedélszékekétől, azonban működésük nagyon hasonló. Mérnöki fedélszékeknek is szokás nevezni őket, mivel gondos méretezés és számítások alapján tervezik meg ezeket. Számos változatuk képzelhető el.

Szegezett kapcsolású fedélszerkezetek: Normál huzalszegekkel kialakított csatlakozások deszka méretű elemekből építve. A szegezett kapcsolatoknak két típusa van: szimmetrikus a kapcsolat, ha a szegezés három elemet fog össze (a szeg kettős nyírásra van igénybe véve), aszimmetrikus, ha csak két elemet köt össze (a szeg egyszeri nyírásra van igénybe véve).

Csavarozott kapcsolású fedélszerkezetek: általában rácsos kialakítású tartók, melyeket csavarozással kapcsolnak egymáshoz. A tartók legtöbb esetben szimmetrikus kialakításúak. A csavaros kötéseket minden esetben kétszeres nyírásra kell méretezni. A komolyabb kötésekhez sok esetben a csavaros kötésen kívül különleges kialakítású belső tárcsákat alkalmaznak, melyek lehetnek simák vagy fogazottak.



3. ábra: Korszerű fedélszék [3]

Kapcsolóelemes fedélszerkezetek: olyan rácsos szerkezetű fedélszék, mely azonos síkban összeépített elemekből áll és a kötési pontokat acél elemekkel rögzítik egymáshoz. [3],[4]

A fedélszékekhez leggyakrabban alkalmazott faanyagok:

- Lucfenyő
- Erdei- (borovi-) fenyő
- Jegenyefenyő
- Vörös fenyő
- Fekete fenyő

Tetőfedés:

A külső többrétegű szerkezet, mely gondoskodik a csapadék és az egyéb külső hatásoktól való védelemről. A tetőfedések célja, hogy az épületre hulló csapadékot (eső, hó, jég) az épület belsejétől távolartsa. Másrészt a tetőfedésnek (másnéven tetőhéjalásnak) az is nagyon fontos feladata, hogy a csapadékot megfelelően és gyorsan elvezesse. Egyre több belső hatás éri a tetőszerkezeteinket és ehhez a tetőfedéseknek is alkalmazkodniuk kellett az évek alatt. Hazánkban egyre gyakoribbak a tetőtérbeépítések és ezen terek lakás célú felhasználása. Ezek azonban nem egyszerű padlásszobák, hanem komfortosan kialakított, fürdőszobával, konyhával rendelkező felújításokra vagy beépítésekre kell gondolni. Ezekben az esetekben szükségessé válhat a teljes vízhatlanság biztosítása, már nem elegendő a sima pikkelyes fedésekkel szemben támasztott elvárások egy ilyen jellegű szerkezetnél. Egyre jelentősebb szerepet kapnak a hőszigeteléssel és páratechnikával kapcsolatos akadályok legyőzése. Egyre nagyobb az igény a megfelelő hőszigetelés kialakítására, azonban a héjalás alá kerülő szigetelést meg kell védeni a nagymennyiségű belső oldali párától és lehetővé kell tenni a réteg átszellőztetését is. Védelmet kell nyújtani a külső oldali csapóeső és porhó káros hatásai ellen is. A hőtechnikai követelmények évről évre egyre szigorúbbak az épületszerkezetekre és így a magastetőkre is.

A tető hajlásszögétől nagymértékben függ a tetőfedéshez alkalmazható építőelemek anyaga. Ez azért van mert például egy porózus szerkezetű cserépfedés esetén az anyag könnyebben átnedvesedik, így a csapadékot gyorsabban el kell vezetni. Egyszerűen belátható, hogy minél kisebb a hajlásszög a tetőnek annál biztonságosabb csatlakozású, vízzáróbb anyagú és nagyobb összefüggő felületű héjalás alkalmazása szükséges.

A lejtés, ill. hajlásszög alapján megkülönböztetünk:

- lapostetőket 8 % (5)
- kishajlású tetőket 8 – 16%
- közepes hajlású tetőket 16 – 45%
- meredek hajlású tetőket 45%

Magastetők tetőfedése a fedési forma szerint többféle lehet:

- *pikkelyes fedés*: Sok illesztési hézag jellemzi, kisebb elemekből készül, és meredekebb kialakítású (pl. cserépfedések, palafedés, zsindelyfedés stb.)

- *táblás fedés*: Megnövelt méretű sík, bordázott vagy hullámos elemekből általában szelemenekre készítik. Kevés hézag, viszont durvább felület jellemzi (pl. eternit hullámlemez fedés, acél trapézlemez fedés, bitumenes hullámlemez fedés, alumínium bordás vagy hullámos lemeztáblákkal való fedés). Kisebb hajlásúak általában, mint a pikkelyes fedések.

- *összefüggő kemény vagy lágy lemezfedések*: Ezek a fedések körülbelül 8-15% lejtésű tetőkhöz készülnek, ami egy átmenetnek mondható a lapostetők és a magastetők között, azonban egyes változataik alkalmazhatóak rendes magastetőknél is. Ide tartoznak a hézagmentes ragasztott fedéllemezfedések, a léces lemezfedés, a korcolt fémlemezfedések és a ritkábban alkalmazott speciális bevonat jellegű különleges fedések.

- *kévefedések*: A nád- és kéve fedések a régi népi jellegzetes és hagyományos tetőfedését jelentik. Ezek a fedések a legkevésbé vízzáróak az eddig említettek közül, anyaguk nád illetve szalma. Általában 40%-nál meredekebb hajlásszögű tetőknél alkalmazzák csak. [5]

A magastetők kialakítására napjainkban többféle lehetőség áll rendelkezésünkre. A legelterjedtebb az évezredes hagyományokra visszatekintő fa fedélszék alkalmazása. Leginkább azért használják, mert könnyű anyagokból készül, gyors és gyakorlatilag szerelt jelleggel készíthető a helyszínen. Hátránya, hogy Magyarországon nem bővelkedünk olyan nagy mennyiségben építési faanyagból. Emellett készülhet a tetőszerkezet acélból vagy vasbetonból (koporsófödém).

Régen a tetőterek mivel nem kerültek beépítésre így a hőszigetelésükről sem kellett gondoskodni. Azonban napjainkban egyre nagyobb számban kerülnek beépítésre ezek az épületrészek. A beépítés során rengeteg hőtechnikai kérdés merül fel, mivel ezek a szerkezetek könnyűek, kicsi a hőtárolási képességük, így a legjobban hőszigetelt tetők nyáron is gyorsan felmelegsznek, télen pedig gyorsan lehűlnek. Mivel a szerkezetbe kerülő szálal hőszigetelést nedvességvédelemmel kell ellátni, így a belső felületre párazáró fólia kerül, mely megakadályozza a természetes szellőzést, így a továbbiakban a megfelelő komfort eléréséhez szellőztetés szükséges.

A fa fedélszékek hőszigetelése a szarufákhoz viszonyítva több féle is lehet:

- szarufák közötti
- szarufák közötti és alatti
- szarufák feletti

Abban az esetben, ha a padlástér, vagy legalább annak egy részét, lakótérként szeretnénk kihasználni, a tető síkjában kell hőszigetelést elvégezni. Korábban szigetelés általában csak a szarufák közé került úgy, hogy a tetőfólia alatt átszellőztetett légrést hagytak. Azonban a hőszigetelésre vonatkozó igényeink növekednek, és mindeközben a szigeteléssel járó költségeket nem akarjuk hasonló mértékben növelni. A megnövekedett komfortérzet, az alacsonyabb fűtési számlák nehezen cáfolható érvet jelentenek, és egyre fontosabbá válik az is, hogy az új szigetelések csak a legkisebb mértékben befolyásolják a hasznos belső tér méretét. A magastetők szerkezetének hőtechnikai tervezésekor figyelembe kell venni a hőszigetelés típusát, a tető lejtését, a szarufa szerkezeti mélységét, méretét, anyagát, valamint a beltéri párazáró, párafékező fólia és a külső tetőfólia típusát, elhelyezkedését. [6]

Manapság az egyre szigorodó energetikai szabályozások miatt mely a tetőre $U = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ hőátbocsátási tényezőt határoz meg [7], nem is elegendő a szimplán csak a szarufák közötti hőszigetelés, hanem majdnem minden esetben szükséges a kiegészítő hőszigetelés is!

Egyre gyakrabban alkalmazott megoldás Magyarországon, hogy a belső oldalon kiegészítő hőszigetelést építenek a belső burkolatot tartó vázelemek közé. Ezzel a megoldással a szarufák hőhíd szerepét jelentősen csökkentjük, mivel a szarufa hővezetési tényezője jóval magasabb a közetgyapoténál. Ugyanakkor általában nem is elégséges, ha csak a szarufák közötti teret töltjük ki hőszigeteléssel, mivel a szarufák magassága nem biztosít teret a megfelelő vastagságú szigetelés kialakításához, amely megfelelné a kívánt energetikai követelményeknek.

A szigetelés a belső oldalon azonban csak úgy növelhető, ha ezzel a belső teret csökkentjük, ez a hátránya ennek a megoldási módszernek. Nagyon fontos és egyre nagyobb szerepet kap hazánkban is a tűzvédelem. A szigeteléseknek és ezzel együtt a teljes rétegrendi felépítésnek nem csak energetikai szempontból kell megfelelniük az előírásoknak, hanem tűzvédelmi szempontból is.

A technológiák fejlődésével egyre jobb minőségű szigetelőanyagokat készítenek a gyártók. Vannak már kasírozott hőszigetelő táblák is melyeknek belső oldalán párazáró fólia van elhelyezve, ezeket csak fel kell helyezni, mint kiegészítő hőszigetelés és az illesztéseket megfelelően lezárni. De alkalmazhatunk sima kasírozatlan táblákat is, ebben az esetben gondoskodnunk kell a párazáró fólia elhelyezéséről. Ha a kiegészítő hőszigetelés csupasz, a párafékező fólia a belső burkolat alá, a hőszigetelés belső oldalára kerülhet, és ebben az esetben elektromos kábelt csak közvetlenül a belső burkolat mögött, a párafékező réteg előtt szabad vezetni, süllyesztett kapcsolók, dugaszoló aljzatok helyett falra szerelt kivitelűeket kell

alkalmazni. Nagyon oda kell figyelni a beépítés során, hogy a párazáró fólia sértetlen maradjon és felületfolytonos, mert egyébként funkcióját veszti. [8]



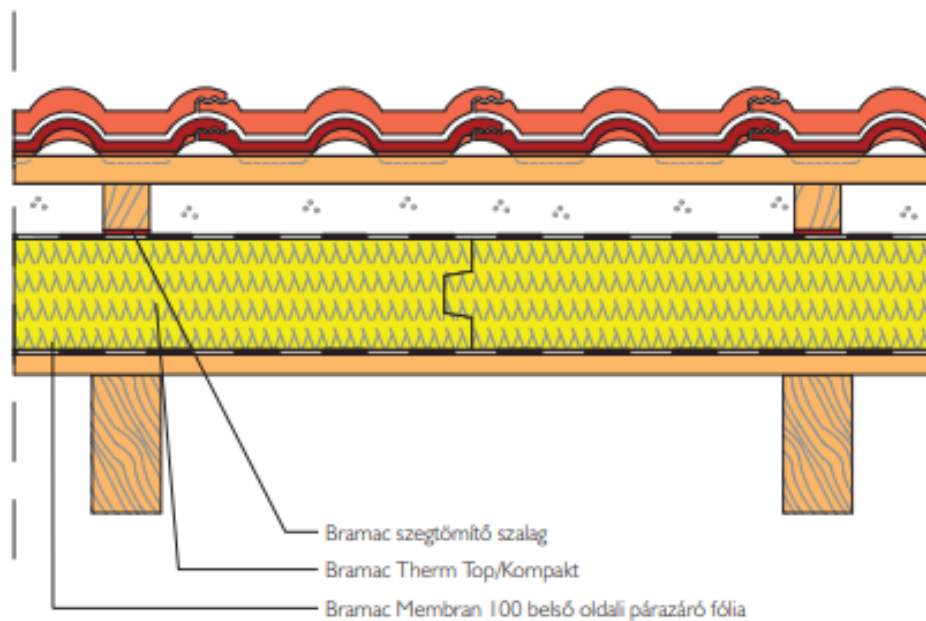
4. ábra: Hőszigetelés kialakítása [9]

Manapság, még ritkán alkalmazott megoldás Magyarországon, de várható, hogy vitathatatlan előnyeinek köszönhetően meg fog nőni az érdeklődés iránta a következő években. A hőszigetelés a szarufák fölé kerül elhelyezésre, még hozzá úgy, hogy a szarufák tetejére egy teherelosztó aljzat kerül kialakításra, mely önmagában a tetőtér belső felületét is képezi. Erre kerül a belső párafékező fólia, majd rá a hőszigetelés.

A hőszigetelésnek lépésállónak kell lennie, mivel a héjalás, a hó és a szél terhei, a beépítés során a kivitelezők súlya rajta keresztül adódik át a szaruzatra. Ennek anyaga lehet PIR/PUR hab, vagy kőzetgyapot tábla is. Ezeknek a lépésálló hőszigeteléseknek ára meglehetősen drágább, azonban előnyei vitathatatlanok:

- gyakorlatilag tetszőleges lehet a hőszigetelés vastagsága, a szarufák vastagságától függetlenül;
- a szarufák, mint hőhidak nem rontják a tető hőszigetelő képességét;
- a hőszigetelés beépítéséhez kevesebb szabásra van szükség, mint a szarufák között, ami különösen a bonyolult, sok kötőgerendát, fogópárt tartalmazó fedélszék esetében nem elhanyagolandó szempont;

- a szarufáknál nagyobb vastagságú hőszigetelés nem vesz el a belső térből;
- a teljes fedélszék megmutatható belülről. [10]



5. ábra: Szarufák fölötti szigetelés kialakítása (metszet) [11]

Dolgozatomban 4 fajta felújítási változatot vizsgáltam a fent említett lehetőségek közül. A kiindulási szerkezetem egy egyszerű beépítettlen tetőtér rétegrendje volt 5x20 cm-es szarufákkal, melyeket 80 cm-es közzel helyeztek el. A továbbiakban erre az esetre v0v-ként fogok hivatkozni.

Az első felújítási változat (v1) során csak a szarufák közé került kőzetgyapot hőszigetelés, a második változatban (v2) ezt kiegészítettem egy 5 cm-es lécváz közé szerelt belsőoldali hőszigeteléssel. A harmadik változat (v3) esetében a szarufák felett helyeztem el egy keményhab hőszigetelést, míg a negyedik változatban (v4) egy kombinációt vizsgáltam, mely esetben a szarufák közé kőzetgyapot hőszigetelés kerül és ezt egy keményhab szigetelés egészíti ki a külső oldalon.

3. Anyagok és módszerek

3.1. Anyagok

A dolgozatomban felhasznált anyagok tulajdonságait termékkatalógusokból, az MSZ EN ISO 10456:2008 szabványból [12] illetve a WUFI Light 6.3 szimulációs program adatbázisából [13] határoztam meg.

Lucfenyő

1. táblázat: Lucfenyő anyagtulajdonságai

Hővezetési tényező [W/(m*K)]	k
Nedvességtárolási képesség [kg/m ³]	wc
Testsűrűség [kg/m ³]	600
Fajlagos hőkapacitás [J/(kg*K)]	2000
Páradiffúziós ellenállási szám [1]	132.62
Folyadéktranszport tényező [m ² /s]	dw



6. ábra: Lucfenyő [14]

A k, wc, a iterációs függvények a következők alapján:

t	f(t)
0	0.16
1	0.2663474

ábra 7. k függvényhez tartozó táblázat [13]

t	f(t)
0	0
0.3	32.32
0.5	44.16664
0.7	61.11311
0.8	72.09409
0.9	85.61813
0.95	94.4896
0.99	106.0976
0.9945748	108.7907
0.9969455	110.8335
0.9982812	112.5268
0.9989152	113.6847
0.9992319	114.4591
0.9993898	114.9365
0.9994561	115.1646
0.9995153	115.386
0.999568	116.0128
0.9996941	116.2102
0.999807	116.9476
0.9998915	117.7667
0.9999515	118.7562
0.9999878	120.1281
1	121.8685

8. ábra: wc függvényhez tartozó táblázat [13]

t	f(t)
0.9	6.77807E-11
0.95	6.86803E-11
0.99	6.63625E-11
0.9945748	6.65647E-11
0.9969455	6.53118E-11
0.9982812	6.52486E-11
0.9989152	6.53573E-11
0.9992319	6.5509E-11
0.9993898	6.56361E-11
0.9994561	6.5706E-11
0.9995153	6.57796E-11
0.999568	6.6019E-11
0.9996941	6.61038E-11
0.999807	6.64598E-11
0.9998915	6.69253E-11
0.9999515	6.75769E-11
0.9999878	6.86129E-11
1	7.00759E-11

9. ábra: dw függvényhez tartozó táblázat [13]

Gipszkarton

2. táblázat: Gipszkarton anyagtulajdonságai

Hővezetési tényező [W/(m*K)]	0.2
Nedvességtárolási képesség [kg/m ³]	wc
Testsűrűség [kg/m ³]	625
Fajlagos hőkapacitás [J/(kg*K)]	850
Páradiffúziós ellenállási szám [1]	8.33
Folyadéktranszport tényező [m ² /s]	dw



10. ábra: Gipszkarton [15]

A wc egy iterációs függvények a következők alapján:

t	f(t)
0	0
0.35	3
0.5	4
0.7	4.5
0.8	5
0.9	8
0.95	11
1	25

11. ábra: wc függvényhez tartozó táblázat [13]

Kőzetgyapot – Deltarock

3. táblázat: Kőzetgyapot anyagtulajdonságai

Hővezetési tényező [W/(m*K)]	k
Nedvességtárolási képesség [kg/m ³]	wc
Testsűrűség [kg/m ³]	40
Fajlagos hőkapacitás [J/(kg*K)]	850
Páradiffúziós ellenállási szám [1]	1.3
Folyadéktranszport tényező [m ² /s]	dw



12. ábra: Deltarock kőzetgyapot hőszigetelés [16]

A szabadalmaztatott Deltarock éklemezek különösen alkalmasak a magastetők szarufák közötti hőszigeteléséhez. Az éklemezek sarkainak levágásával bármilyen 50 és 100 cm közötti szarufaköz-távolság gazdaságosan kitölthető.

Rögzítést nem igényel. Célszerű felette szélzáró, páraáteresztő tetőfólia alkalmazása a teljes szarufamagasság szigetelőanyaggal történő kitöltése mellett, ügyelve a belső oldali felületfolytonos párazáró réteg kialakítására. [16]

$$k = 0.037 * \exp(0.0046 * (T - 238.15[\text{K}])) * \exp(4 * (wc(\phi) / 1000))$$

T	263.15	303.15
phi	0.5	1

13. ábra: k függvényhez tartozó táblázat [13]

t	f(t)
0	0
0.65	0.13
0.8	0.17
0.93	0.2
0.97	0.29
0.99	6.86
0.995	40.94
0.999	223.38
0.9995	233.26
0.9999	234.98
1	235

14. ábra: wc függvényhez tartozó táblázat [13]

PIR hab - Bramac Therm Kompakt

4. táblázat: PIR hab anyagtulajdonságai

Hővezetési tényező [W/(m*K)]	k
Nedvességtárolási képesség [kg/m ³]	wc
Testsűrűség [kg/m ³]	26.5
Fajlagos hőkapacitás [J/(kg*K)]	1470
Páradiffúziós ellenállási szám [1]	51.5
Folyadéktranszport tényező [m ² /s]	dw



15. ábra: Bramac Therm Kompakt [17]

A Bramac Therm Kompakt kiváló hőszigetelő tulajdonsággal rendelkező PUR/PIR alapanyagból készülő termék. Elhelyezése szarufák felett történik. Beépíthető akár önmagában vagy szarufa között elhelyezkedő egyéb hőszigetelés kiegészítéseként. Mindkét oldalon páraáteresztő kasírozással. Páraáteresztő tulajdonsága révén kifejezetten tetőfelújításokhoz ajánlott. [17]

$$k = 0.025 * \exp(0.0046 * (T - 238.15 [K])) * \exp(2.5 * (wc(\phi) / 1000))$$

Argument	Lower limit	Upper limit
T	263.15	303.15
phi	0.5	1

16. ábra: k függvényhez tartozó táblázat [13]

t	f(t)
0	0
0.1	0.02
0.5	0.2
0.8	0.76
0.9	1.64
0.97	4.82
0.99	9.72
0.999	17.49
1	19.17

17. ábra: wc függvényhez tartozó táblázat [13]

3.2. Módszertan

A dolgozatomban a Comsol Multiphysics 5.4-es szoftvert használtam a modellek elkészítéséhez. A program kifejezetten alkalmas épületszerkezeti elemek hő- és nedvességtranszport modellezésére.

Jelenleg szigorú szabványok vonatkoznak az épületeink energetikai teljesítőképességeire, azonban rétegrendjeinknek csak a hőátbocsátási tényezőnek kell megfelelniük. A nedvességtechnikai tervezéssel sokszor a tervezők nem is foglalkoznak, mivel sem az energetikai rendelet [18], sem pedig a tanúsítási rendelet [19]. Az épületek és az épületszerkezetek hőtechnikai számításáról szóló magyar szabvány [20] 4. fejezete a nedvességtechnikai és állagvédelmi számításokról szól. Ez igen jelentős problémát okoz, hiszen az energiahatékony valamint a közel nulla követelményeknek megfelelő épületek esetében ez kiemelkedően fontos lenne. A határoló szerkezetek károsodásmentes és valóban energiahatékony kialakítását csak az együttes hő- és nedvességtechnikai tervezés garantálja. Egyre többször merül fel az igény, hogy a csomópontokat valami egyszerű módszerrel nedvességtechnikai szempontból össze tudjuk hasonlítani. Egy ilyen összehasonlítás esetén nem csak a csomópontok hőhidainak (az épületszerkezeten belüli hőáramsűrűségváltozásoknak), hanem a nedvességhidak hatásának elemzésére is remek módot nyújtana és bemutatható lenne az épületszerkezeten belüli nedvességáramsűrűség változás is. [21]

Hőhidak

A hőhidak esetében a lokálisan megnövekedő hőveszteségek miatt, az adott zónában csökken a hőmérséklet. Sok esetben a relatív páratartalom emelkedése miatt, ami az alacsonyabb hőmérséklet következménye megnövekedhet a penészesedés veszélye. De mi is pontosan a hőhíd? A szerkezet azon része ahol a hőáramok eltérő viselkedést mutatnak a környező elemekhez képest, ahol a hőáramok gradiense megváltozik.

Hőhidak típusai:

- *geometriai hőhíd*: ahol az épületszerkezet geometriai formája vagy helyzete megváltozik
- *anyageredetű hőhíd*: ahol a szerkezet geometriája vagy formája nem változik, hanem a szerkezetet alkotó anyagokban történik változás
- *szerekezeti hőhíd*: ilyenek például a szerkezetekben kialakított áttörések, vagy szerkezetiileg kihagyott rések, ebben az esetben általában az előbb említett mind két jelenség fenn áll
- *periódikusan ismétlődő hőhidak*: egy szerkezetben jól megfigyelhető séma szerint ismétlődnek
- *konvektív hőhidak*: olyan szerkezeten belüli légmozgások, melyekre előre nem számítottunk [22]

Első lépésben elkészítettem a számítani kívánt rétegrendek 3 D-s modelljét AutoCad-ban. Ezek után ezeket a kész modelleket importáltam be a Comsol Multiphysics-be. A modellezés során legelőször beállítottam a futtatások végén lekérendő adatokat, így ezeket a későbbiekben minden modell esetében táblázatszerűen ki tudtam menteni a programból. Ezek után definiáltam a különböző anyagokat és megadtam ezeket a modellben. Az anyagtulajdonságokat gyártói katalógusokból, az MSZ EN ISO 10456: 2008 [12] szabványból illetve a WUFI Light 6.3 szimulációs program adatbázisából [13] határoztam meg.

A hőszigetelések hővezetési tényezőjét a fent említett szabvány alapján a következőképpen határoztam meg:

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

λ_2 hővezetési tényező tervezési érték

λ_1 szabványos, deklarált hővezetési tényező

- F_T hőmérséklet korrekciós tényezője
- F_m páratartalom korrekciós tényezője
- F_a öregedés korrekciós tényezője

A hőmérséklet korrekciós tényezőjének meghatározása:

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

- f_T hőmérséklet – konverziós együttható (táblázatból határozható meg)
- $(T_2 - T_1)$ a tényleges és a deklarált hőmérsékletek különbsége

A páratartalom korrekciós tényező meghatározása:

$$F_m = e^{f_T \cdot (\psi_2 - \psi_1)} \quad (3)$$

- f_T térfogatarán szerinti pára-konverziós együttható (táblázatból határozható meg)
- ψ_1 a deklarált szituáció térfogatarány szerinti nedvességtartalma
- ψ_2 a tervezett beépítési szituáció térfogatarány szerinti nedvességtartalma

[12], [23]

Az anyagtulajdonságok beállítása után megadtam a külső és a belső felületre vonatkozó peremfeltételeket. A megadásnál figyelembe vettem, hogy a külső oldalon elhelyezésre kerül egy páraáteresztő fólia. A peremfeltételek megadása után a nedvességtranszportnál létrehoztam egy párazáró fóliát mely a belső oldalra kerül elhelyezésre. A peremfeltételeknél a külső és belső hőmérsékletet és relatív nedvességtartalmat az MSZ 24140:2015 alapján [18] adtam meg miszerint:

- Külső hőmérséklet: -2 °C
- Külső relatív nedvességtartalom: 0,9
- Belső hőmérséklet: 20°C
- Külső relatív nedvességtartalom: 0,5

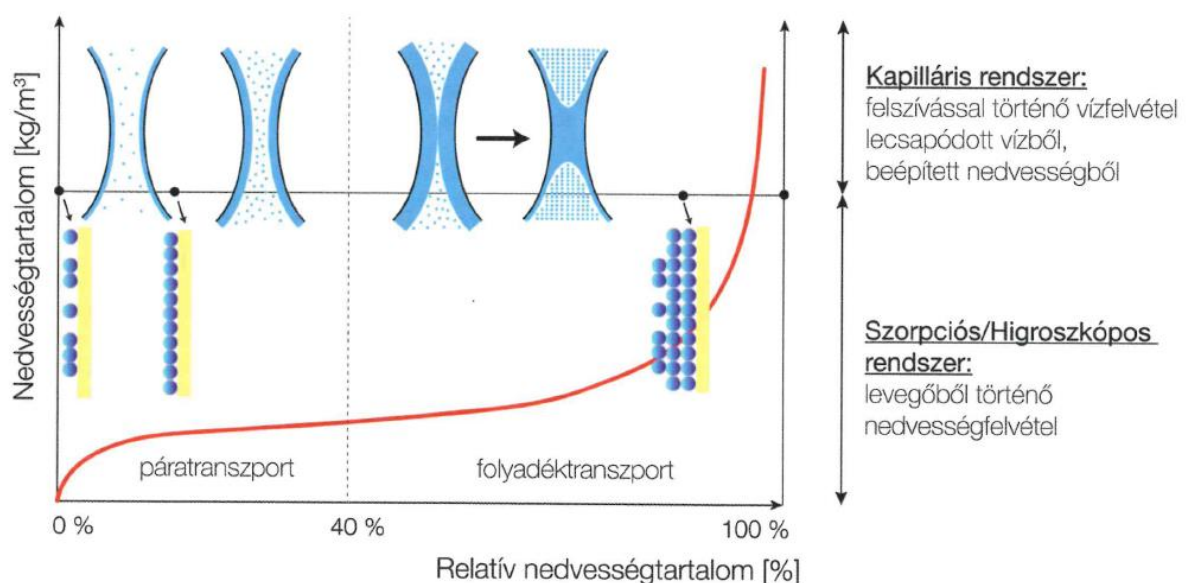
A peremfeltételekhez szabványos hőátadási és nedvességátadási tényezőket alkalmaztunk.

A számításaimat legelőször csak a hőtranszport modellezésével kezdem, hogy az egyes rétegrendjeim megfelelnek e a 7/2006 TNM rendeletben meghatározott $U = 0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ hőátbocsátási tényezőnek. [18]

Ezek után a többi modellt minden esetben már kapcsolt hő és nedvességtranszport figyelembevételével futtatam le.

Higrotermikus terhelések hő- és nedvességtranszport alapjai

Egy beépített tetőtér esetében a szerkezet a belső oldalról nagymértékű higrotermikus terhelést szenved, így a vizsgálatok során semmiképpen nem szabad eltekintünk a nedvesség hatásainak vizsgálatától. Egy átlagos lakásban akár 10 liter víz is elpárologhat naponta, ezt a vízmennyiséget valamilyen módon el kell vezetni. Mivel a szerkezetünkben a belső oldalon párazáró fóliást helyezünk el így nagyon fontos szerepet kap a szellőztetés ebben az esetben. Nagyon sok felületnek megvan az a tulajdonsága, hogy a vízpára-molekulával érintkezve megkösse a vízmolekulákat. Az ilyen anyagokat hidrofilnek nevezzük, a folyamatot pedig adszorpciónak.



18. ábra: Szorpciós izoterma [24]

Amikor az anyag minden nedvességet adszorbeált, akkor az anyag a porusokban és az azokat összekötő kapillárisokban illetve az anyagon belüli repedésekben képes tárolni. Az anyag nem képes több nedvesség felvételére onnantól kezdve, hogy kapillárisai telítődnek. [24]

Többdimenziós hő- és nedvességtranszport modellezése

Vizsgálataim során a stacioner állapotú konjugált hő- és nedvesség-transzportot vettem figyelembe. A parciális differenciálegyenleteket (PDE) az MSZ EN 15026:2007 harmonizált európai szabvány [25] előírásai szerinti alkalmazam és a Comsol Multiphysics szoftvert segítségével a végesesemes módszerrel (VEM) [26] oldottam meg. Az egyenáramú hővezetés PDE-je a következő:

$$\nabla * q = Q \quad (4)$$

$$q = -d_z(\lambda_{eff} * \nabla * T + L_v * \rho_p * \nabla * (\Phi * p_{sat})) \quad (5)$$

ahol:

nabla vektoriális differenciáloperátor

q hőáramsűrűség [W/m²]

Q hőforrás [W/m³]

dz modell Z irányú vastagsága (1 m)

λ_{eff} hőmérséklettől és a nedvességtől függő effektív hővezetési tényező a WUFI 1D-s hő- és nedvességtranszport szimulációs szoftver anyagadatbázisa [13] szerint beállított anyagtulajdonság [W/mK]

T abszolút hőmérséklet [K]

L_v fázisváltás látens hője [J/kg]

δ_p páradiffúziós (párovezetési) tényező [g/msPa]

φ a relatív nedvességtartalom [1]

p_{sat} telítési párányomás [Pa]

Nedvességtranszport szilárd testekben:

$$\nabla * g = G \quad (6)$$

$$g = -d_z(\xi * D_w * \nabla * \Phi + \rho_p * \nabla * (\Phi * p_{sat})) \quad (7)$$

ahol:

g nedvességáram sűrűség [kg/m²s]

G nedvességforrás [kg/m³s]

ξ differenciális nedvességkapacitás, [k/m³]

D_w diffúziós tényező (folyadéktranszport tényező) [m²/s]

w nedvességtartalom [kg/m³] az anyagok higroszkópos szorpciós izo-termái szerint [27]

A programban a modellekre több féle végeelem háló illeszthető. Kísérletet végeztem a végeelem háló felbontása a futtatási idő és a kapott eredmények között, hogy el tudjam dönteni, milyen típusú hálófelbontást érdemes használnom a továbbiakban. Ennek részleteit a következő fejezetben ismertetem.

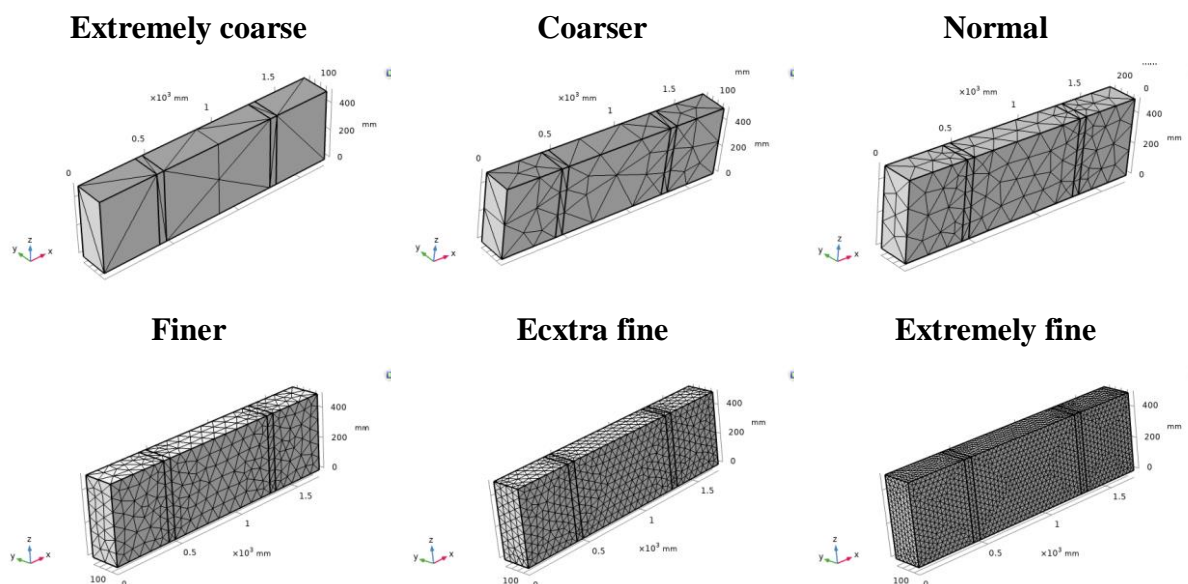
A háló típus megadása után már csak futtatnom kellett a modelleket és kimentenem az eredményeket.

4. Végeselem háló vizsgálata

A végeselem háló felbontásának hatásait vizsgáltam két modellel, az alap (v0) kiindulási modellel és a második felújítási változattal (v2). Hat féle hálóbontást vizsgáltam az extra durvától az extra finom felbontásig. Először szeretném bemutatni mind a két eset eredményeit, majd a végén a két esetet egyben elemezni.

v0 – modell:

A következő ábra összeállítás a végeselem háló sűrűségét mutatja az egyes esetekben a v0 modell kapcsán.



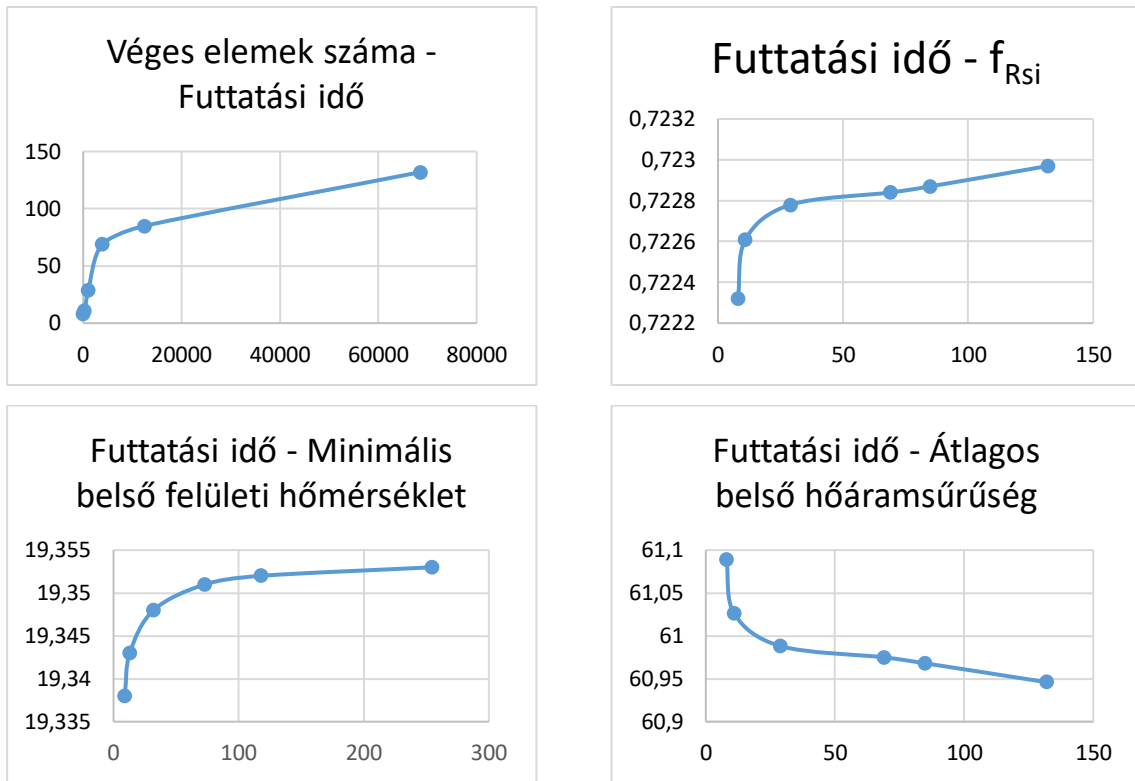
19. ábra. v0 modell hálósűrűség beállítások

A futtatások legfontosabb jellemző eredményeit a következő táblázatban foglaltam össze, és hasonlítottam egymáshoz a kapott eredményeket.

5. táblázat: v0 modell hálóstatistika

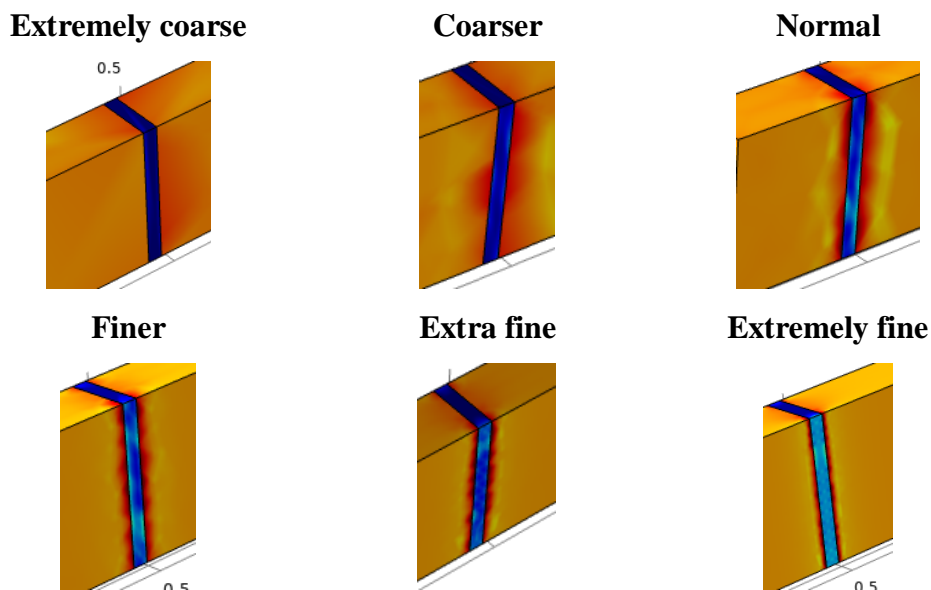
	Extremely coarse	Coarser	Normal	Finer	Extra fine	Extremely fine
Végeselemek száma	48	315	1050	3879	12518	68628
Csomópontok száma	31	114	300	930	2641	12897
Futási idő [s]	8	11	29	69	85	132
Hőátbocsátási tényező [W/(m ² K)]	2,7768	2,7739	2,7722	2,7716	2,7713	2,7703
Minimális belső felületi hőmérséklet [°C]	13,637	13,653	13,708	13,709	13,710	13,709
f_{Rsi}	0,72232	0,72261	0,72278	0,72284	0,72287	0,72297
Átlagos belső hőáramsűrűség [W/m ²]	61,089	61,026	60,988	60,975	60,968	60,946

A következő diagrammokon feltüntettem, hogy a véges elemek számának növekedésével hogyan változik a futtatási idő, illetve hogy a futtatási idők növekedésével (azaz egyre sűrűbb hálót használva) hogyan változnak a kapott eredmények.



20. ábra v0 modell diagrammok

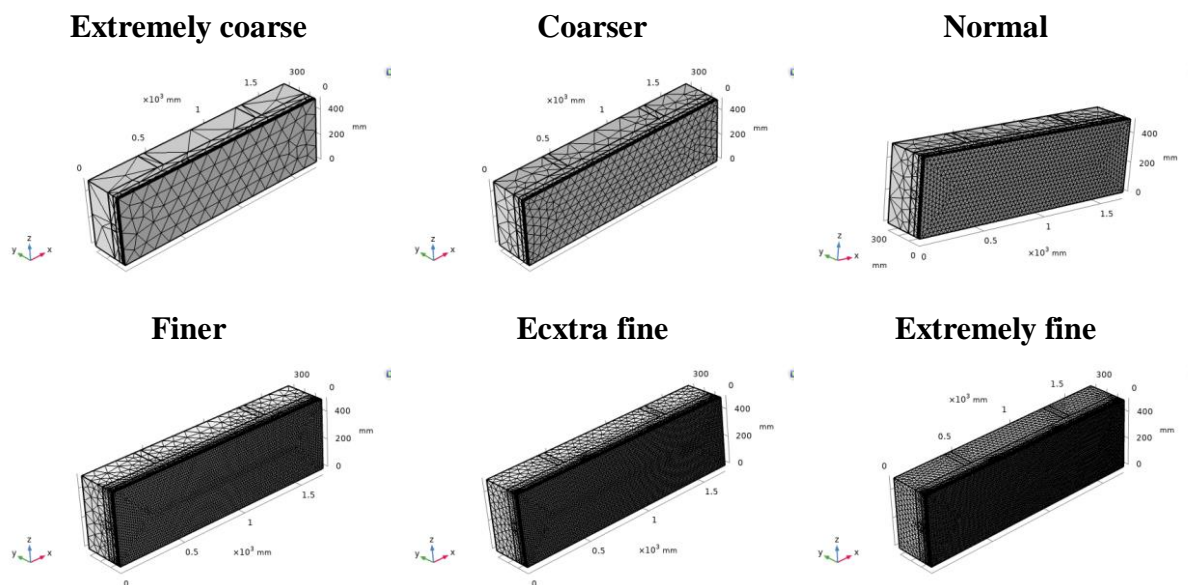
A következő ábrákon szeretném megmutatni, hogy a kapott eredmények az egyes háló finomság szempontjából milyen eltéréseket mutatnak, és ezek hogyan befolyásolják az eredményeim.



21. ábra v0 modell hálófelbontás vizsgálat

v2 – modell:

Szeretném ismét bemutatni a hálófelbontás minőségét a v2 modell esetében is, melyet a következő ábra foglal össze.



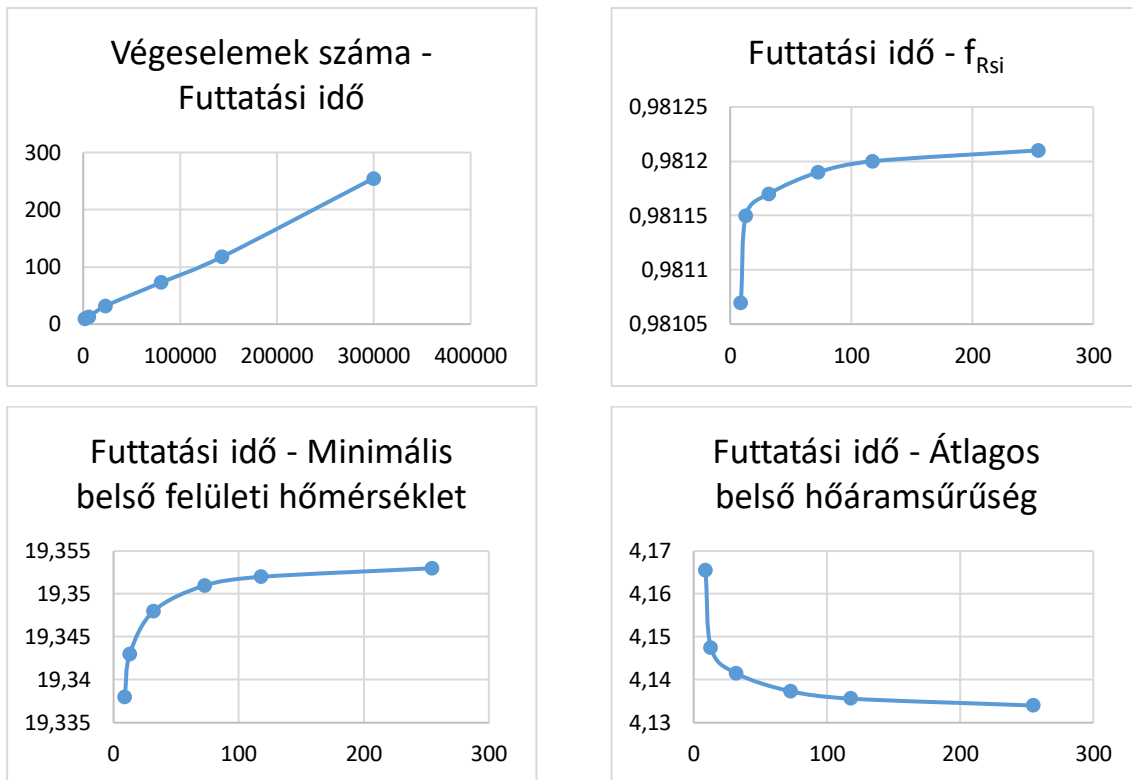
22. ábra: v2 modell hálósűrűség beállítások

A futtatások során a legfontosabb hálófelbontásra jellemző adatokat és a hozzájuk kapcsolódó eredményeket a következő táblázatban közölem.

6. táblázat: v2 modell hálóstatistika

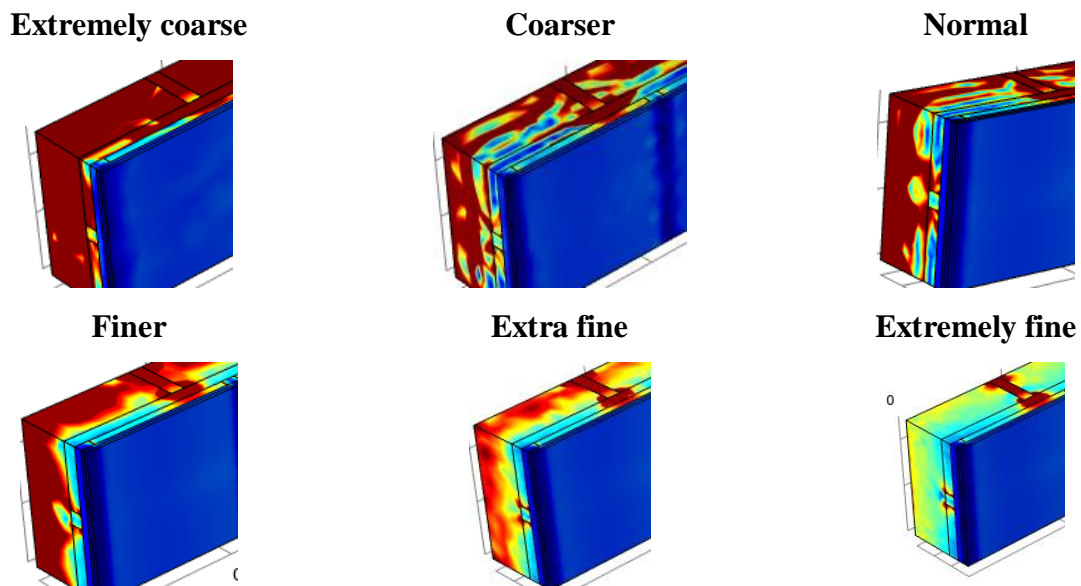
	Extremely coarse	Coarser	Normal	Finer	Extra fine	Extremely fine
Végeselemek száma	1987	6163	23385	80833	143791	299933
Csomópontok száma	477	1377	4897	16062	27748	55225
Futási idő [s]	9	13	32	73	118	255
Hőátbocsátási tényező [W/(m ² K)]	0,18934	0,18852	0,18806	0,18825	0,18798	0,18791
Minimális belső felületi hőmérséklet [°C]	19,338	19,343	19,348	19,351	19,352	19,353
f _{RSi}	0,98107	0,98115	0,98117	0,98119	0,98120	0,98121
Átlagos belső hőáramsűrűség [W/m ²]	4,1655	4,1475	4,1415	4,1373	4,1356	4,1340

A következő diagrammokon feltüntettem hogy a végeselemek számának növekedésével hogyan változik a futtatási idő, illetve hogy a futtatási idők növekedésével (azaz egyre sűrűbb hálót használva) hogyan változnak a kapott eredmények.



23. ábra: v2 modell diagrammok

A modellek lefuttatása után a különböző hálósűrűségek alapján a következő ábra foglalja össze az eredményeket.



24. ábra: v2 modell hálófelbontás vizsgálat

Mind két vizsgált esetben a háló sűrítésével a végeselemek száma jelentősen nő és ez jóval hosszabb futtatási időket eredményez.

A futtatási idők alapján összehasonlítva a kapott eredményeket minimális eltéréseket tapasztalhatunk. A fenti diagrammokon (20. ábra, 23. ábra) jól látszik, mind az első mind a

második esetben, hogy már a normál háló méret is kellő pontosságú eredményt biztosít. Ezen eredmények alapján a továbbiakban minden modell esetében normál méretű végeelem hálót alkalmaztam mivel a bonyolultabb modellek esetében a sűrűbb háló még jelentősebben megnövelte volna a futtatási időket, azonban az eredmények pontosságában nem hozott volna olyan jelentős változást.

Az első esetben a hőáramsűrűség változását még a második esetben a nedvességáram sűrűség változását hasonlítottam össze a háló felbontás szempontjából (21. ábra, 24. ábra). Jól látszódik itt is, hogy a sűrűbb háló pontosabb megoldást eredményez, az elkészült 3 D-s modellekben egyre szebb ábrát kapunk, az élek sokkal lekerekítettebbek, nem jelentkeznek akkora csúcsok, kiszögelések. Azonban ezek a különbségek a szerkezet belsejében jelennek csak meg, a belső felületen apró eltéréseket megfigyelhetünk, azonban elég hasonló eredményeket kapunk minden esetben. Ez mind a háló sűrűség függvénye, azonban ezen eredmények alapján is arra jutottam, hogy számomra mivel leginkább a belső felületi eredmények érdekesek, így ezen vizsgálatok elvégzéséhez elegendő pontosságot fog adni a normál sűrűségű hálóval való vizsgálatok készítése.

5. Felújítási esetek

Dolgozatomban egy sima beépítetlen padlástér tető szerkezetének felújítási alternatíváit vizsgáltam meg a tető rétegrend felújítása kapcsán. Ebben a fejezetben ismertetem a kiindulási szigetetlen állapotot és a felújítási változatokat.

- v0 – kiindulási állapot, szigetetlen tetőszerkezet
- v1 – kőzetgyapot hőszigetelés a szarufák között
- v2 – kőzetgyapot hőszigetelés a szarufák között, kiegészítő hőszigetelés a belső oldalon
- v3 – PIR hab hőszigetelés a szarufák felett
- v4 – kőzetgyapot hőszigetelés a szarufák között, PIR hab hőszigetelés a szarufák felett

Ezekben az esetekben minden modellről két futtatást végeztem. Első esetben csak a hőtechnikai szimuláció figyelembevételével, hogy meg tudjam állapítani, hogy a rétegrend megfelel-e a 7/2006 TNM rendelet [7] költségoptimalizált követelményértékének. A második esetben pedig egy kapcsolt hő- és nedvességtranszport szimulációt készítettem, mivel az sokkal pontosabb eredményeket biztosít.

5.1. Hőtechnikai szimuláció és a kapcsolt hő- és nedvességtranszport szimuláció összehasonlítása

A következő táblázatban összehasonlítottam a két fajta számítás eredményeit a kapott hőátbocsátási tényező szempontjából.

7. táblázat: Hőátbocsátási tényezők összehasonlítása

	Hőtechnikai, Hőátbocsátási tényező [W/m ² K]	Kapcsolt hő- és nedvességtranszport, Hőátbocsátási tényező [W/m ² K]	Eltérés [%]
v0	2,707	2,772	2,4
v1	0,215	0,233	8,4
v2	0,170	0,188	10,6
v3	0,107	0,113	5,6
v4	0,123	0,131	6,5

A 7. táblázat eredményei alapján az első felújítási változat nem felel meg a 7/2006 TNM rendelet [7] költségoptimalizált követelményértékének azonban a másik három már megfelel. A rétegrendek hőátbocsátási tényezőjében a kétféle számítás között a különbséget az egyes anyagok (legfőképpen a hőszigetelés) nedvességfüggő hővezetési tényezője okozza. Az is megfigyelhető hogy ez a v2-es esetben 10,6% még a v3 5,6%. Ennek oka hogy a kőzetgyapot igen jelentősen nedvességfüggő hővezetési tényezője szempontjából, azaz ha telítődik nedvességgel nagymértékben csökkenni kezd a hőszigetelőképesége, míg a PIR hab esetében ez a veszély nem olyan jelentős. Kőzetgyapot hőszigetelések alkalmazása esetén ezért kell nagyon odafigyelni a párazáró fóliák helyes használatára és beépítésére.

5.2. Kiindulási állapot – szigeteletlen tetőszerkezet (v0)

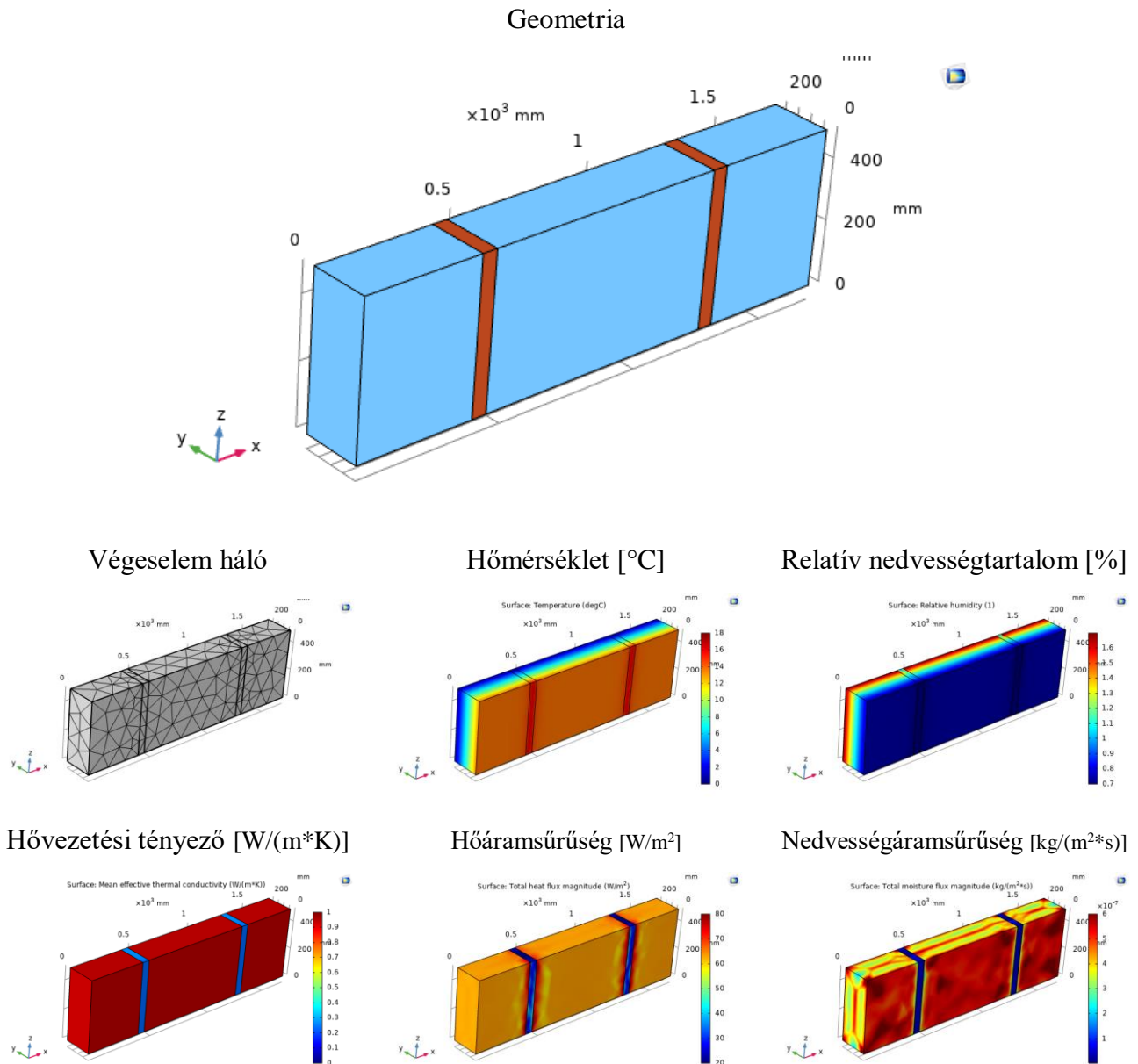
A kiindulási állapotunk egy szigeteletlen hagyományos ácsszerkezetű fedélszék. A tetőszerkezetben a szarufák 5x20 cm-esek, 85 cm-es osztásközzel. Az ácsszerkezet lucfenyőből készült, a külső oldalon egy $S_d = 0,3$ m –es tetőfólia fólia van elhelyezve.

A továbbiakban az egyes modelleknél a különböző színek a következő anyagokat fogják jelölni:

Fa	
Kőzetgyapot	
Levegő	
PIR hab	
Gipszkarton	

25. ábra: v2 Modellek anyagjelölése

Az elkészített modellről a kapcsolt hő- és nedvességtranszport alapján készült futtatás eredményei:

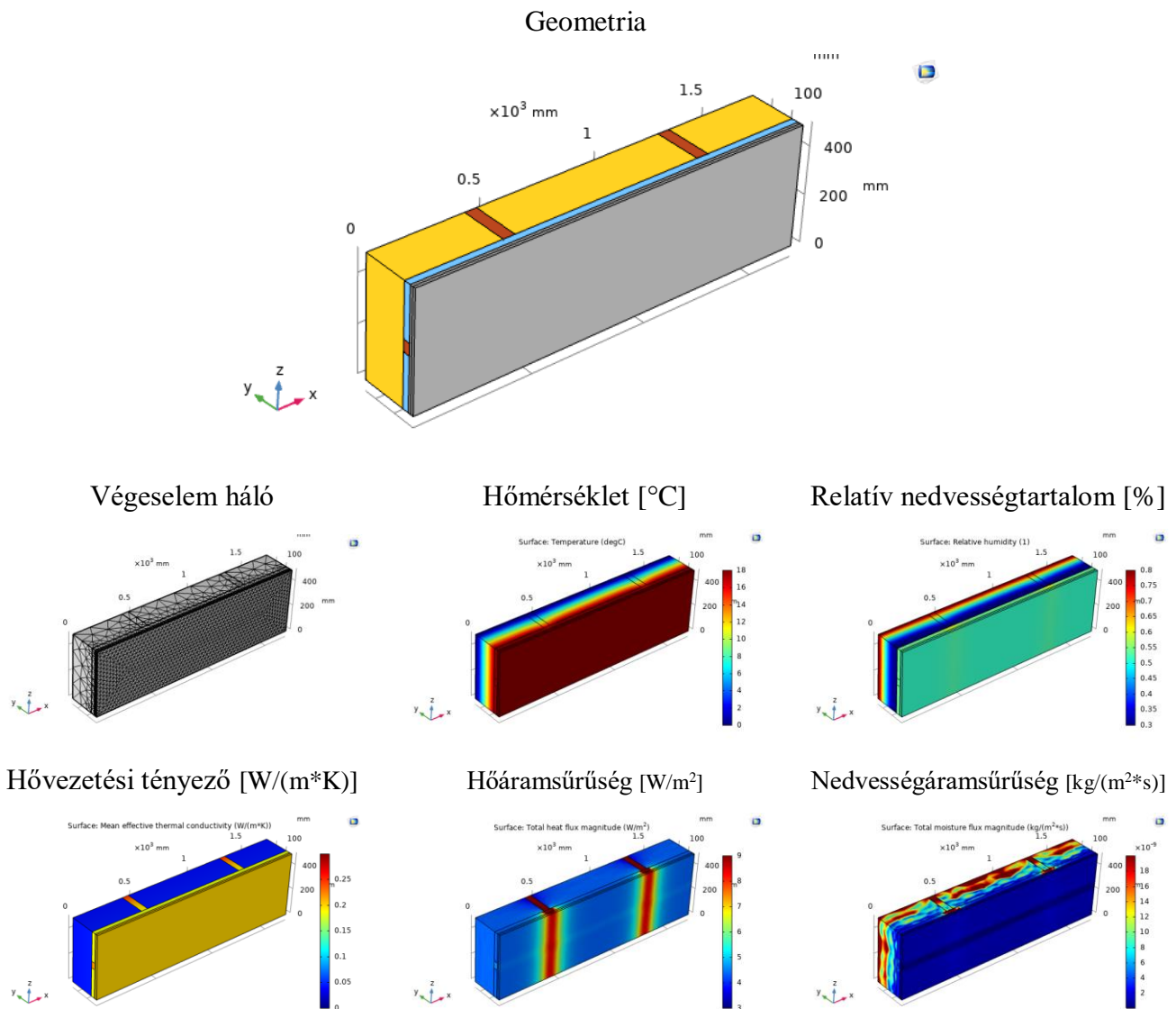


26. ábra: v_0 eredmények kapcsolt hő- és nedvességtranszport esetén

A számítás során normál felbontású hálót alkalmaztam. Mivel a szerkezetben semmilyen szigetelés nem található így a belső oldalon elég alacsony hőmérsékletek alakulnak ki. Megfigyelhető hogy mivel a levegő hővezetési tényezője magasabb mint a fáé, így igen jelentős a különbség a hőáramsűrűségben a két különböző anyagnál. A szerkezetben semmilyen párazáró réteg nem található a belső oldalon így a nedvességáram sűrűség is igen jelentős a belső oldalon.

5.3. Kőzetgyapot hőszigetelés a szarufák között (v1)

Az első felújítási változatban azt vizsgáltam, hogy a felújítás során csak a szarufák közé kerül kőzetgyapot hőszigetelés, ami 20 cm jelent ebben az esetben. A belső oldalra elhelyezésre került egy $S_d=100\text{m}$ -es párazáró fólia illetve egy lécvázra szerelt kétrétegű gipszkartonburkolat. Elkészítettem a kapcsolt hő és nedvességtranszport szimulációt melynek eredményeit a következő ábra mutatja:

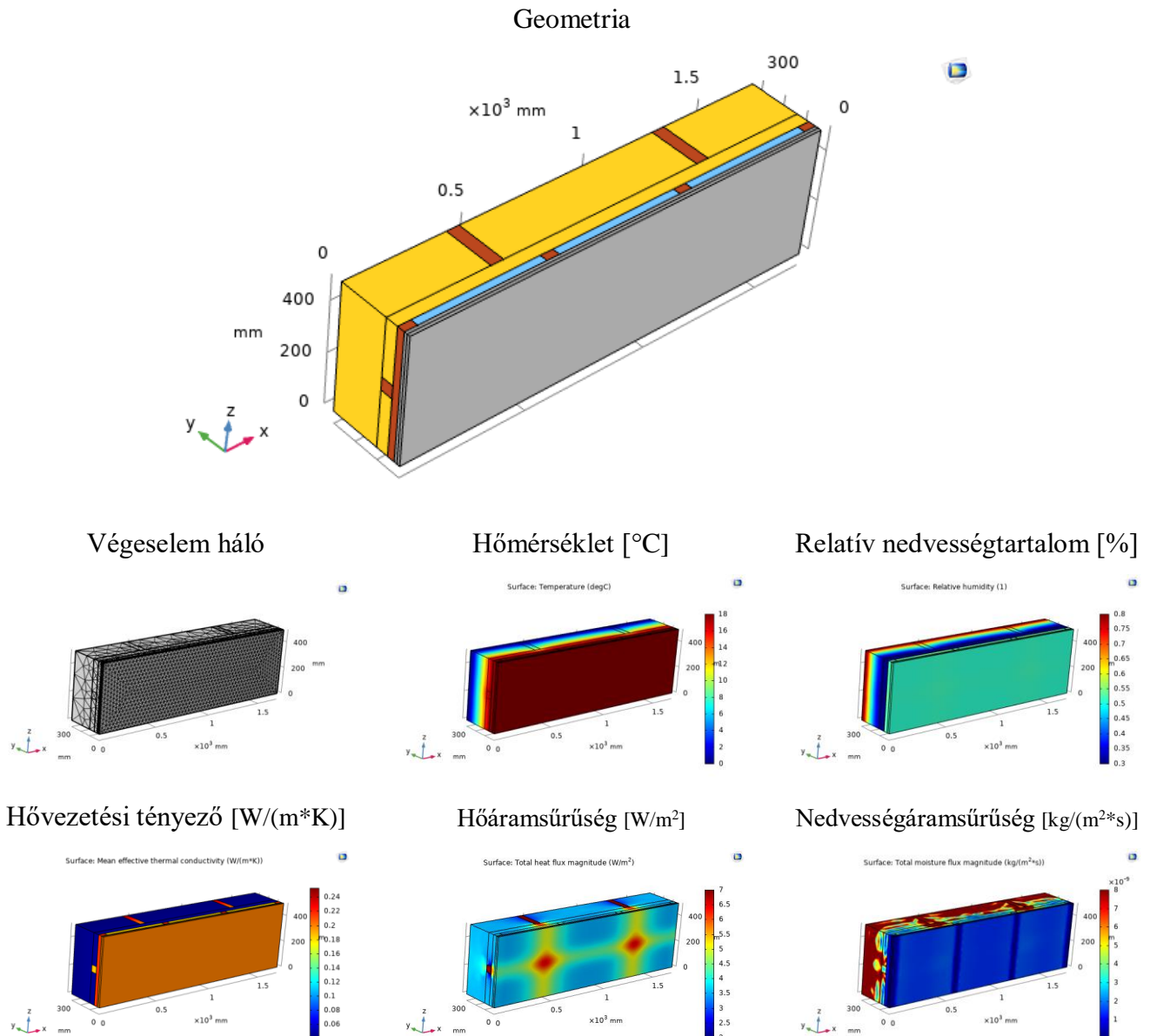


27. ábra: v1 eredmények kapcsolt hő- és nedvességtranszport esetén

A szimulációs eredmények alapján nagyon szépen látszik, hogy a az eltérő hővezetési tényezővel rendelkező anyagok miatt hogyan változik a hőáramsűrűség. A szerkezetben a szarufában ez az érték sokkal magasabb így itt egy úgynevezett hőhid alakul ki, ahol sokkal nagyobb mértékű a hővesztés mint a többi környező helyen. Ezen hőhidak megszüntetésére vagy legalább csökkentésére jó megoldás a belső oldali kiegészítő szigetelés alkalmazása. A nedvességáram sűrűség változásában is megfigyelhető hogy a szarufa mentén és környezetében magasabb áramlások alakulnak ki ami a dolgozat elején említett nedvességhidakra utal.

5.4. Kőzetgyapot hőszigetelés a szarufák között kiegészítő belsőoldali hőszigeteléssel (v2)

A második változatban azt vizsgáltam meg, hogy a szarufák közt lévő részt kitöltöm 20 cm kőzetgyapot hőszigeteléssel és a belső oldalon elhelyezek még 5 cm kiegészítő hőszigetelést. Ebben az esetben is kialakításra került a párazáró réteg és a gipszkarton burkolat. A kapcsolt hő- és nedvességtranszport eredményeit a következő ábrán foglaltam össze:

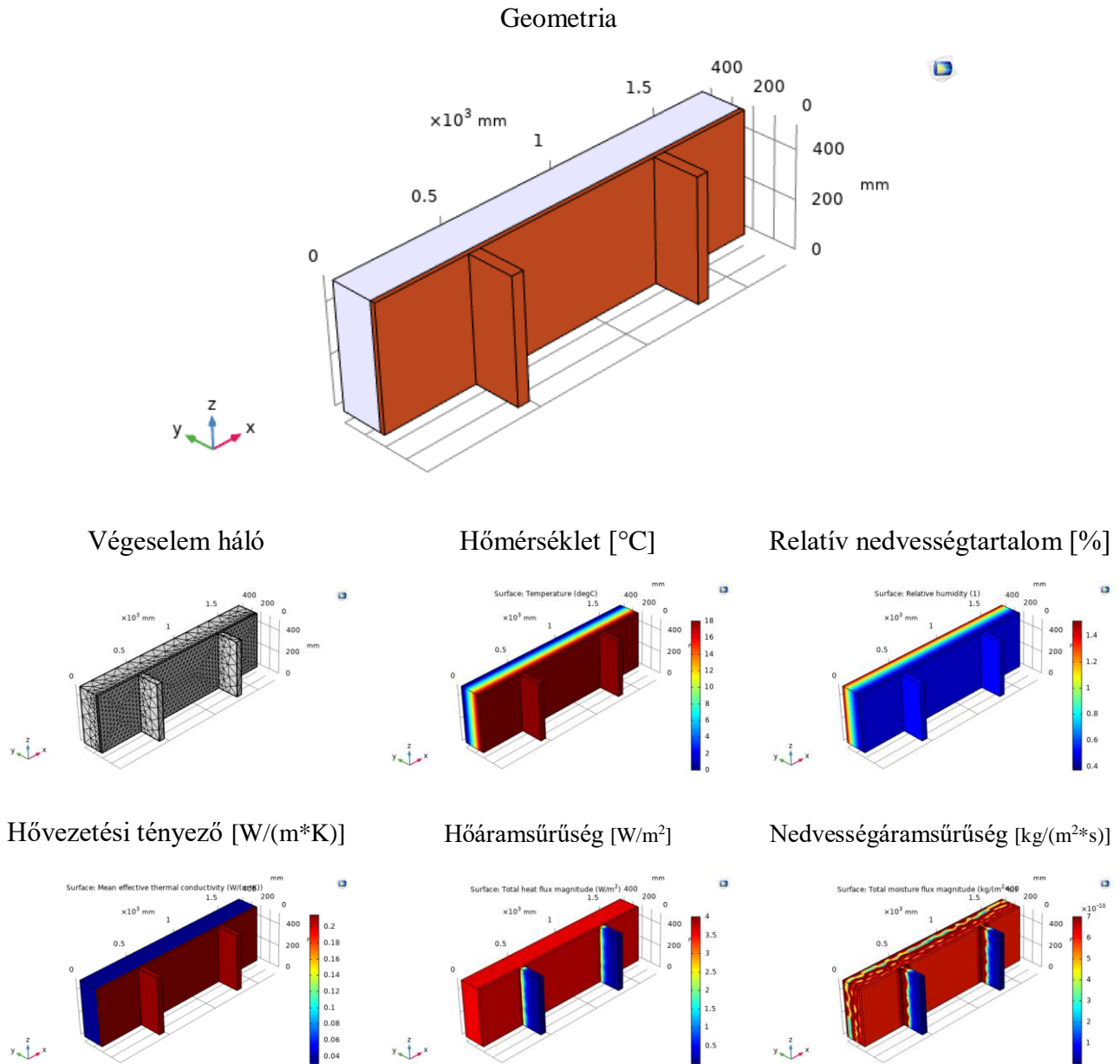


28. ábra: v2 eredmények kapcsolt hő- és nedvességtranszport esetén

Ebben az esetben már egy sokkal jobb rétegrendet kapunk, a hőáramsűrűségek a belső oldalon illetve a szerkezet belsejében csökkentek, a kiegészítő hőszigetelésnek köszönhetően csökkent az anyageredetű hőhíd hatása.

5.5. PIR hab szigetelés a szarufák felett (v3)

A harmadik esetben megvizsgáltam egy PIR hab szigetelést, melyet a szarufák fölött elkészített fa aljzatra helyeztem el. A szigetelést 18 cm vastagságban alakítottam ki. A kapcsolt hő- és nedvességtranszport szimuláció eredményei:

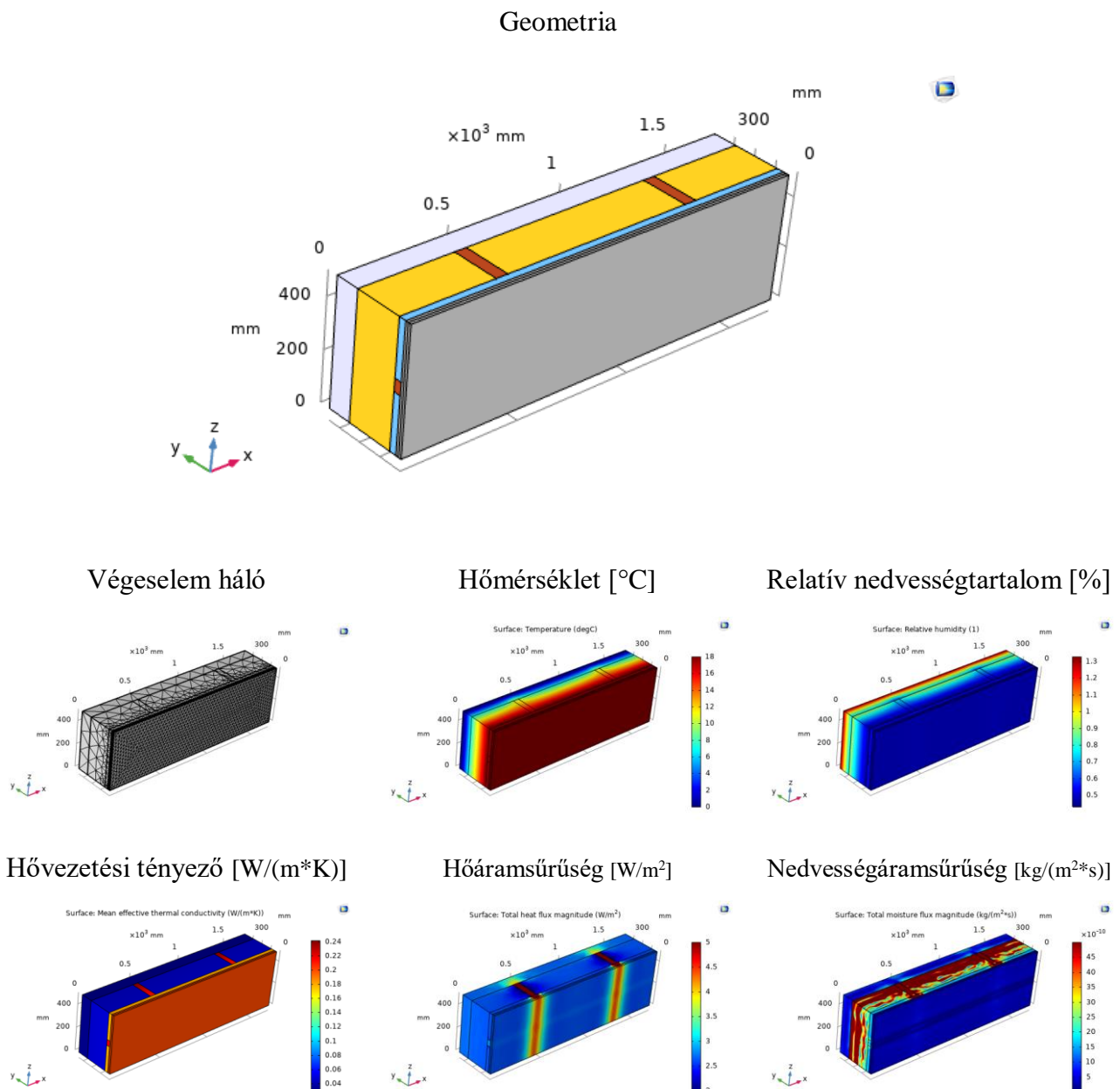


29. ábra: v3 eredmények kapcsolt hő- és nedvességtranszport esetén

Ez a megoldás nagyon kedvező több szempontból is. A szigetelő rétegben nem alakul ki anyag eredetű hőhíd így a hőáramsűrűség nem változik ebben a rétegben. Valamekkora geometriai hőhíd kialakul a szarufák csatlakozása mentén, azonban ennek mértéke ebben az esetben szinte elhanyagolható. A rétegrendre merőlegesen nem alakulnak ki a szigetelésben nedvességáramok így jelentősebb nedvességhidak sem keletkeznek, ami igen jótékony hatással van a szerkezetünkre.

5.6. Kőzetgyapot hőszigetelés a szarufák között és PIR hab szigetelés a szarufák felett (v4)

A negyedik felújítási változatban a szarufák közötti részt 20 cm kőzetgyapot hőszigeteléssel láttam el és a szarufák tetejére még 10 cm PIR hab szigetelést helyeztem el. Az elkészített szimuláció eredményei:



30. ábra: v4 eredmények kapcsolt hő- és nedvességtranszport esetén

5.7. Összehasonlítás

Az egyes felújítási változatokra készített futtatások legfontosabb eredményeit a következő táblázatban foglaltam össze:

8. táblázat: Felújítási változatok eredményösszehasonlítása

	v0	v1	v2	v3	v4
Minimális belső felületi hőmérséklet [°C]	13,708	19,145	19,348	19,625	19,555
f_{Rsi}	0,723	0,977	0,981	0,989	0,987
Hőátbocsátási tényező [W/m²K]	2,772	0,333	0,188	0,112	0,131
Hőáramsűrűség [W/m²]	60,988	5,127	4,142	2,479	2,893
Nedvességtartalom a kőzetgyapotban [kg/m³]	-	0,097	0,107	-	0,130
Nedvességtartalom a PIR habban [kg/m³]	-	-	-	6,123	8,613
Nedvességtartalom a szarufában [kg/m³]	104,14	46,237	51,055	44,264	52,832
Kőzetgyapot relatív páratartalom	-	0,478	0,529	-	0,636
PIR hab relatív páratartalom	-	-	-	0,794	0,966
Szarufa relatív páratartalom	1,055	0,499	0,565	0,501	0,600
Kőzetgyapot átlaghőmérséklete [°C]	-	8,204	6,379	-	13,282
PIR hab átlaghőmérséklete [°C]	-	-	-	8,791	2,871
Szarufa átlaghőmérséklete [°C]	7,289	7,395	5,123	19,942	13,986
Kőzetgyapot átlaghővezetési tényező [W/(mK)]	-	0,043	0,042	-	0,044
PIR hab átlaghővezetési tényező [W/(mK)]	-	-	-	0,031	0,030
Szarufa átlaghővezetési tényező [W/(mK)]	0,259	0,213	0,220	0,213	0,224

A táblázat adatai jól tükrözik az egyes rétegrendi kialakítások előnyeit és hátrányait. Jól látható hogy a minimális belső felületi hőmérséklet az alap szigeteltelen esethez képest nagyon jelentősen javul minden esetben. Az f_{Rsi} érték az alap esetben nagyon rossz ami következtében párakicsapódásra lehet számítani, azonban a felújított esetekben az érték mindenhol 0,95 fölött

van ami nagyon jó. Megfigyelhető, hogy ahogyan változik a belső oldali hőáramsűrűség úgy csökken a rétegrend hőátbocsátási tényezője is. Míg a szigetetlen esetben hatalmas hőáramok alakulnak ki a szerkezetben, úgy a felújított változatokban ezek csökkennek a hőszigetelés, és a hőhidak csökkenésének hatására. A kiindulási $2,772 \text{ W/m}^2\text{K}$ - es értékhez képest minden esetben jelentős javulást tapasztalunk. A legjelentősebb javulást a PIR hab szigeteléssel sikerült elérnünk, $0,112 \text{ W/m}^2\text{K}$. Vékonyabb rétegben lett elhelyezve mint a kőzetgyapot még is jelentősebb a hőátbocsátási tényező javulása. Ennek két oka is van, egyrészt nem alakulnak ki hőhidak a szarufák miatt a szerkezetben, hiszen a PIR hab szigetelés a teljes felületen fekszik, másrészt a PIR hab hővezetési tényezője önmagában alacsonyabb mint a kőzetgyapoté.

Nagyon szépen látszik a táblázat eredményeiből, hogy a hőszigetelések nedvességtartalom növekedésének hatására milyen mértékben romlik az egyes anyagok hővezetési tényezője. A gyártó által a katalógusban szereplő értékek a kőzetgyapokra $0,037 \text{ W/mK}$, míg a PIR habra $0,025 \text{ W/mK}$. A táblázatban szereplő értékek pedig $0,042$ - $0,044 \text{ W/mK}$ között míg a PIR habra $0,03$ - $0,031 \text{ W/mK}$ között vannak. Ennek oka a nedvességtartalom növekedése a szigetelésben. Jól látható az is hogy míg a kőzetgyapot szigetelések esetén a szarufa átlaghőmérséklete jelentősen csökken addig a külső oldali PIR hab szigetelés használatakor minimális ez a csökkenés, hiszen a szigetelés a teljes külső felületen fekszik, nem alakít ki benne a szarufa hőhidat.

6. Építési hibák

A kivitelezés során rengetegszer kerülünk olyan helyzetbe, hogy a szerkezet nem a tervek szerint lesz elkészítve, valami hiba van benne. Ennek rengeteg oka lehet: felelőtlenység, hanyagság, szakmai illetve műszaki tájékozatlanság, szakképzetlen munkaerő, spórolás, kapkodás a határidők betartása miatt. Ezek együttesen is jelentkezhettek és ezek még nagyobb problémákat szülhetnek. A tervező akármennyire is pontosan tervezi meg a szerkezetet, ha az nincs megfelelően kivitelezve, nem úgy fog működni, ahogy azt szeretnénk. Ebben a fejezetben a tetőtéri beépítés során felmerülő építési hibákat vizsgáltam.

Az általam az előző fejezetekben említett felújítási változatok közül a 2 –at választottam ki és elemeztem a továbbiakban. Manapság ez a legelterjedtebb és jelenleg a leg költséghatékonyabb megoldás, Magyarországon ebből a típusból készül a legtöbb.

Három fő építési hibát határoztam meg melyeket különböző kialakításokban vizsgáltam, majd kombinációkat készítettem az építési hibák egyszerre történő előfordulásából:

- Hőszigetelés hézagos beépítése
- Gyengébb minőségű hőszigetelés alkalmazása
- Gyengébb minőségű fólia alkalmazása
- Kombinált esetek

6.1. Hőszigetelés hézagos beépítése

A leg kézenfekvőbb hiba. A hőszigetelést beépítéskor nem megfelelően vágják méretre, az elhelyezés során kitöltetlen hézagok keletkeznek. Vizsgálataim során több esetet határoztam meg és modelleztem le. A kiválasztott verzióban a felújítás során 20 cm közetgyapot hőszigetelés kerül a szarufák közé, és 5 cm kiegészítő szigetelés a belső oldalra. A számításaim során minden oldalon a szarufa ill. a tartó lécváz mellett 1-1 cm hézagot feltételeztem építési hibaként, és vizsgálatot végeztem hogy a vízszintes vagy a függőleges hézagok okoznak nagyobb gondot a szerkezetben.

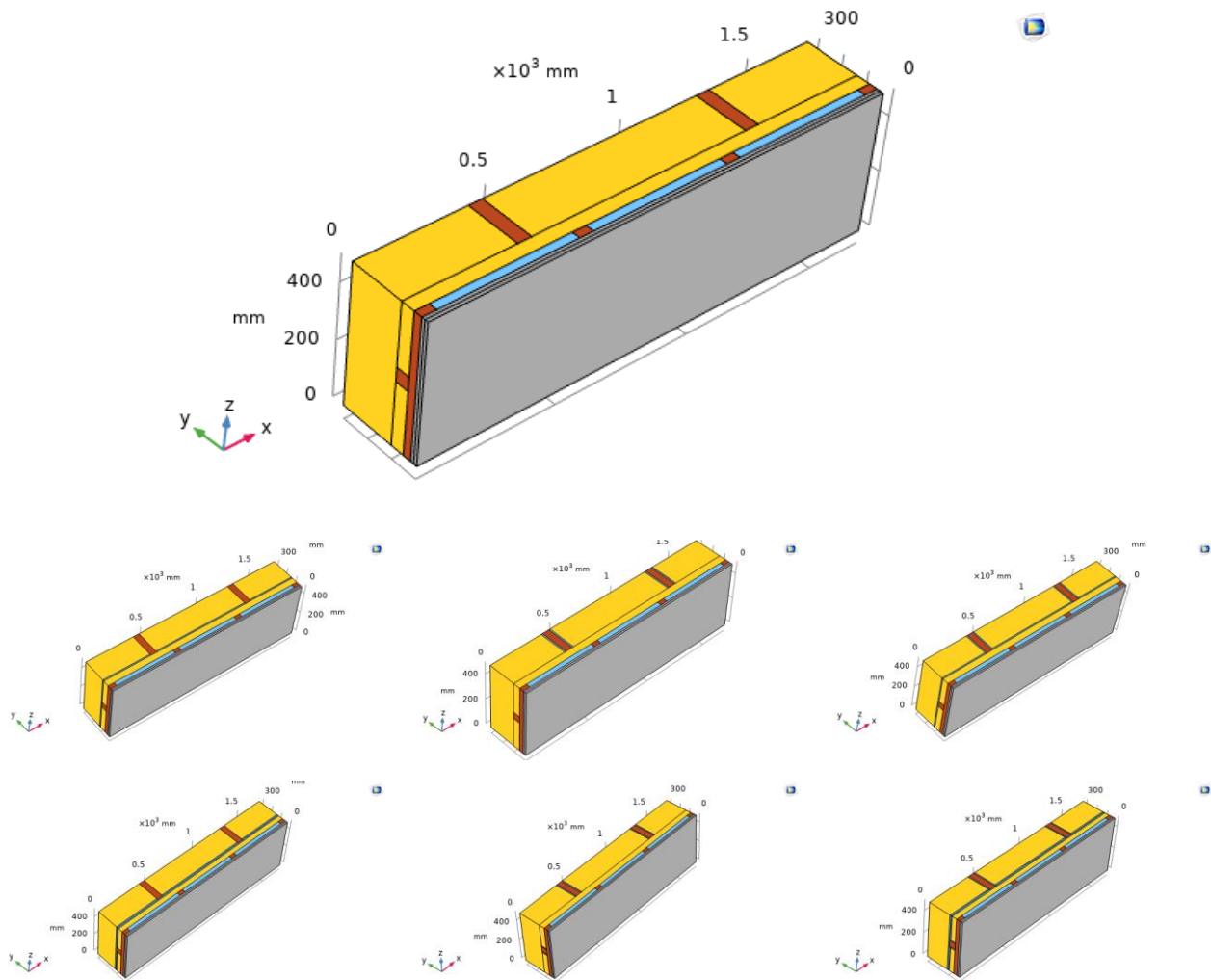
- Helyesen megépített szerkezet (v2)
- Vízszintes hézag (csak a szarufák közötti szigetelésben) (h1)
- Függőleges hézag (csak a szarufák közötti szigetelésben) (h2)
- Vízszintes és függőleges hézag (csak a szarufák közötti szigetelésben) (h3)
- Vízszintes hézag (mind két rétegben) (h4)
- Függőleges hézag (mind két rétegben) (h5)
- Vízszintes és függőleges hézag (mind két rétegben) (h6)

A következő táblázatokban a modellek kiosztása ennek megfelelően értelmezendő:

9. táblázat: Modellek kiosztása

	v2	
h1	h2	h3
h4	h5	h6

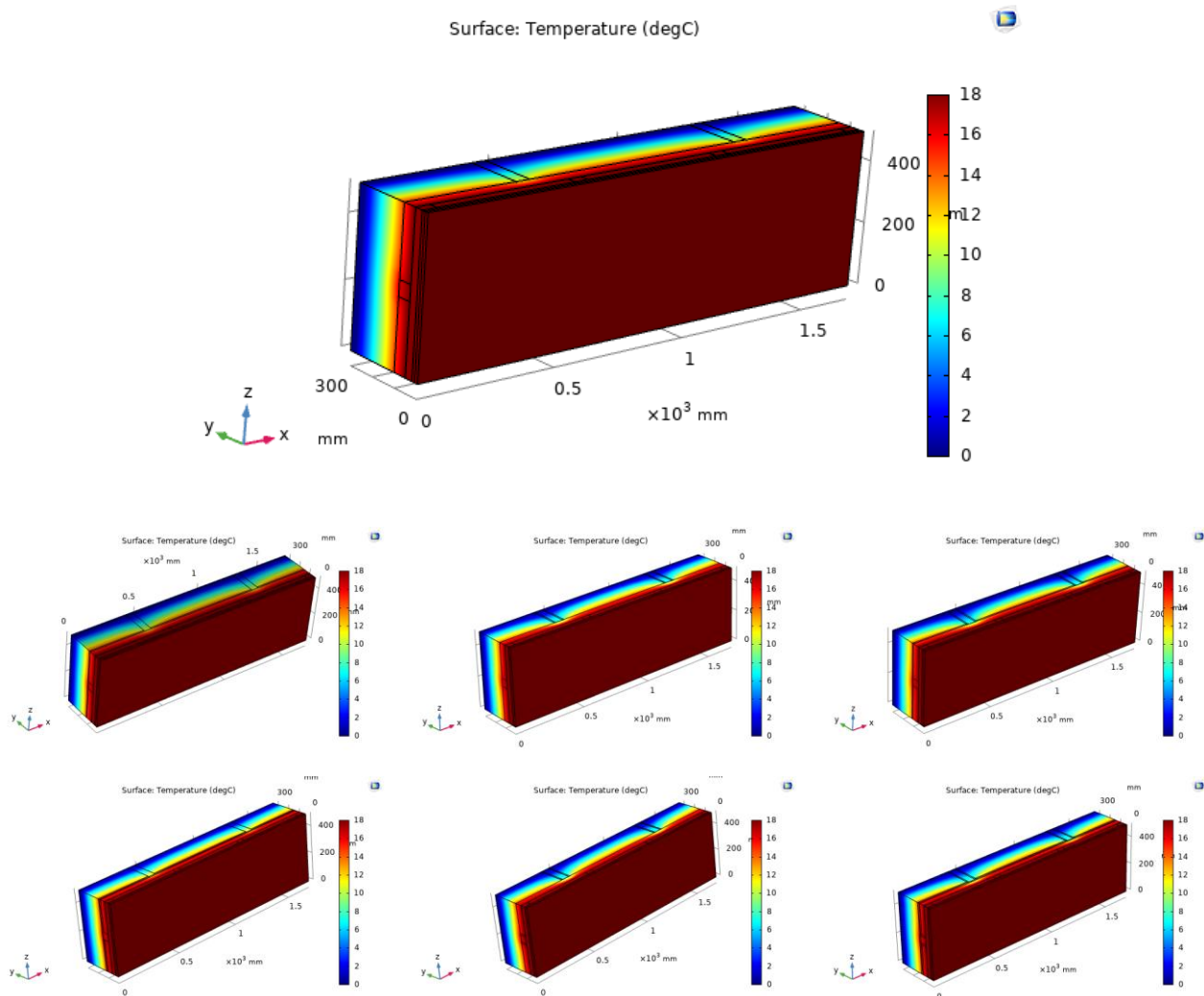
Az elkészített modellekben a következő ábrán szerepel a geometriai kialakítás. Az egyes anyagokat a 25. ábra szerint kell értelmezni.



31. ábra: Geometria, anyagjelölés

A kialakításnál jól látható hogy az egyes esetekben hol helyeztem el illesztési hézagokat. A különböző anyagok különböző színekkel lettek jelölve. Az 1-1 cm-es illesztési hézagokat igyekeztem úgy kialakítani, hogy minden lehetséges verziót figyelembe vegyek, mi van akkor ha csak vízszintesen hagynak hézagot, mi történik, ha csak függőlegesen illetve hogy mi lesz ha esetleg mind két rétegben, a szarufák között és a kiegészítő szigetelésben is hézagokat hagyunk.

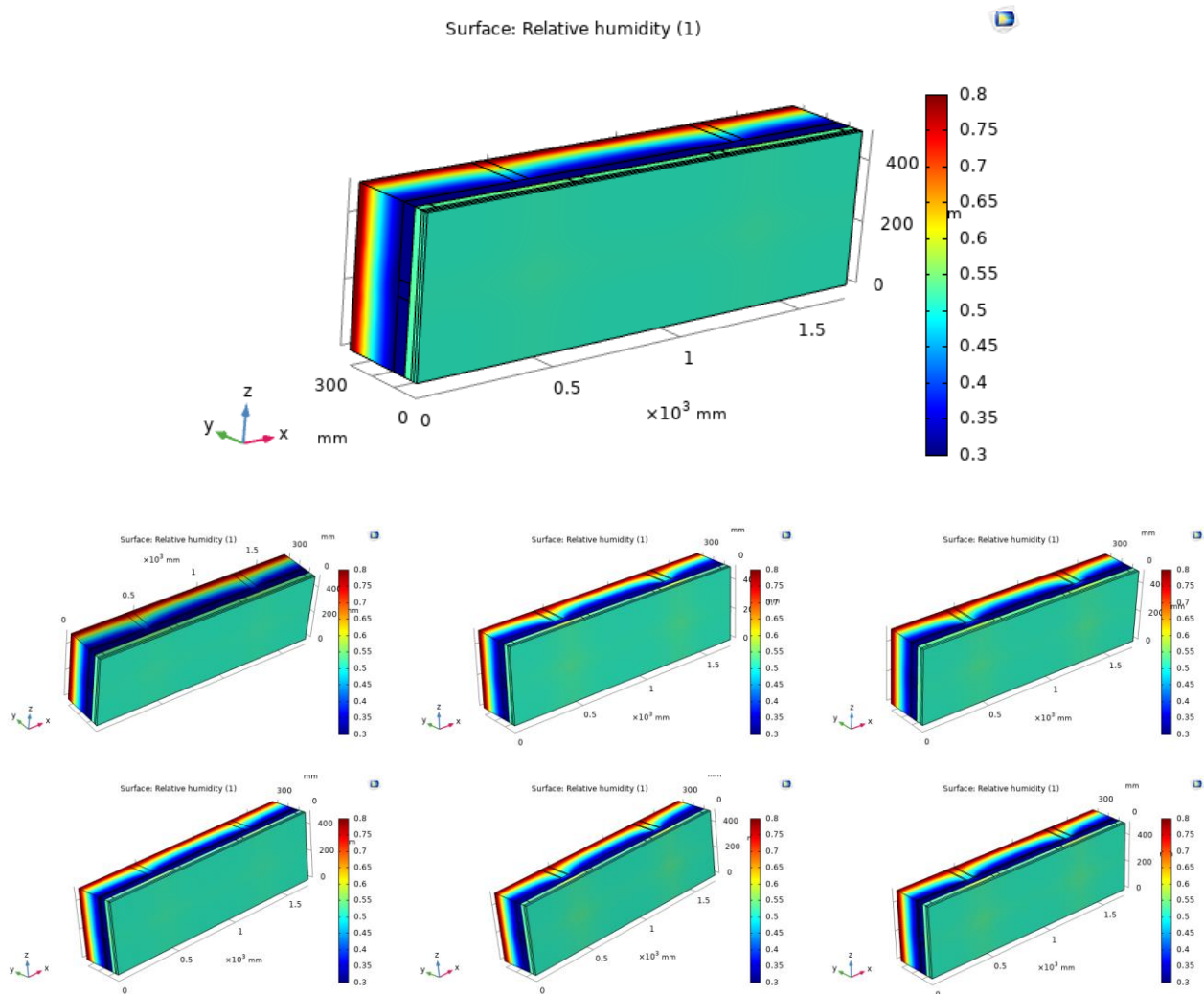
A következő ábrákon a szerkezet egyes rétegiben kialakult hőmérsékletek figyelhetőek meg.



32. ábra: Hőmérséklet

Az 32. ábra alapján megállapítható hogy a hőmérséklet eloszlás nagyon hasonló az egyes esetekben, azonban jól látszik, hogy az építési hibákkal terhelt esetekben főleg azoknál ahol függőleges hézag alakult ki a szarufa mellett alacsonyabb hőmérsékletek keletkeznek, egy beugrás figyelhető meg ezekben az esetekben a hőmérsékleti ábrán. Ennek következményeképpen alacsonyabb hőmérsékletek alakulnak ki ezeken a részeken, ami esetenként páralecsapódáshoz vezethet. Ennek oka a hőhíd kialakulása a szerkezetben. A szarufa miatt már amúgy is jelen volt ez a probléma, azonban hogy még légrést is hagytunk a két oldalán, így ez a jelenség még jobban felerősödött, hatása jelentősen rontja a szerkezet hőátbocsátási tényezőjét.

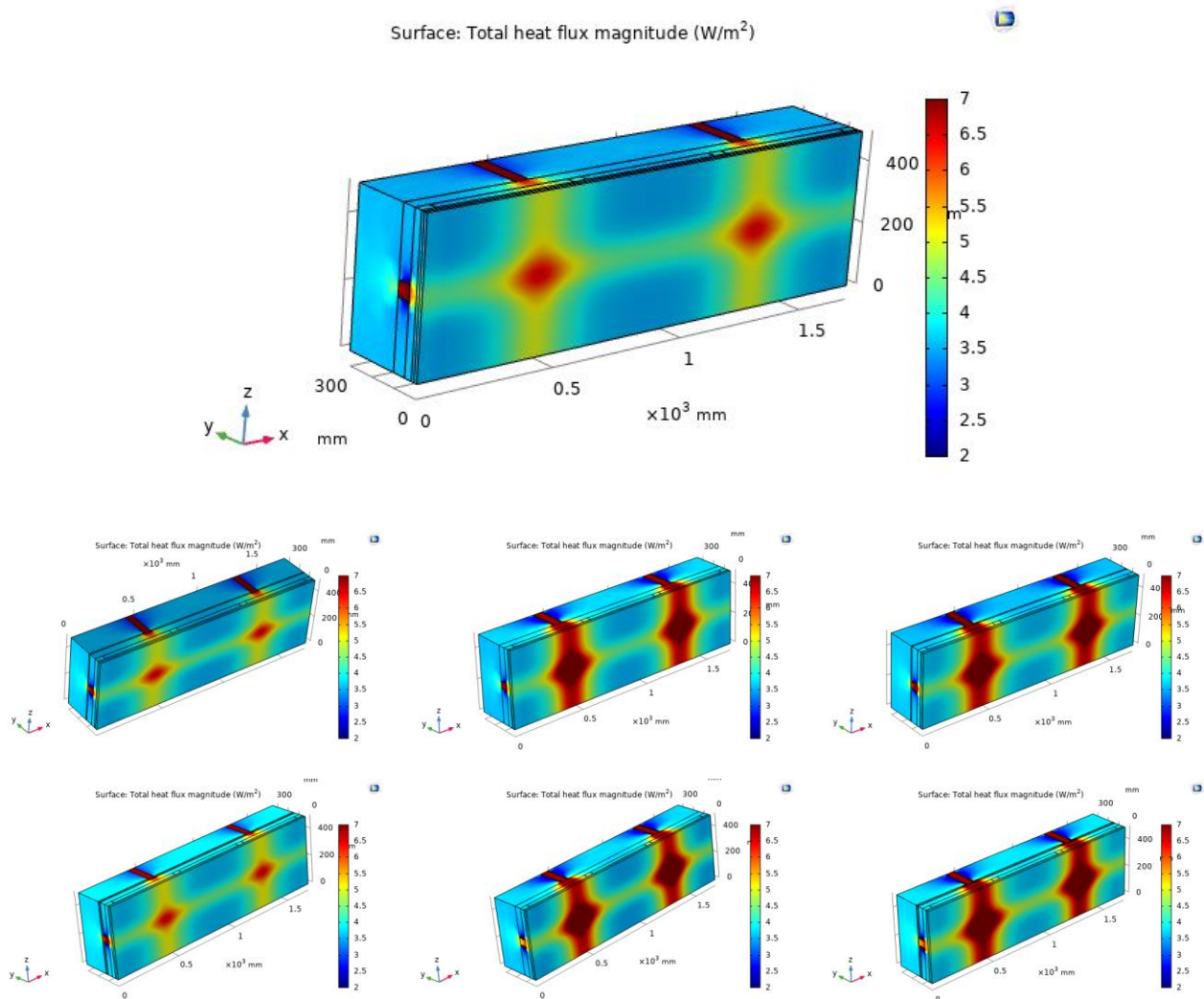
A következő ábrák a szerkezetben megjelenő relatív nedvességtartalmat ábrázolják.



33. ábra: Relatív nedvességtartalom

Az ábra 31. elemein megfigyelhető, hogy a nedvességtartalom függőleges hézaggal terhelt esetekben megnövekszik a szarufák környezetében és magasabb értéket mutat a hézag körül, így több nedvesség jut a hőszigetelésbe, de nem csak a szarufák közötti részbe, hanem a kiegészítő hőszigetelésbe is. A magasabb nedvességtartalom jelentősen rontja a szigetelő anyagok hővezetési tényezőjét és ezzel a teljes rétegrend hőátbocsátási tényezőjét is csökkenti.

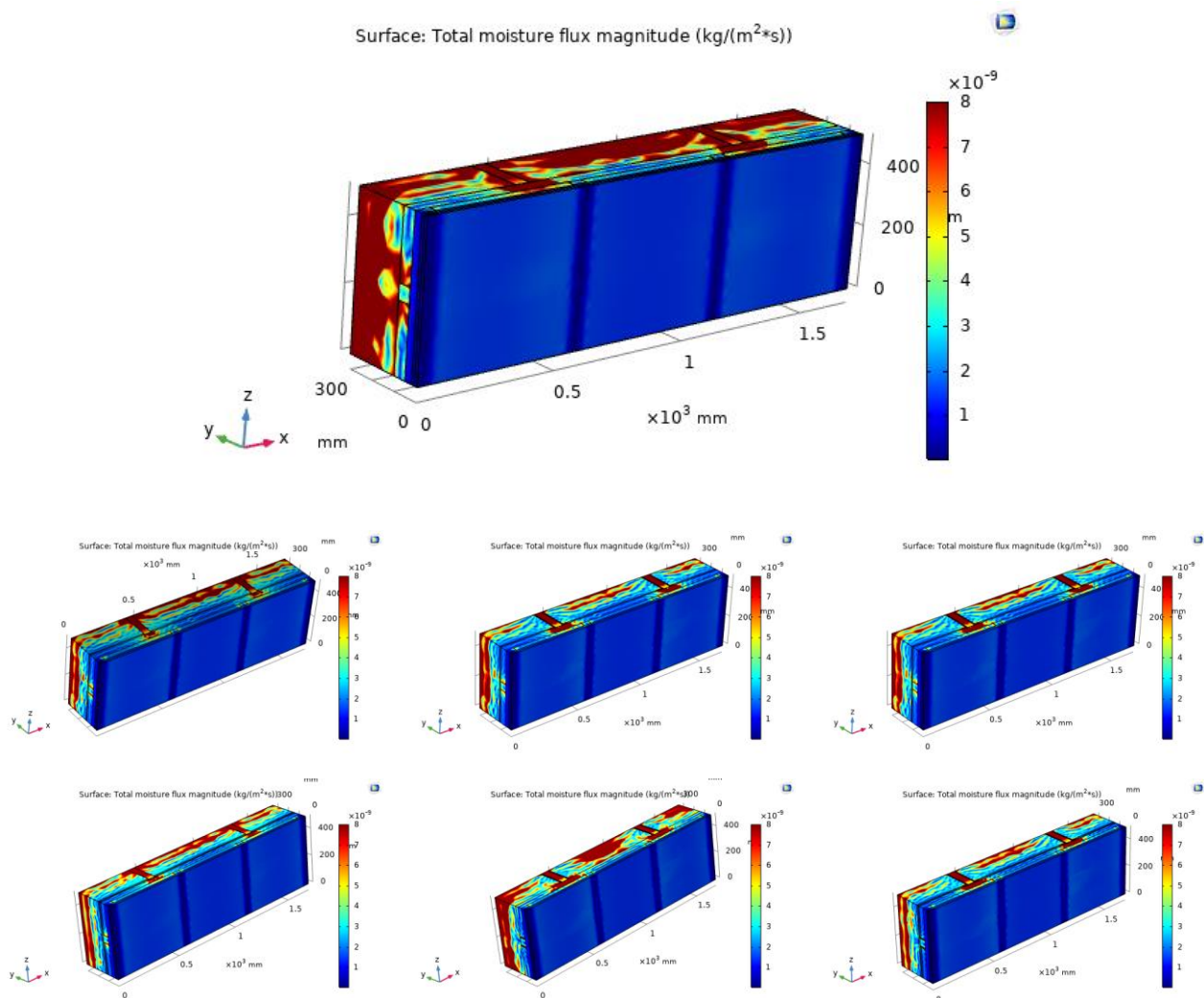
A következő ábrák összefoglalják az egyes esetekben a hőáramsűrűségra vonatkozó eredményeket.



34. ábra: Hőáramsűrűség

A 34. ábra eredményein nagyon jól megfigyelhető a különbség a vízszintes és a függőleges építési hézagok között. Jól látszik, hogy amikor csak vízszintes hézagok vannak (h1, h4) azokban az esetekben a hőáramsűrűség majdnem teljesen megegyezik a helyesen beépített esettel, nem figyelhető meg nagy eltérés. Azonban a függőleges hézagok esetében legyen az csak a szarufák között vagy esetleg mind a két rétegben, igen jelentős eltérések tapasztalhatunk. A hőáram sűrűség jelentősen megnövekszik ezekben az esetekben a szarufák és a lécváz környezetében ahol is a hézagok találhatóak. Az eredmény nem meglepő, hiszen erre is lehetett számítani, hiszen hiányos a szigetelés, a levegő hővezetési tényezője jóval nagyobb a szigetelésénél így sokkal több hőt veszítünk ezekben az esetekben, és jelentősen romlik a rétegrendünk hőátbocsátási tényezője is.

A nedvességáramsűrűség változásáról készült eredményeket a következő ábrán szeretném szemléltetni és összehasonlítani.



35. ábra: Hőáramsűrűség

A 35. ábra eredményei alapján a nedvességáramban apró különbségek fedezhetőek fel az egyes esetekben, azonban az alap esethez képest jelentős az eltérés. A hézagok környezetében megnövekszik a nedvességáram, ez rontja a hőszigetelések hővezetési tényezőjét. Ezekben az esetekben úgynevezett nedvességhidak alakulnak ki a szerkezet belsejében. Ez az a jelenség amivel nagyon sokszor a tervezők nem is foglalkoznak, hiszen a tervezés során általában csak hőtechnikai számításokat végeznek. A nedvességáramok ilyen jelentős mértékű változása nagy hatással van a teljes rétegrendi hőátbocsátási tényezőre.

A hézagos hőszigetelés beépítéssel kapcsolatban készült számítások legfontosabb eredményeit a következő táblázatban összesítettem.

10. táblázat: Építési hiba eredmények összehasonlítása

	Átlagos belső hőáramsűrűség [W/m ²]	Hőátbocsátási tényező [W/m ² K]	Hőátbocsátási tényező romlása [%]	Minimális belső felületi hőmérséklet [°C]	f _{Rsi}
v2	<u>4,1415</u>	<u>0,18825</u>	-	<u>19,348</u>	<u>0,98117</u>
h1	4,1905	0,19048	1	19,346	0,98095
h2	4,7571	0,21623	15	19,067	0,97838
h3	4,8268	0,21940	17	19,065	0,97806
h4	4,2492	0,19314	3	19,343	0,98069
h5	4,8448	0,22022	17	18,999	0,97798
h6	5,0017	0,22735	21	18,992	0,97726

Jól látható a 10. táblázat eredményei alapján hogy a hézagos beépítésnek komoly következményei vannak. A táblázat első sorában láthatóak a helyesen beépített szigetelésre vonatkozó adatok, míg lejjebb az egyes építési hibákkal terhelt szerkezetek adatai. Megállapíthatjuk, hogy a függőleges hézagok nagyobb veszélyt jelentenek minden esetben, mint a vízszintesek. Ugyan erre a megállapításra jutottam a fenti ábrák elemzésénél is. Sajnos ezek az esetek fordulnak elő gyakrabban, hiszen a hőszigetelés elhelyezésekor ezeket az éleket vágják a helyszínen méretre, ami sokszor nem megfelelően sikerül. Ezekben az esetekben kisebb a belső felületek hőmérséklete, és nagyobb a hőáramsűrűség. A rétegtrendünk hőátbocsátási tényezője is jelentősen növekszik a hézagok elhelyezésével. A táblázat negyedik oszlopában szemléletesen látszik százalékban a rétegtrend hőátbocsátási tényezőjének romlása. A figyelmetlen és hanyag beépítéssel akár 21% -os romlást is elérhetünk, ami nagyon jelzetős! Mindezeket figyelembe véve ügyelni kell pontos beépítésre, mert egy kis odafigyeléssel a későbbiekben sokat spórolhatunk.

6.2. Gyengébb minőségű hőszigetelés alkalmazása

Nagyon gyakori eset, hogy a tervező mérnök megtervezi a rétegtrendet egy adott gyártó hőszigetelésével, azonban a kivitelező spórolni szeretne és egy olcsóbb kevésbé jó hőszigetelést épít be a szerkezetbe, ami egy laikus megrendelő számára akár fel se tűnhet. Ebben a fejezetben

három egyre gyengébb hővezetési tényezővel rendelkező hőszigetelést hasonlítottam össze az alap jól megtervezett és beépített rétegrenddel:

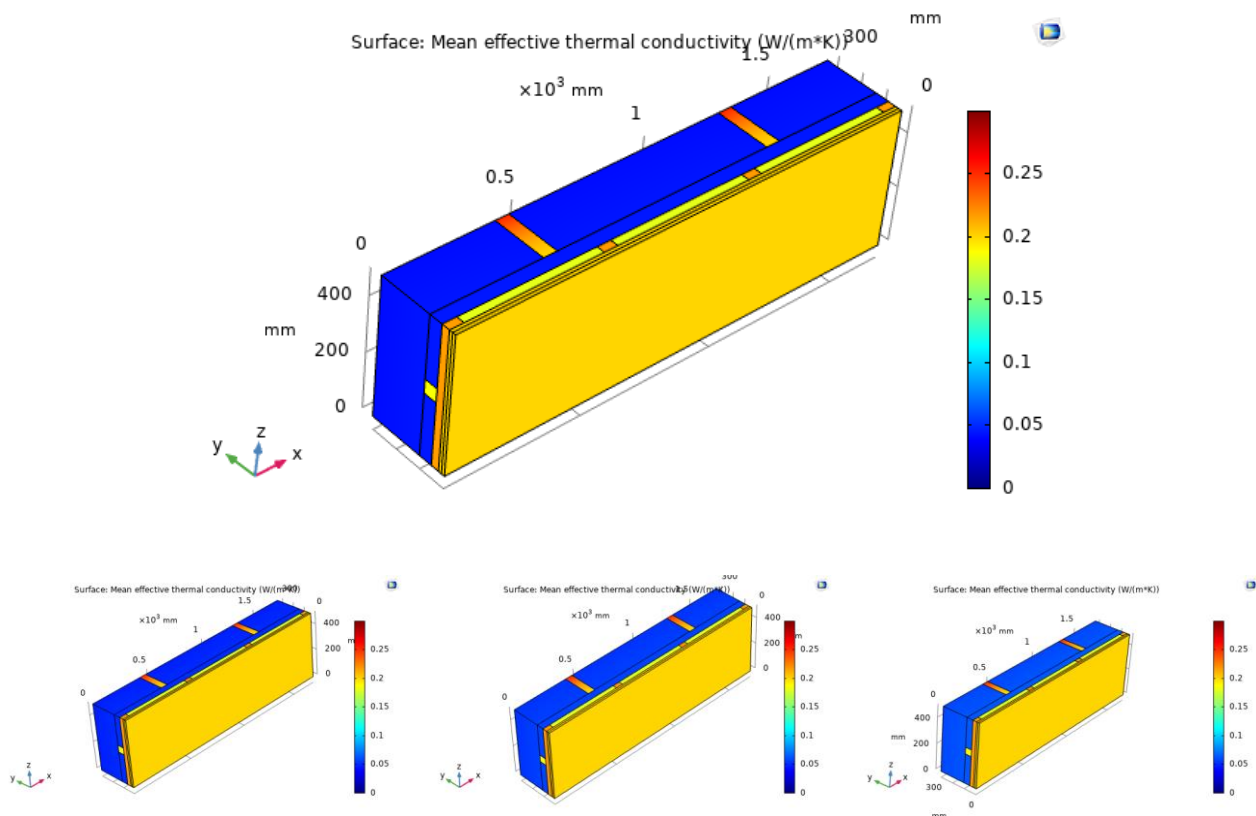
- A tervezettnak megfelelő hőszigetelés $\lambda = 0,037 \text{ W/mK}$ (v2)
- $\lambda = 0,04 \text{ W/mK}$ (sz1)
- $\lambda = 0,045 \text{ W/mK}$ (sz2)
- $\lambda = 0,05 \text{ W/mK}$ (sz3)

A következő táblázatokban a modellek kiosztása ennek megfelelően értelmezendő:

11. táblázat.: Modellek kiosztása

v2		
sz1	sz2	sz3

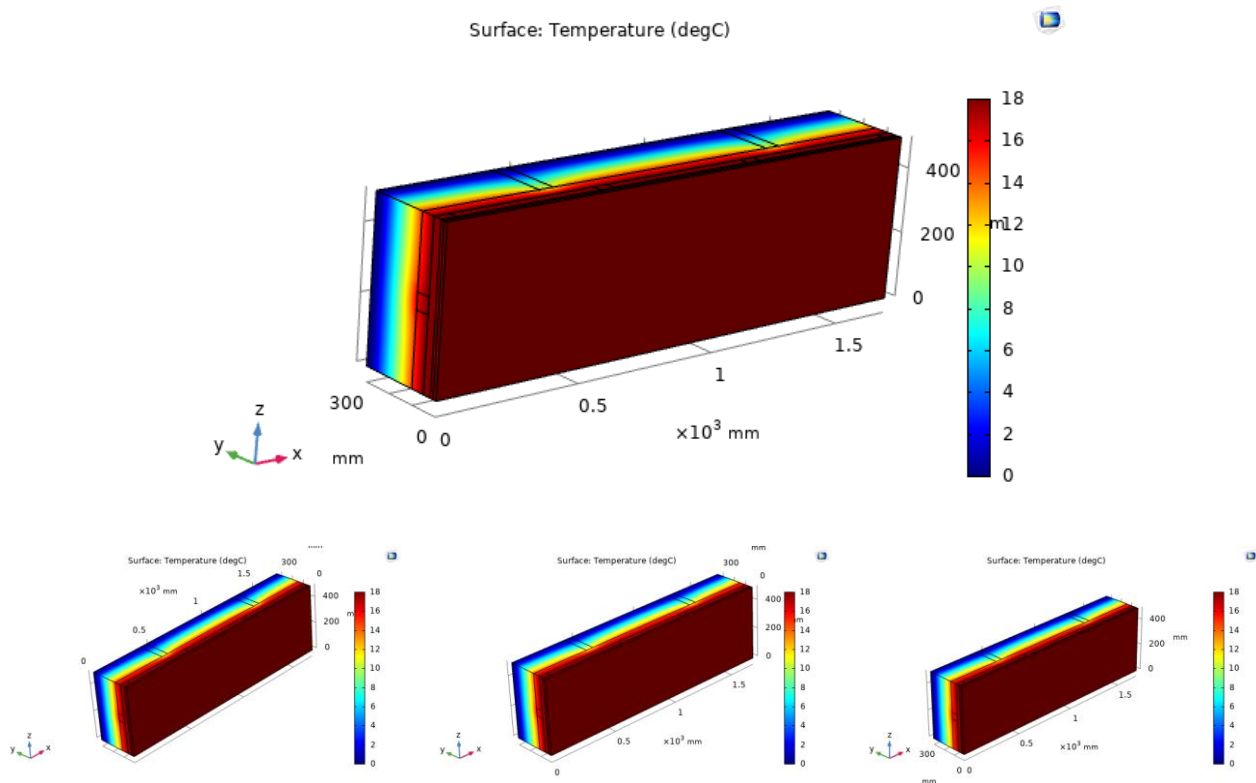
A különböző hővezetőképességű anyagokkal készült modellek láthatóak a következő ábrán.



36. ábra: Hővezetési tényező

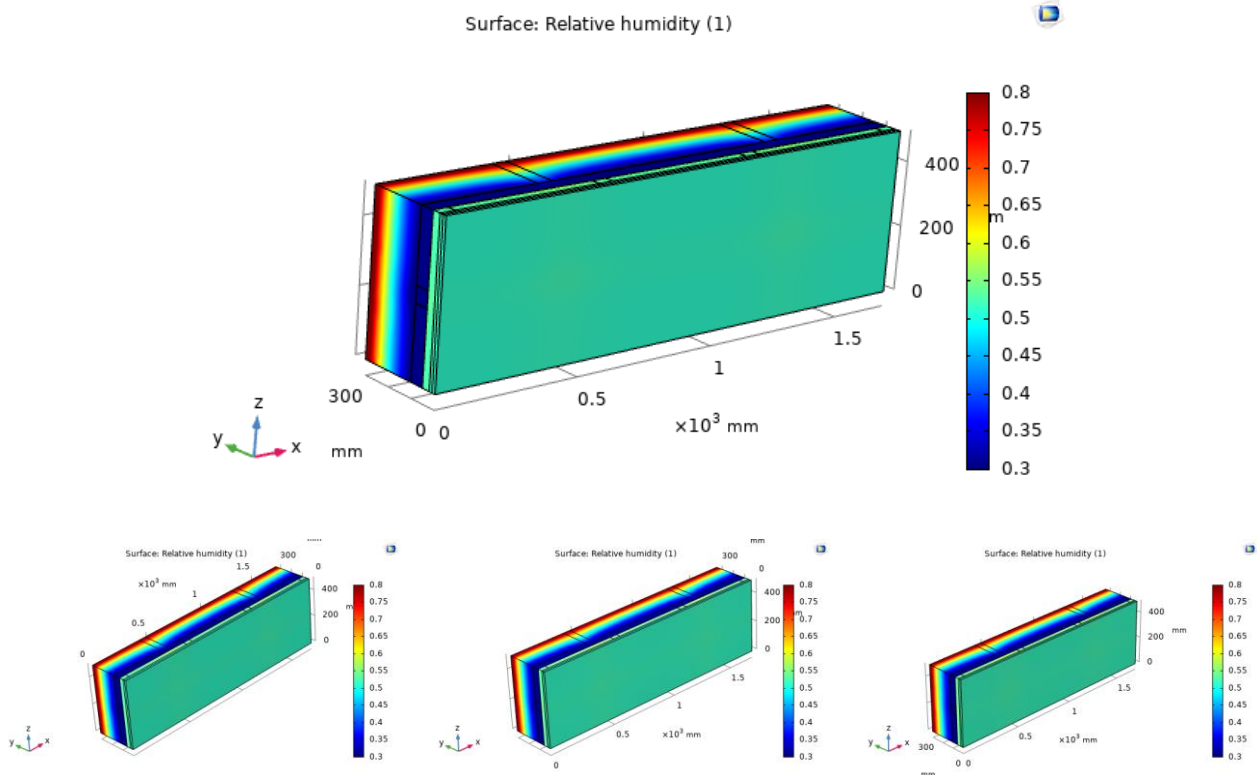
Az 36. ábra eredményein látható hogy a modellben a beállított hőszigetelések egyre gyengébb hővezetési tényezővel rendelkeznek.

Az egyes modellek esetén vizsgálatot végeztem a szerkezetben kialakuló hőmérsékletek kapcsán, melynek eredményei a következő ábrán láthatóak.



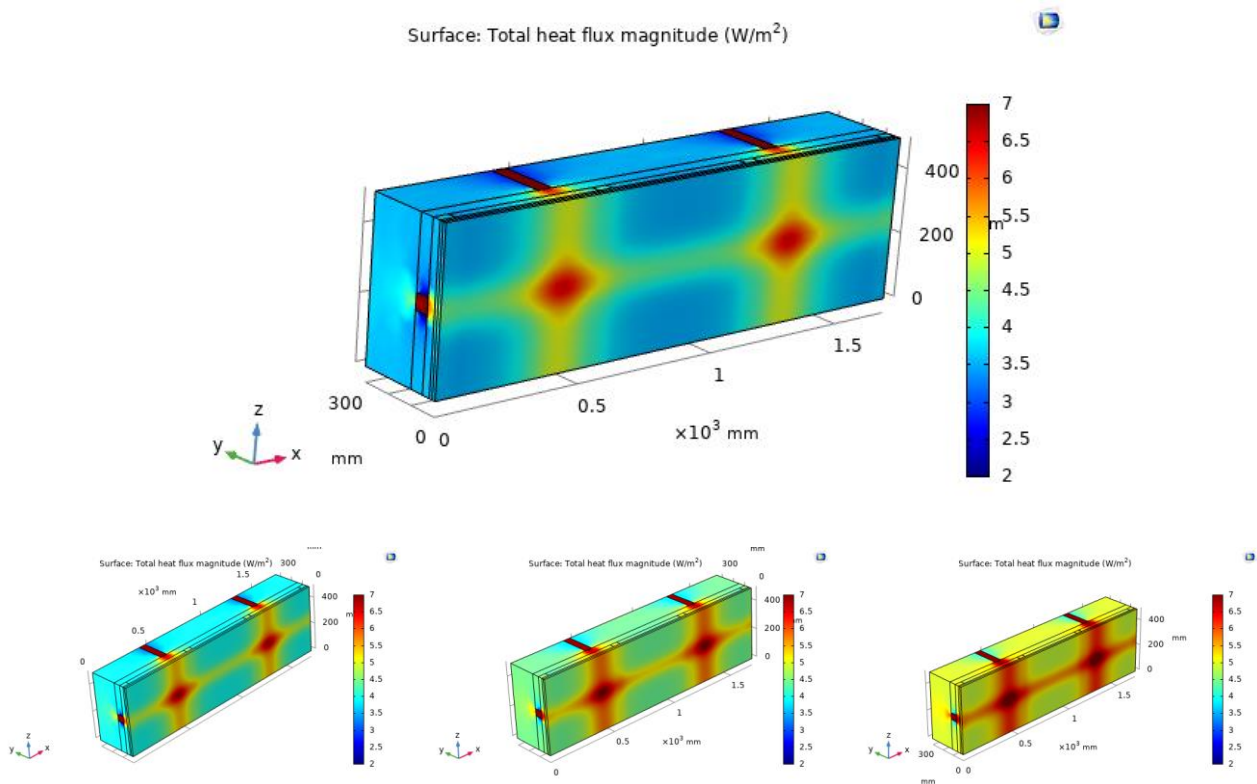
37. ábra: Hőmérséklet

A 37. ábra eredményei alapján, ahogy romlik a hőszigetelés hővezetési tényezője a belső rétegekben kicsit alacsonyabb hőmérsékletek alakulnak ki, mint a jó hőszigetelést tartalmazó esetben. Ennek több káros következménye is lehet, ha a hőmérséklet egy bizonyos érték alá csökken párakicsapódás történik, ami hatására a szigetelőanyag méginkább telítődik nedvességgel és ez jelentősen rontja hővezetési képességét. A belső oldalon kicsit alacsonyabb hőmérsékletek fognak kialakulni, ami a későbbiekben a komfortérzetet igen jelentősen befojásolja.



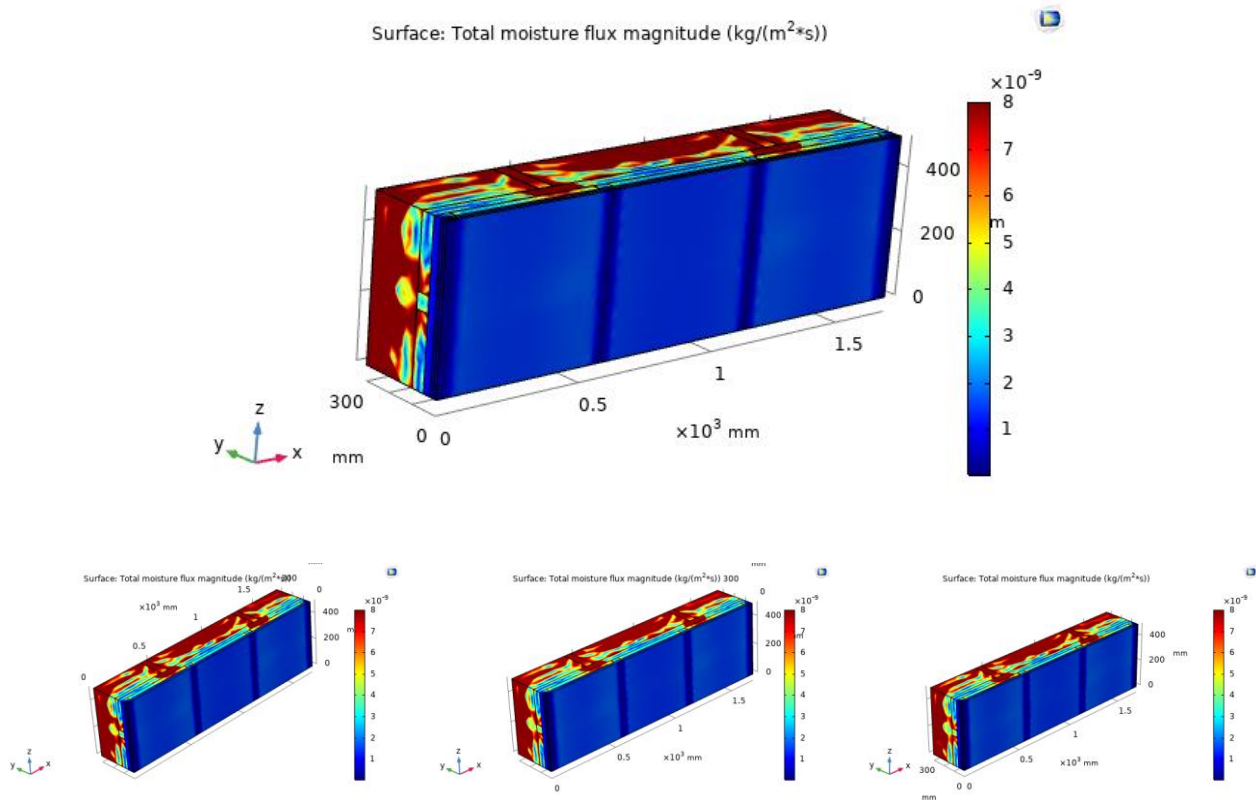
38. ábra: Relatív nedvességtartalom

Relatív nedvességtartalom szempontjából nem látható lényeges különbség a modellek között, így azt mondhatjuk, hogy ebből a szempontból nem releváns ez a hiba.



39. ábra: Hőáramsűrűség

A 39. ábra eredményeiből jól látszik, hogy milyen nagymértékben nő a hőáramsűrűség, ahogy folyamatosan romlik a közetgyapot hővezetési tényezője. A növekvő hőáramsűrűség azt mutatja, hogy az egyes esetekben egyre nagyobb mennyiségű hőt veszünk, mivel folyamatosan romlik a rétegrendünk hőátbocsátási tényezője. Ez a későbbiekben a belső felületen alacsonyabb hőmérsékleteket fog eredményezni, és magasabb fűtésszámlát.



40. ábra: Nedvességáramsűrűség

Nedvességáramsűrűség szempontjából minimális eltérések tapasztalhatók az egyes esetek között, de ezek nem túl számottevőek.

A különböző hővezetési tényezőjű szigetelőanyagok kapcsán készült számítások legfontosabb eredményeit a 12. táblázatban hasonlítottam össze.

12. táblázat: Építési hiba eredmények összehasonlítása

	Átlagos belső hőáramsűrűség [W/m ²]	Hőátbocsátási tényező [W/m ² K]	Hőátbocsátási tényező romlása [%]	Minimális belső felületi hőmérséklet [°C]	f _{Rsi}
v2	<u>4.1415</u>	<u>0.18825</u>	-	<u>19.348</u>	<u>0.98117</u>
sz1	4.5860	0.20845	11	19.318	0.97915
sz2	5.0187	0.22812	21	19.289	0.97719
sz3	5.4406	0.24730	31	19.260	0.97527

A modellek alapján tett megállapításokat jól alátámasztják a 12. táblázat adatai. Szépen látszik, hogy a belső felületi hőáram sűrűség folyamatosan növekszik, a belső felületi hőmérséklet pedig kis mértékben csökken a gyengébb minőségű hőszigetelések hatására. A rétegtrendünk hőátbocsátási tényezőjében nagyon jelentős változás lép fel, 11%, 21%, illetve 31% -os romlás tapasztalható az egyes esetekben. Egy téli fűtési szezonban ez a 31%-os romlás a hőátbocsátási tényező kapcsán igen csak meg tudja emelni a fűtésszámlát.

6.3. Gyengébb minőségű fóliák használata

Szintén a kivitelező spórolása és esetleg hozzá nem értése kapcsán merülhet fel ez a kivitelezési hiba is. Egy jó párazáró fólia, amit ezekben az esetekben a belső oldalra kell elhelyezni a szigetelés védelmének érdekében $S_d = 100$ m-es értékkel rendelkezik általában. Ezeknek a fóliáknak az ára jóval drágább, mint egy egyszerűbb esetleg $S_d = 10$ m-es fóliáénak vagy még rosszabb esetben egy $S_d = 1$ m-es értékű mezőgazdasági fóliáénak. Sok esetben kinézetre nincs nagy különbség a fóliák között, és hozzá nem értő beruházó vagy megrendelő számára egyformának tűnhetnek. Azonban teljesítményben és funkcióban hatalmas a különbség a fóliák között, és ezen különbségeket és ezek hatásait szeretném bemutatni ebben a fejezetben. Kétféle fólia típust hasonlítottam össze a rendszeren kivitelezett jó párazáró fólia esetével:

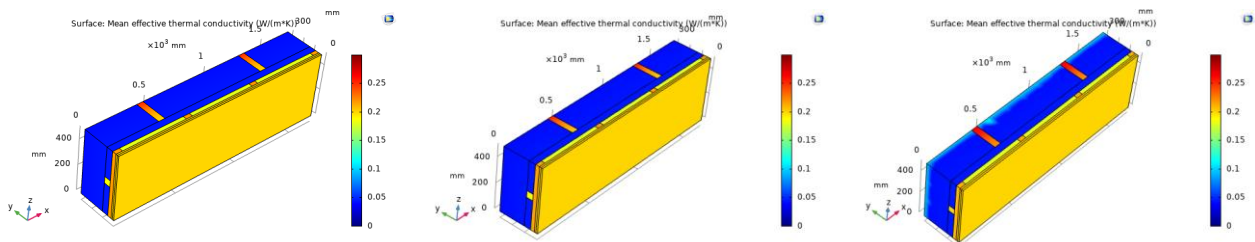
- $S_d = 100$ m, helyesen kivitelezett eset (v2)
- $S_d = 10$ m, gyengébb minőségű fólia (f1)
- $S_d = 1$ m, olcsó mezőgazdasági fólia (f2)

A következő táblázatokban a modellek kiosztása ennek megfelelően értelmezendő:

13. táblázat Modellek kiosztása

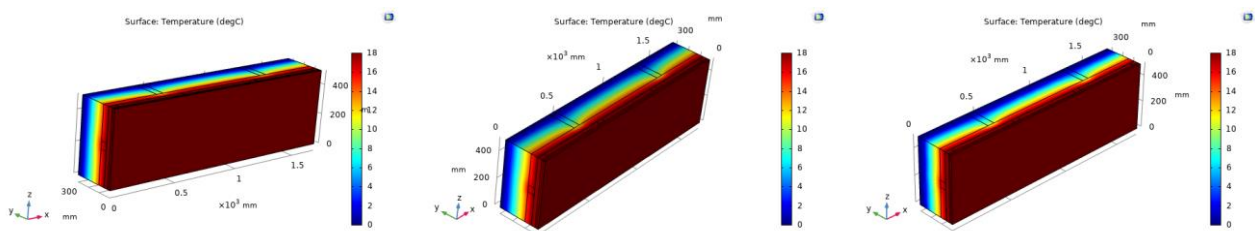
v2	f1	f2
----	----	----

A hővezetési tényező változása szerint ábrázoltam az egyes modelleket a 41. ábrán.



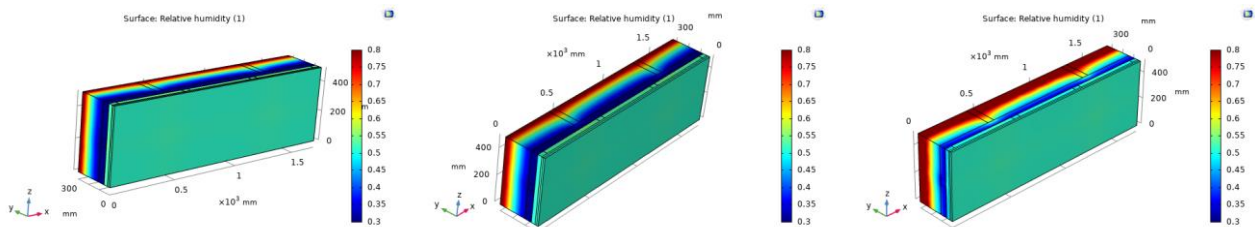
41. ábra: Hővezetési tényező

A fenti ábrákon látható, hogy ahogy romlik a fólia minősége romlik a közetgyapot hővezetési tényezője is, mivel a szerkezet könnyebben átnedvesedik ezért megnő a szigetelésben a nedvességtartalom. A közetgyapot hővezetési tényezője nedvességfüggő így ezzel magyarázható a romlás nagy mértéke.



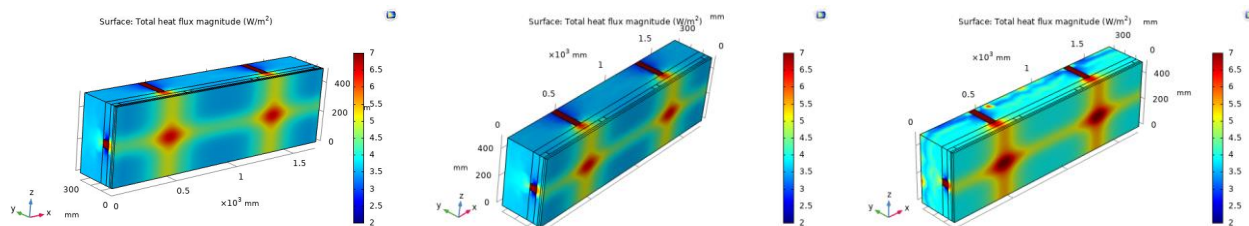
42. ábra: Hőmérséklet

Az egyes rétegek hőmérsékleteiben apró eltérés figyelhető meg, azonban ez nem olyan jelentős változás.



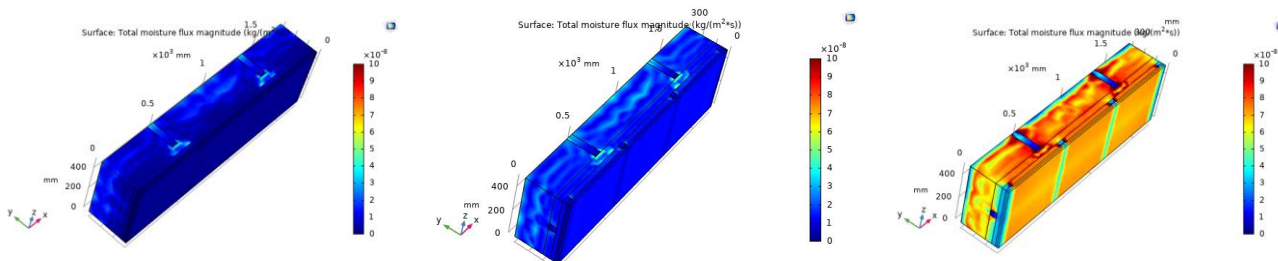
43. ábra: Relatív nedvességtartalom

Megfigyelhetjük, hogy a relatív páratartalom jelentősen megnő a hőszigetelésben a fólia romlásának hatására. Ez az eredmény várható volt, hiszen a gyengébb minőségű fólia jóval könnyebben átengedi a párákat, ezzel feltöltve a hőszigetelést nedvességgel.



44. ábra: Hőáramsűrűség

Az ábra 42. alapján a hőáramsűrűségben jelentős különbségeket fedezhetünk fel, ahogy romlik a fólia minősége, úgy folyamatosan romlik a közetgyapot hővezetési tényezője, mivel a szigetelés átnedvesedik.



45. ábra: Nedvességáramsűrűség

Az eredmények jól mutatják, hogy az egyre gyengébb minőségű fólia mennyivel nagyobb nedvességáram sűrűségeket okoz a szerkezetben. Sajnos ennek hatására a szigetelésünk átnedvesedik és folyamatosan veszít szigetelőképességéből, mivel a hővezetési tényezője romlik. A változás az alapeset és a legrosszabb eset között (első és utolsó ábra) majdnem egy teljes nagyságrendi különbséget jelent.

A különböző fóliák használata esetén történt modellek eredményeit a 14. és 15. táblázatban hasonlítottam össze.

14. táblázat: Építési hiba eredmények összehasonlítása

	Átlagos belső hőáramsűrűség [W/m ²]	Hőátbocsátási tényező [W/m ² K]	Hőátbocsátási tényező romlása [%]	Minimális belső felületi hőmérséklet [°C]	f _{Rsi}
v2	<u>4.1415</u>	<u>0.18825</u>	-	<u>19.348</u>	<u>0.98117</u>
f1	4.1762	0.18983	0.8	19.341	0.98102
f2	4.5962	0.20892	10	19.276	0.97911

15. táblázat: Építési hiba eredmények összehasonlítása

	Kőzetgyapot relatív páratartalom	Kőzetgyapot hővezetési tényező [W/mK]	Hővezetési tényező romlása [%]	Kőzetgyapot víztartalom [kg/m³]
v2	<u>0.52855</u>	<u>0.042367</u>	-	<u>0.10755</u>
f1	0.55572	0.042367	0	0.11347
f2	0.73013	0.050948	20	32.414

A 14. táblázat és 15. táblázat közölt értékei egybevágnak a fenti ábrákon tett megállapításokkal. Jól látható, hogy a belső felületi hőáramsűrűségek növekszenek, a minimális, belső felület hőmérsékletének értéke pedig kis mértékben csökken. A hőátbocsátási tényező a legrosszabb esetben 10% -al növekszik. Ennek oka a szerkezetbe kerülő nedvesség hatás. A kőzetgyapot nedvességgel telítődik, mivel a gyengébb minőségű fóliák több párat engednek át magukon. Ezeket alátámasztják a 15. táblázat adatai miszerint a kőzetgyapotban a víztartalom és így a relatív páratartalom jelentősen megnő, a szigetelésünk hővezetési tényezője 20% -al is romolhat. Az is megfigyelhető, hogy a közepes minőségű fólia $S_d = 10$ m használata esetén nincsenek olyan jelentősen nagy változások, így ez nem okoz olyan hatalmas problémákat.

6.4. Kombinált esetek

Ahogy láthattuk az előző fejezetben az építési hibáknak komolykövetkezmenyei lehetnek, még akkor is, ha csak önmagukban egyesével fordulnak elő. További vizsgálatokat végeztem, hogy milyen hatással van a szerkezetre az, ha ezek az építési hibák esetleg egyszerre fordulnak elő különböző variációkban.

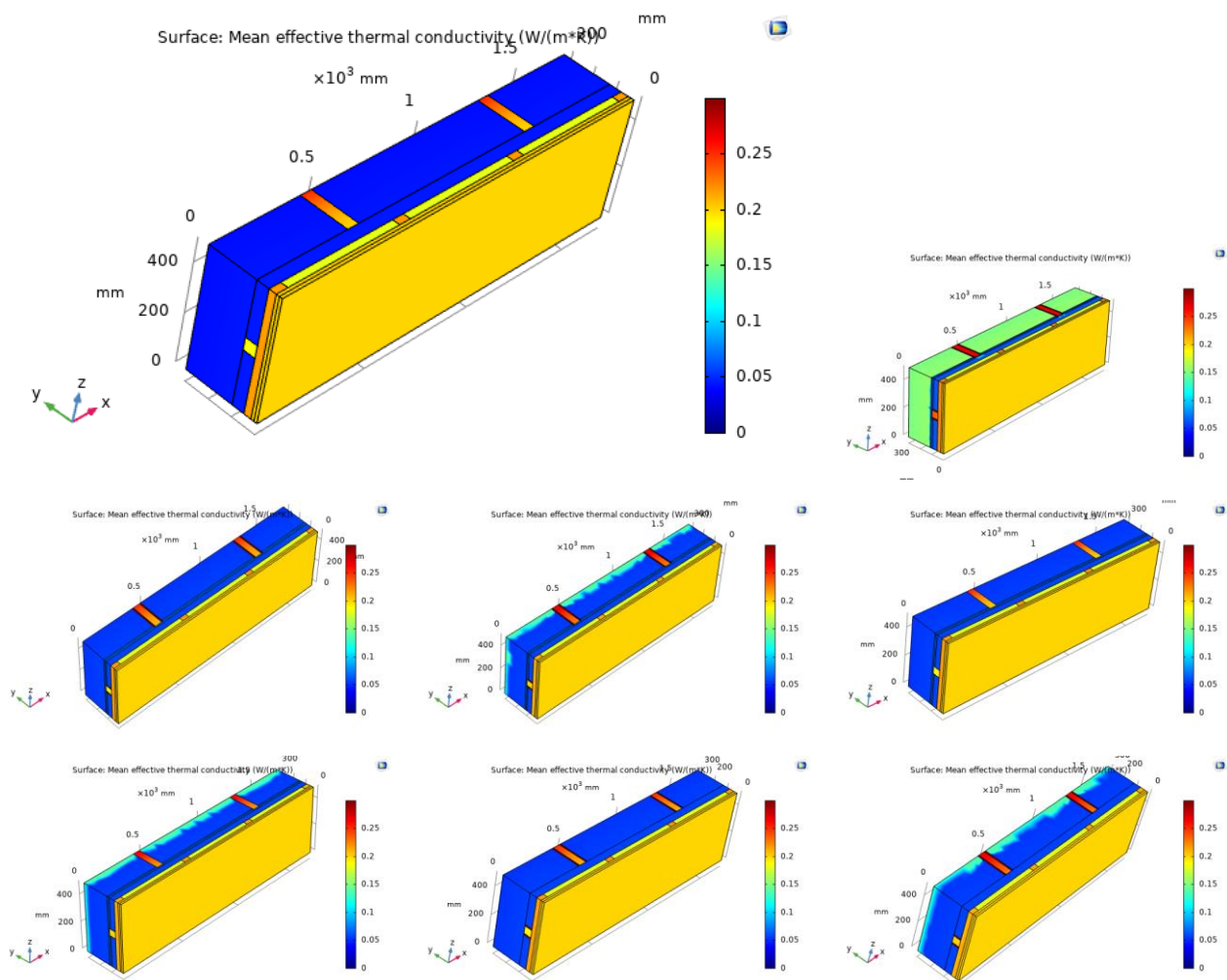
- helyesen megépített szerkezet (v2)
- függőleges és vízszintes hézag mind két rétegben, $S_d = 1$ m, $\lambda = 0,05$ W/mK (k1)
- függőleges és vízszintes hézag mind két rétegben, $S_d = 10$ m, $\lambda = 0,045$ W/mK (k2)
- függőleges és vízszintes hézag mind két rétegben, $S_d = 1$ m, $\lambda = 0,045$ W/mK (k3)
- vízszintes hézag mind két rétegben, $S_d = 10$ m, $\lambda = 0,045$ W/mK (k4)
- vízszintes hézag mind két rétegben, $S_d = 1$ m, $\lambda = 0,045$ W/mK (k5)
- függőleges hézag mind két rétegben, $S_d = 10$ m, $\lambda = 0,045$ W/mK (k6)
- függőleges hézag mind két rétegben, $S_d = 1$ m, $\lambda = 0,045$ W/mK (k7)

A következő táblázatokban a modellek kiosztása ennek megfelelően értelmezendő:

16. táblázat: Modellek kiosztása

v2		k1
k2	k3	k4
k5	k6	k7

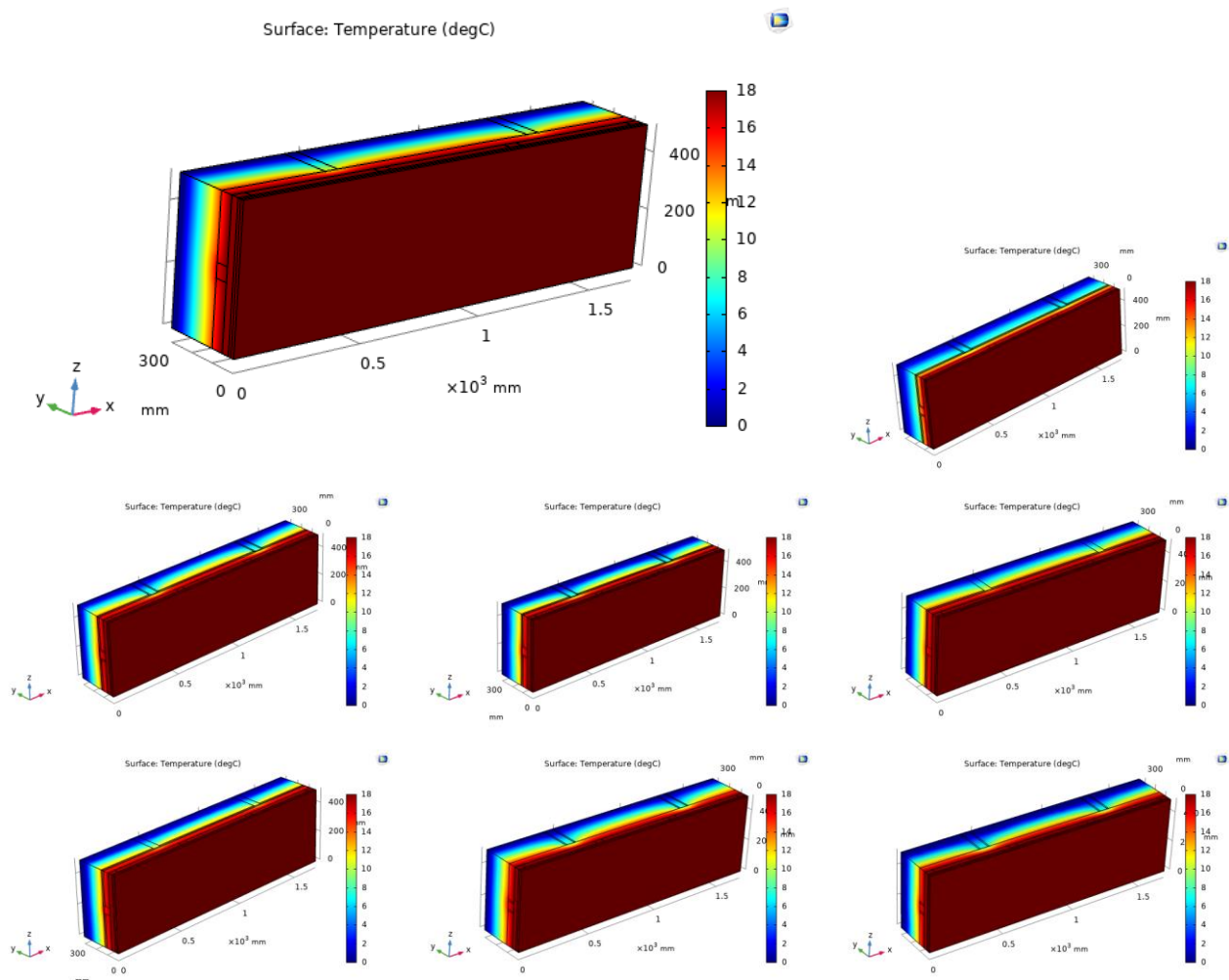
A kombinált eseteknél a 46. ábra jól mutatja az egyes anyagok hővezetési tényezőjében történő változásokat.



46. ábra Hővezetési tényező

A szerkezetek hővezetési szempontjából jól látható az 46. ábra eredményein hogy a k1 verzió ami minden építési hibával terhelt a leg rosszabb. Jól látszódik itt is a különböző fóliák használata közötti különbség is. Amelyik esetekben $S_d=1\text{m}$ teljesítményű fóliát használtunk azokban az esetekben a hőszigetelés hővezetési tényezője jelentősen csökken ennek oka a szigetelés nedvességfüggő tulajdonsága.

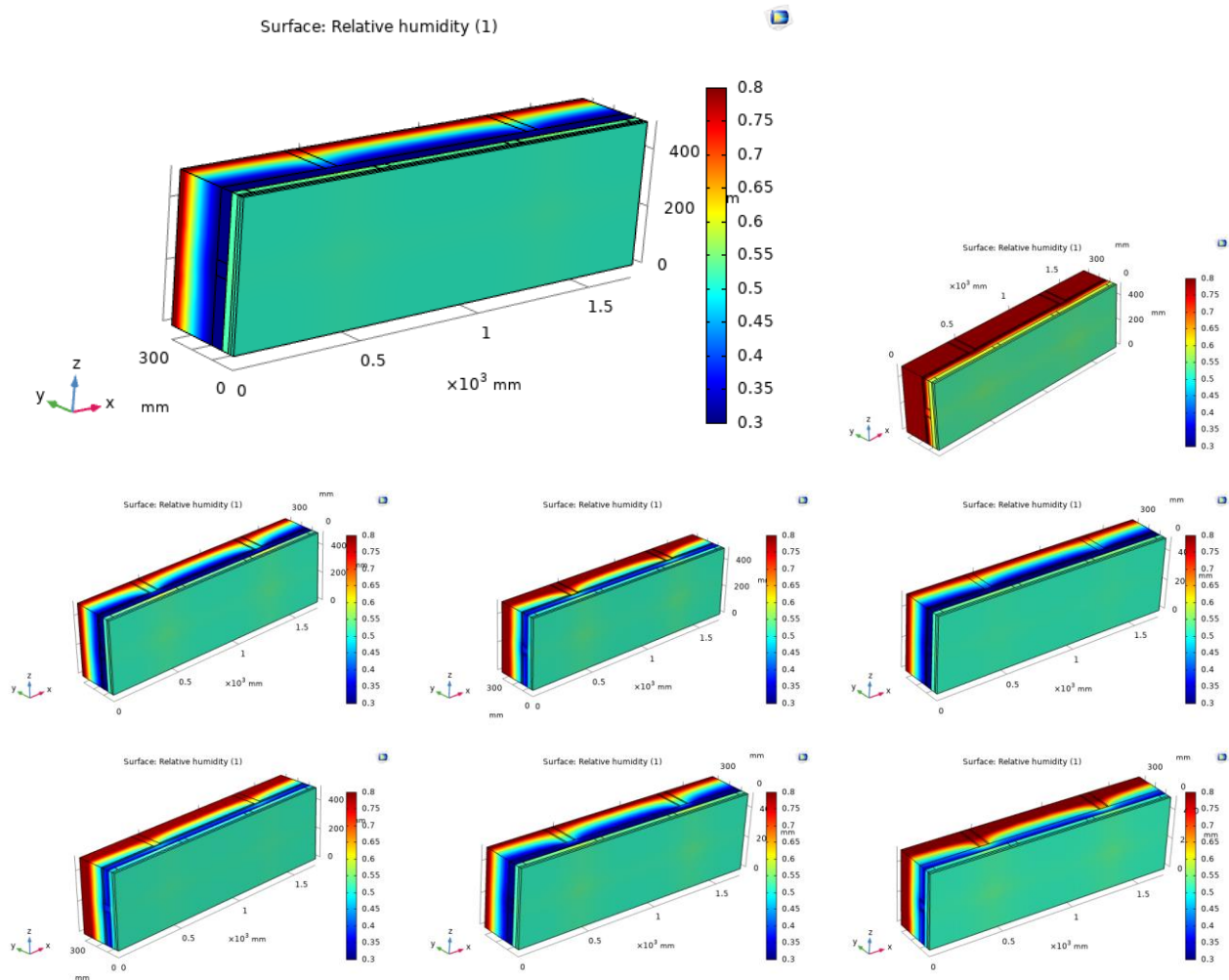
A szerkezetben fellépő különböző hőmérsékleteket szeretném bemutatni az egyes esetekben.



47. ábra: Hőmérséklet

A hőmérséklet eloszlások is jelentősen különböznek, főleg a legelső esetben k1 amikor is a leggyengébb hőszigetelést használjuk, a szerkezet több helyen hézagos és a fólia is a leggyengébb minőségű. Megállapítható hogy ebben az esetben jóval alacsonyabb hőmérsékletek alakulnak ki már magában a hőszigetelésben is. Ez a későbbiekben komoly problémákhoz vezethet, hiszen az alacsonyabb hőmérsékleten a pára kicsapódik és ez mégjobban rontja hőszigetelésünk tulajdonságait. Az is jól megfigyelhető, hogy amely esetekben van függőleges hézag a szerkezetekben, ott az alacsonyabb hőmérsékletek beljebb kúsznak a szarufa mentén mint ahol ezek nincsenek jelen.

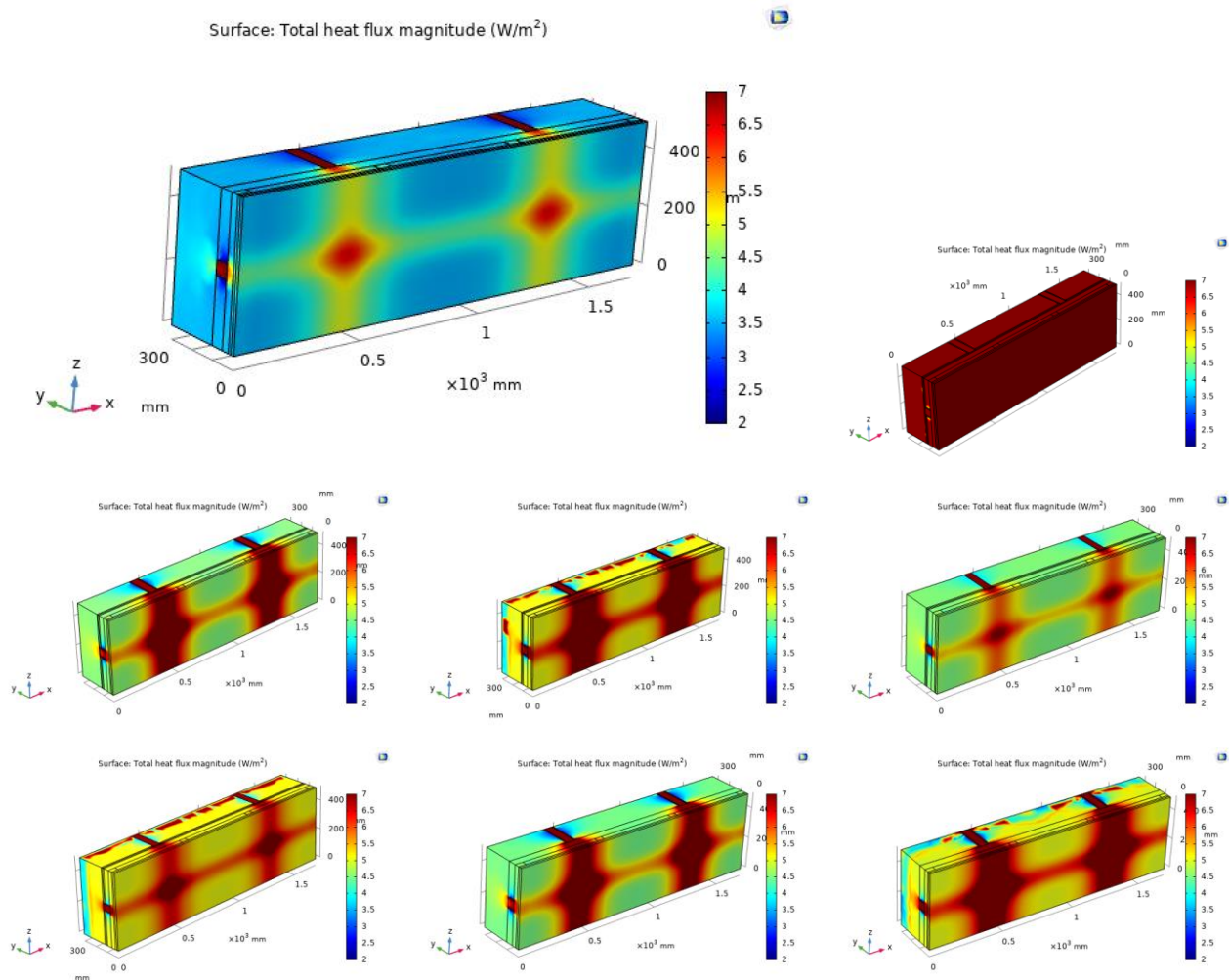
A rétegrend relatív nedvességtartalmára vonatkozó értékek az egyes esetekben a 48. ábrán vannak összehasonlítva.



48. ábra: Relatív nedvességtartalom

A szerkezetek relatív nedvességtartalma közötti különbségek is nagyon szépen látszódnak az 48. ábra eredményein. Megint csak a legrosszabb kialakítással kezdeném mivel ebben esetben gyenge a fólia, rossz a hőszigetelés, és sok a hézag, a szerkezet jelentősen telítődik nedvességgel. Itt is megfigyelhető a különbség ha csak a hézag elhelyezkedése változik (k3 és k7 ezekben az esetekben függőleges hézag jelenik meg) jóval magasabb nedvességtartalmak alakulnak ki a szarufák mentén, mint azokban az esetekben amikor a szerkezet csak vízszintes hézagot tartalmaz. Tehát nedvességtartalom szempontjából mind a hézagoknak mind pedig a fólia típusának igen jelentős szerepe van. A nedvességtartalom pedig szoros kapcsolatban van a közetgyapot hőszigetelőképességével (ezt az 46. ábra eredményei is alátámasztják), ennek oka a szigetelőanyag nedvességfüggő hővezetési tényezője. Amennyiben romlik a szigetelésünk hőtechnikai értéke, jelentősen megnő a hőátbocsátási tényezői is a teljes rétegrendre.

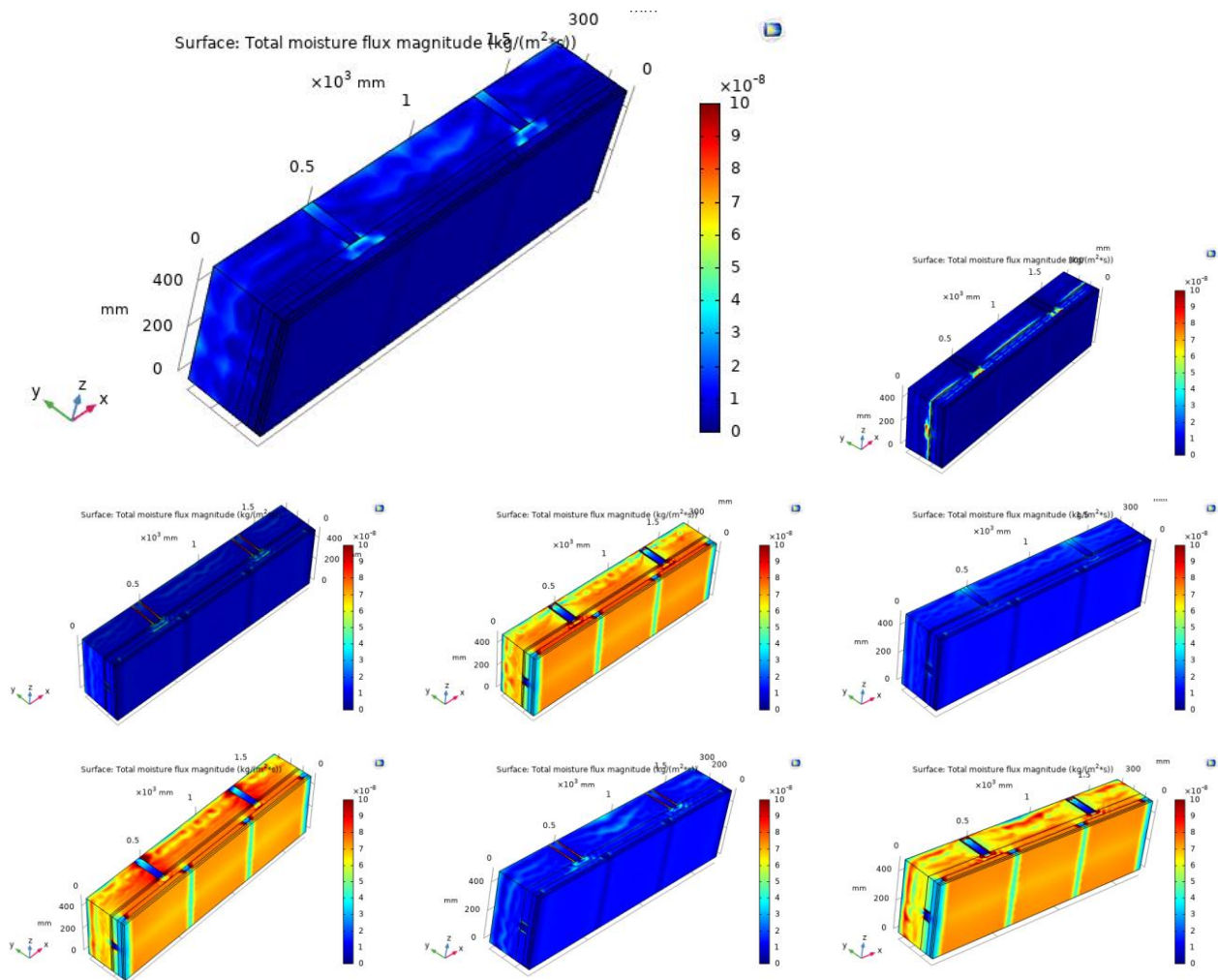
A kombinált esetek modellezése során készült hőáramsűrűsége vonatkozó eredményeket a 49. ábrán hasonlítottam össze.



49. ábra: Hőáramsűrűség

Talán a legszemléletesebb különbségeket a hőáramsűrűség változásáról készült képek mutatják meg (49. ábra). A legelső eset megint csak jelentősen elüt a többitől, hiszen ez van leg több hibával terhelve és a leggyengébb minőségű anyagokból elkészítve. Továbbá, amelyek esetekben az $S_d=1\text{m}$ teljesítményű fóliát használtuk (k3, k5, k7) Jóval jelentősebb hőáramok alakulnak ki, ennek oka továbbra is a jelentős nedvességtartalom változása a hőszigetelésben, ami nagymértékben rontja a hővezetési tényezőjét, és ezzel jelentősen befolyásolva a teljes rétegrend hőátbocsátási tényezőjét. A hézagok elhelyezkedése is jelentősen befolyásolja az eredményeket, ez is jól látszódik a fenti ábrán, amelyek esetekben függőleg hézag lett hagyva, a hézagok mentén szintén megnövekszik a hőáramsűrűség, így ezeken a kis csatornákon rengeteg hőt veszítünk el folyamatosan.

A nedvességáramsűrűséget is vizsgáltam a kombinált eseteknél, melynek eredményei az 50. ábrán láthatóak.



50. ábra: Nedvességáramsűrűség

Mint az az ábra 48. eredményein szembevetően látszik, nedvességáram szempontjából legjelentősebb szerepe a különböző fóliáknak van. De ez nem meglepő, a k3, k5, k7 esetekben az $S_d=1$ m-es fólia használata miatt jóval jelentősebb nedvességáramok jönnek létre, mely s szimulációkon nagyon jól látszik, sárga színnel. Itt talán a legjelentősebb különbséget valóban ez adja, és ez visszavezethető a már előzőekben elemzett 48. ábra relatív nedvességtartalom és 46. ábra hővezetési tényező eredményeire. Ha növekszik a nedvességáram sűrűség, a nedvesség jobban áramlik a szerkezetben, ettől megnő az egyes rétegek, anyagok relatív nedvességtartalma. Ha nő nedvességtartalom az anyagban, akkor romlik a hővezetési tényezője, ez kifejezett igaz az esetünkben alkalmazott kőzetgyapotra is.

Az eredmények elemzéséhez összefoglaló táblázatot készítettem mely a kombinált esetekre vonatkozó legfontosabb értékeket tartalmazza.

17. táblázat: Építési hiba eredmények összehasonlítása

	Átlagos belső hőáramsűrűség [W/m ²]	Hőátbocsátási tényező [W/m ² K]	Hőátbocsátási tényező romlása [%]	Minimális belső felületi hőmérséklet [°C]	f _{Rsi}
v2	<u>4.1415</u>	<u>0.18825</u>	-	<u>19.348</u>	<u>0.98117</u>
k1	9.5389	0.43359	130	18.615	0.95664
k2	5.8777	0.26717	42	18.948	0.97328
k3	6.4188	0.29176	54	18.870	0.97082
k4	5.1168	0.23258	24	19.280	0.97674
k5	5.6937	0.25881	37	19.201	0.97412
k6	5.7869	0.26304	40	18.952	0.97370
k7	6.3713	0.28960	54	18.868	0.97104

A 17. táblázat eredményei is nagyon szépen mutatják az ábrák elemzése kapcsán felvetett problémákat. Az átlagos belső hőáramsűrűség igen változó az egyes eltérő esetekben, azonban mindig jóval nagyobb mint az alap helyesen megépített szerkezetnél. Szóval minden hibás megépítés esetén jóval nagyobb hőmennyiségeket veszítünk folyamatosan. A minimális belső felületi hőmérsékletekben szintén vannak eltérések, a legjelentősebb eltérés körülbelül 1,2 °C ami azért egy felület szempontjából nem kevés. Az egyes rétegrendek hőátbocsátási tényezőjében hatalmas különbségeket fedezhetünk fel, ennek okai az építési hibák. A hézagok mentén megnövekszik a hőáram mivel a levegő hővezetési tényezője jóval magasabb a hőszigetelésénél, a gyengébb fólia alkalmazásának hatására átnedvesedik a szerkezet, ez nagymértékben befolyásolja a hőszigetelés és az egyes anyagok hővezetési tényezőjét, és természetesen ha mindezen hibák mellett még a legrosszabb minőségű kőzetgyapotot is alkalmazzuk akkor ezen problémák együttes hatása hatalmas lesz.

Vizsgálatot végeztem kifejezetten a hőszigetelésben jelentkező nedvesség kapcsán melynek eredményeit a 18. táblázatban összegeztem.

18. táblázat: Építési hiba eredmények összehasonlítása

	Kőzetgyapot relatív páratartalom	Kőzetgyapot hővezetési tényező [W/mK]	Hővezetési tényező romlása [%]	Kőzetgyapot víztartalom [kg/m³]
v2	<u>0.52855</u>	<u>0.042367</u>	-	<u>0.10755</u>
k1	1.3738	0.13685	223	193.40
k2	0.52771	0.054742	29	0.10769
k3	0.69916	0.067623	60	37.783
k4	0.51968	0.054817	29	0.10601
k5	0.69524	0.067501	60	37.277
k6	0.51464	0.054848	29	0.10493
k7	0.69170	0.067877	60	38.240

Sokszor említettem már az eddigi ábra illetve táblázat eredményeinek értékelése közben, a hőszigetelés nedvességfüggő hővezetési tényezőjének problémáját. A 18. táblázat eredményi alapján kijelenthetjük, hogy ez a probléma valóban jelen van a szerkezetekben és mértéke kicsit sem elhanyagolható. Az egyes esetekben, ahogy változott a párazáró fólia típusa illetve a hézagok elhelyezkedése, változott a hőszigetelésünk relatív pára és víz tartalma is. Jól látszódik hogy a nedvesség megjelenése a szerkezetben milyen nagy mértékű romlásokat eredményezett a kőzetgyapot hővezetési tényezőjében.

7. Összegzés

Manapság egyre több tetőtér beépítés történik, illetve az újépítésű házaknál már eleve beépített tetőtérrel tervezik meg az épületeket. A dolgozatomban a tetőtéri beépítések kapcsán felmerülő építési hibákból adódó problémákat vizsgáltam a tetőrétegrend kialakítása kapcsán. Sajnos ezek az építési hibák nagyon is jelen vannak manapság az építőiparban.

Számításaim során sok esetet vizsgáltam meg a beépítéssel, a párazárással és anyagminőséggel kapcsolatban. Minden esetben arra a következtetésre jutottam, hogy ezek a hibák nagyon nagymértékben rontják a későbbiekben az egyes rétegrendek hőtechnikai tulajdonságait. A hibák nagyrésze nagyon könnyen kiküszöbölhető lenn, csak egy kis odafigyelésre és szakképzettségre lenne hozzá szükség.

Az általam elemzett hibák sokszor fel se tűnnek és nem is az első pillanattól jelentenek problémát, hanem sokszor csak a későbbiekben a folyamatos használat során.

Dolgozatomban kapcsolt hő- és nedvességtranszport modellezésen alapuló módszert alkalmaztam, mely során meghatároztam az egyes esetekben a rétegrendek hő- és nedvességátbocsátó képességét. A szimuláció alkalmazásával könnyen vizualizálhatóak a hő- és nedvességáramlás területek. A felújítási változatoknál megfigyelhettük, hogy a szerkezet hőátbocsátási tényezőjére jóval magasabb értékeket kapunk ha a hő- és nedvesség transzportot egyszerre vizsgáljuk, mint ha csak hőtechnikai szimulációt végeznénk.

Az építési hibáknál bemutattam a legjelentősebb előforduló hibákat. Számításokkal alátámasztottam hogy mekkora jelentősége van a pontos beépítésnek, és a megfelelő anyaghasználatnak. Az is kiderült hogy ezek a hibák már önmagukban külön-külön is hatalmas problémákat tudnak okozni a szerkezetben, azonban ha halmozzuk őket ez a hatás többszörösére fog nőni.

Azt gondolom ezekre a hibákra nagyon érdemes a kivitelezés során odafigyelni, és nem érdemes itt spórolni rajta mert a későbbiekben sokkal nagyobb bajokhoz vezetnek ezek az apróságok. Nem beszélve arról, hogy a fűtésszámlánk jelentősen növekedni fog, még az egyes szerkezetek kijavításának árát is ki kell fizessük.

8. Köszönetnyilvánítás

Sok hálával és köszönettel tartozom a Budapesti Műszaki Egyetem Építőmérnöki Karának, hogy a sokéves tanulmányaim során mindenben segítettek és támogattak. Szeretnék köszönetet mondani a tanszékeknek, tanárainknak és oktatóimnak, hogy saját tudásukat átadva vezettek végig az úton, és segítettek elmélyíteni a tudást. Külön köszönöm konzulensemnek, Dr. Nagy Baláznak a rengeteg segítséget, hogy hétről hétre támogatott a konzultációk során, és mindig rendelkezésre állt, ha kérdésem volt a téma kapcsán.

Szeretnék köszönetet mondani az Építőanyagok és Magasépítés tanszéknek, hogy rendelkezésemre bocsátotta a tanszék számítógépét a modellek futtatásához mely a következő pályázatnak köszönhető: Az „Épületek és épületszerkezetek életciklus- és épületfizikai szemléletű optimalizációja komplex numerikus modellezéssel” című, FK 128663 számú projekt a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból biztosított támogatással, az FK_18 pályázati program finanszírozásában valósult meg. A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a BME FIKP-VÍZ tématerületi programja keretében.

9. Irodalomjegyzék

- [1] <https://www.rockwool.hu/alkalmazasi-teruletek/tetoterek-szigetelese/> (2019.10.15)
- [2] <https://kreativlakas.com/magasepiteszet/magastetok-felepitesi/> (2019.10.15)
- [3] <https://kreativlakas.com/magastetok/faszerkezetu-magastetok/> (2019.10.15)
- [4] dr.Tóth Elek DLA, egyetemi docens, BME. Magasépítési Tanszék: Épületek rekonstrukciós tervezése – MSc BMEEOMEMAT3 Magastetők felújítása - jegyzet
- [5] <http://www.arc.sze.hu/epszerkea/magastet.htm> (2019.10.15)
- [6] http://www.euroof.hu/admin/upload/Knauf%20Insulation/Prospektusok/Magastetok_szigetelése.pdf (2019.10.15)
- [7] <https://net.jogtar.hu/jogszabaly?docid=a0600007.tnm> (2019.10.15)
- [8] https://www.rockwool.hu/alkalmazasi-teruletek/tetoterek-szigetelese/hoszigeteles-a-szarufak-kozott-es-alatt/?selectedCat=magastetok%20hoszigetelese* (2019.10.15)
- [9] <https://www.knaufinsulation.hu/alkalmaz%C3%A1s/magastetok> (2019.10.15)
- [10] <https://www.rockwool.hu/alkalmazasi-teruletek/tetoterek-szigetelese/szarufak-feletti-hoszigeteles/> (2019.10.15)
- [11] https://www.bramac.hu/fileadmin/rootBramac/bramac_hungary/Online_Service/Downloadbereich/2018/Kiadvanyok/BRAMAC_therm_utmut_2012.pdf (2019.10.15)
- [12] MSZ EN ISO 10456:2008 Építési anyagok és termékek. Hő- és nedvességtechnikai tulajdonságok. Táblázatos tervezési értékek, eljárások minősítési és tervezéshőtechnikai értékek meghatározására (ISO10456:2007)
- [13] WUFI PRO 6.0 szoftver anyagadatbázisa
- [14] <https://tetofutar.hu/fenyo-fureszaru/gerendak/gerenda-10x10x400-cm> (2019.10.15)
- [15] <http://www.norlandfatelep.hu/termek/gipszkarton-lap-tuzgatlo-1200x2000x125mm/> (2019.10.15)
- [16] <https://www.rockwool.hu/termekeink/tetotermagasteto/Deltarock/?selectedCat=m%C5%B1szaki%20inform%C3%A1ci%C3%B3#%C3%81ttekint%C3%A9s> (2019.10.15)
- [17] https://www.bramac.hu/fileadmin/rootBramac/bramac_hungary/Online_Service/Downloadbereich/2017/BRAMAC_therm_17_01.pdf (2019.10.15)
- [18] 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet az épületenergetikai jellemzők meghatározásáról, <http://www.njt.hu>
- [19] 76/2008. (VI. 30.) Korm. rendelet az épületenergetikai jellemzőinek tanúsításáról, <http://ww.njt.hu>
- [20] MSZ EN 24 140:1015 Épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számítása
- [21] Dr. habil Stocker György, Nagy Balázs: Magyar építőipar 2018.05-06. Nedvességhidak az épületszerkezetekben 168-171 o.

- [22] Nagy Balázs: Megtérülő energetika 2014. november-december A hőhidak, meghatározásuk módszerei és hatásuk az épületek energiaveszteségeire 44-48 o.
- [23] Dr. CsanakyJudit Emília egyetemi adjunktus – Épületfizika MsC - A rétegtervi hőátbocsátási tényező meghatározása
- [24] Nagy Balázs, Szagri Dóra, Dr. Tóth Elek Megtérülő épületenergetika 2017 január-február Dinamikus hő- és nedvességtranszportszimulációk alapjai 33-39 o.
- [25] MSZ EN 15026:2007
- [26] Comsol Multiphysics 5.3a felhasználói kézikönyv, 2017.
- [21] WUFI PRO 6.0 szoftver anyagadatbázisa
- [27] Nagy Balázs, Tömböly Cecília - NYÍLÁSZÁRÓ BEÉPÍTÉSEK HIGROTERMİKUS (KAPCSOLT HŐ- ÉS NEDVESSÉGTRANSPORT) ELEMZÉSE NUMERİKUS SZIMULÁCIÓK SEGÍTSÉGÉVEL