

Petresevics Fanni¹, Fürtön Balázs², Nagy Balázs³

ÁTSZELLŐZTETETT HOMLOKZATBURKOLAT BIM-ALAPÚ ÉPÜLETFIZIKAI MODELLEZÉSE

BIM-BASED BUILDING PHYSICAL MODELLING OF A VENTILATED FAÇADE CLADDING

KIVONAT / HUN

Kutatásunkban egy többszintes épület átszellőztetett homlokzatburkolatának BIM-alapú épületfizikai modelljét készítettük el, amely segítségével meghatároztuk az épületburok hőtechnikai teljesítőképességét. Általunk kidolgozott, OpenBIM-alapú munkafolyamatot alkalmaztunk, melyet cikkünkben részletesen bemutatunk. Miután elkészült a megfelelően használható munkafolyamat és lefuttatuk az épületfizikai numerikus modelleket, meghatároztuk a tartókonzolok és a hőszigetelés tartó dübelek hőtechnikai hatását is. Annak érdekében, hogy kiértékeljük a BIM-alapú eredményeket, szabvány szerinti számításokkal és egyszerűsített módszerrel is meghatároztuk és összehasonlítottuk a BIM-alapú modellezéssel meghatározott hőátbocsátási tényezőket. Az eredményeink azt mutatták, hogy ugyan jelenleg az európai szabványok nem tartalmazznak a rögzítőrendszerek hatásait is figyelembe vevő egyszerűsített számítási módszereket, ezek elhanyagolásával jelentősen alábecsülhetjük a pontbeli hőhidak hatását és így a szerkezetre számított rétegtervi hőátbocsátási tényező értékét. Ezért javasoljuk, hogy átszellőztetett homlokzatburkolatok épületfizikai számítása során szükségszerűen alkalmazzunk numerikus modellezést az alátétszerkezet hatásainak számítására vagy numerikus modellezésen alapuló hőhídkatalógusokat.

Kulcsszavak: épületinformációs modellezés és menedzsment, épületfizika, épületenergetika, homlokzattervezés

ABSTRACT / ENG

In our research, a BIM-based building physics model of the ventilated facade cladding of a multi-story building was developed to determine the thermal performance of the building envelope. An OpenBIM-based workflow was created by us and is described in detail in this paper. After we had the workflow that we could appropriately use and performed the building physical analyses of the numerical models, we also determined the thermal performance of the supporting brackets and the dowels that hold the insulation in place. To evaluate the BIM-based results, we used a simplified method to compare the heat transfer coefficients obtained by BIM-based modelling. Our results showed that, although currently European standards do not include simplified calculation methods that consider the effects of anchoring systems, neglecting them can significantly underestimate the effect of point thermal bridges and thus the value of the thermal transmittance calculated for the building envelope. Therefore, it is recommended that numerical modelling for calculating the effects of the substructure or thermal bridging catalogues based on numerical modelling should be used as a necessary tool in the building physics calculation of ventilated façade claddings.

Keywords: building information modelling and management, building physics, energy in buildings, facade design

¹ építőmérnök, demonstrátor, BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, e-mail: petresevics.fanni@edu.bme.hu

² okl. építészmérnök, doktorandusz, BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, e-mail: furton.balazs@emk.bme.hu

³ okl. szerkezet-építőmérnök, PhD, adjunktus, BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék, e-mail: nagy.balazs@emk.bme.hu

1. | BEVEZETÉS

Jelenleg az építőipar az egyik legkevésbé digitalizált iparágak közé tartozik, továbbá az emberi károsanyag-kibocsátás egyik legjelentősebb forrása. Ennek kiküszöbölésére az elmúlt évtized során, valamint a 4. ipari forradalomnak köszönhetően az építőiparban egyre elterjedtebb az építmény-információs modellezés (BIM) használata, amely alapvető szerepet játszik a szektor digitalizációjában, így a tervezőasztal és az építési helyszín közötti hiányosságok áthidalásában is.

A szerelt, hátul szellőztetett homlokzatburkolati rendszerek tervezési folyamata a szakmában még szinte kizárólag CAD szoftverek felhasználásával történik, a komplex részletek kidolgozása legritkább esetekben valósul meg BIM alapon. Ezen részletek, illetve maga a homlokzati kialakítás épületfizikai tervezése leggyakrabban csak egyszerűsített módszerekkel, vagy ritkább esetben a részletek különálló numerikus modellezésével történik. Ezáltal a teljes átszellőztetett homlokzatburkolati rendszer együttes viselkedését nem modellezzük, így a rögzítőrendszer optimális tervezése is nehezen képzelhető el, amennyiben nem készül kiegészítő BEM (Building Energy Modelling: épületenergetikai modell) a teljes szerkezettről.

Az átszellőztetett homlokzatburkolati rendszerek jelentős figyelmet kaptak az elmúlt években [1], ugyanis kedvező hőtechnikai tulajdonságaikon felül számos más előnyös tulajdonságokkal is bírnak, emiatt előszeretettel használják főleg energiahatékonysági célú felújítások, valamint új építésű irodaházak kivitelezésekor. Az **1. ábra** egy prágai technikum

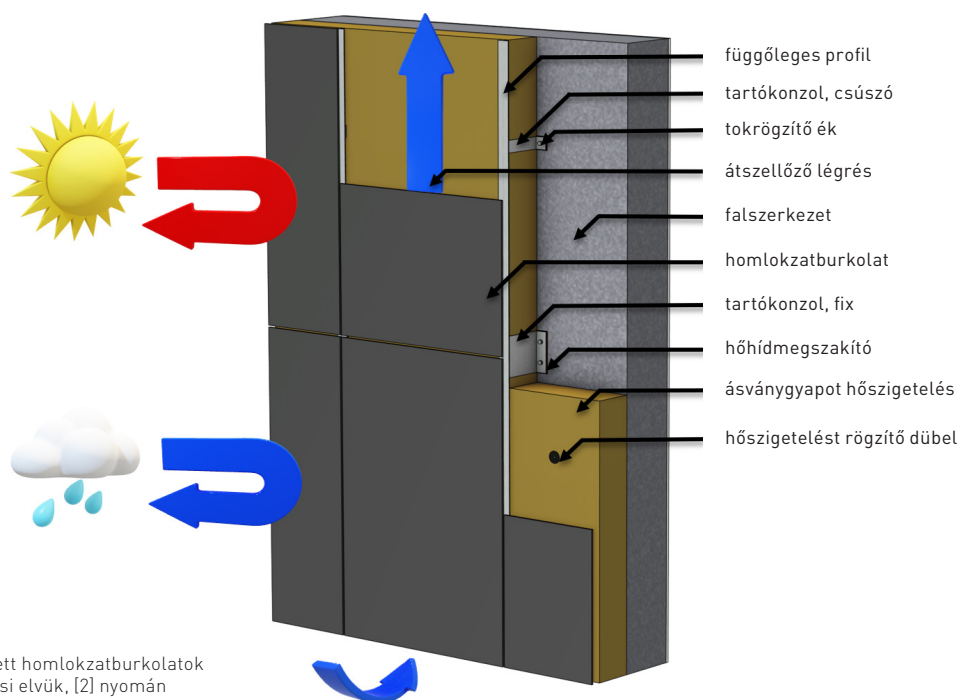
fenntartható energia- és karbon pozitív felújításánál alkalmazott átszellőztetett homlokzatburkolat kialakítást mutat be a rendszer illusztrációja végett. Az átszellőztetett homlokzatburkolatra ennél az innovatív felújítási projektnél is előnyei miatt esett a tervezők választása.

Az átszellőztetett homlokzatburkolat kialakítása révén védi és szárazon tartja az épület falait és hőszigetelését, csökkenti a falak hőigénybevételét és hőmozgását, ezáltal biztosítja az épület hosszabb élettartamát. A homlokzati burok konzollokkal való rögzítése által az épület mozgásából fakadó repedések is elkerülhetők. A „tömeg-rugó-tömeg” szerkesztési elvnek köszönhetően rendkívül előnyös akusztikai tulajdonságokkal rendelkezik, és száraz technológiával készül, így egész évben kivitelezhető, és kevés karbantartást igényel.

A külső kéreg tulajdonképpen napernyő-esernyő elven működik, melynek feladatai közé tartozik a külső mechanikai hatások, meteorológiai terhek felvétele, ezáltal a hőszigetelés és a belső tér védelme. A következő réteg maga az alul-felül nyitott kialakítású szellőző légrés, amelyben a levegő a kürtőhatás következtében alulról-felfelé áramlik, így télen az áramló levegő elszállítja a belső terekből diffundálódott páramennyiséget, míg nyáron hőpajzsként viselkedik, ezzel javítva a homlokzat hőcsillapítását. Ahhoz, hogy ez a hatás és ezáltal a kiszellőzés biztosítva legyen jellemzően minimum 4 cm vastagságú légrés felvétele szükséges, de ez függ többek között az épületmagasságtól és a homlokzati fal szélességétől is. A beszellőztetési keresztmetszet kialakításánál törekedni kell a sávyszerű, ellenállásmentes, magával a szellőző keresztmetszettel azonos kialakításra, hiszen a megfelelő szellőztetési intenzitás megakadályozza a nedvesség kicsapó-



1. ÁBRA:
Egy átszellőztetett homlokzatburkolattal kialakított épület, a Českobrodská Technikum felújított sportcsarnoka Prágában (fotó: NB)



2. ÁBRA: Az átszellőztetett homlokozatburkolatok komponensei és működési elvük, [2] nyomán

dását a burkolat belső oldalán, viszont a túl gyors hőáramlás hideg időben túl sok hőt szállít el a falfelületekről, emiatt különösen ajánlott az optimális légréteg vastagság és kiszellőzési keresztmetszet meghatározása.

A légréteg mögött helyezkedik el a homlokozati hőszigetelés, amely anyaga legtöbb esetben ásványgyapot. A szálas hőszigetelések nyitott szálszerkezete miatt ajánlott nagyobb testsűrűségű változatot választani, hogy a hőszigetelésben található levegő az intenzíven kiszellőztetett légréteg mellett is nyugalomban maradjon, ezzel rontva a hőszigetelőképességét az anyagnak. A természetes konvekció hővezetési tényezőt növelő hatásának kiküszöbölésére ajánlott valamilyen kasírozással ellátott, kifejezetten átszellőztetett homlokozatburkolati rendszerekhez fejlesztett hőszigetelést választani vagy a légzáróságot biztosítani a hőszigetelés felületén, ám még így is kerülhet nedvesség a hőszigetelő táblák mögé, ezért fontos, hogy az anyag hidrofobizált legyen. A kürtőhatás miatt nagy figyelmet kell szentelni a tűzvédelemnek, ugyanis a tűz sokkal könnyebben tud terjedni ezekben az átszellőző légrégekben a felfelé áramló levegő miatt. Fontos emiatt, hogy nem éghető, A1 tűzvédelmi osztályú hőszigetelést válasszunk és építsünk be. Az átszellőztetett homlokozatburkolat komponenseit és működési elvét a 2. ábra szemlélteti.

Belátható, hogy az átszellőztetett homlokozatburkolatok tervezése összetett és számos mérnöki szakterületet érintő feladat. Ezekből jelen tanulmányban a hőtechnikai számításokban mélyültünk el. Részletes számítások elvégzésére numerikus modellezés keretein belül van lehetőség, ugyanis jelenleg Európán belül nem létezik a tartókonzolok és homlokozat alátét szerkezet hatásait is figyelembe vevő egyszerűsített számítási módszer. Az energetikai szimulációk hagyományos módszere az építészeti adatok számszerű bevitele vagy többdimenziós modell készítése az adott szoftver integrált felhasználói felületének alkalmazásával [3, 4, 5, 6], azonban ez a folyamat igen időigényes és sok erőfeszítésbe kerül. A

manapság egyre inkább elterjedő építményinformációs modellezés / menedzsment (BIM: Building Information Modelling / Management) bevezetésével előtérbe kerül a háromdimenziós modellezés, mivel így az építészeti geometriák modellezéséhez szükséges idő jelentősen csökkenthető. A BIM alapú tervezés előnyei akkor használhatók a gyakorlatban leginkább, ha a 3D modell tükrözi a megvalósítani kívánt épületet és a modell elemei a projekt céljának megfelelő mennyiségű és minőségű információval vannak feltöltve [7]. A BIM által kínált lehetőségek azonban lehetővé teszik az épületenergetikai és épületfizikai számítások és modellezés integrálását közvetlenül az építészeti tervezési folyamatokba.

Az épületfizikai modellezés (BPM: Building Physics Modelling) – az épületenergetikaival ellentétben – jellemzően az épületszerkezeti részletek szintjét jelentő, makroszintű vizsgálatokra alkalmas. Ilyen lehet egy összetettebb csomópont 3D analízise, vagy termékfejlesztéshez szükséges vizsgálatok futtatása, azonban az épületszintű kiterjesztése az épületfizikai modellezésnek még várat magára. Ennek oka többért: a számítás kapacitás nagyjából eljutott arra a szintre, hogy a hordozható számítógépek is képesek belátható időn belül nagyobb modellek futtatására, illetve az autóiparban, vagy más, sorozatgyártást jobban alkalmazó iparágakban használt tervezésmódszertan kezd az építőiparban is megvetni a lábát – ennek egyik előfutára a BIM, de a parametrikus modellezés is tekinthető ennek.

A következő lépés a homlokozatburkolati rendszerek pontosabb tervezését, esetleges optimalizálását lehetővé tevő modellezéshez a BIM, valamint az épületfizikai modellezés összehangolása, amely átjárhatóság előrelépést jelenthet a költségek, valamint tervezési idők csökkentésében. Kutatásunkban az általunk kialakított módszertant és munkafolyamatot mutatjuk be, valamint hasonlítjuk össze az iparban jelenleg többségében alkalmazott egyszerűsített számításokkal.

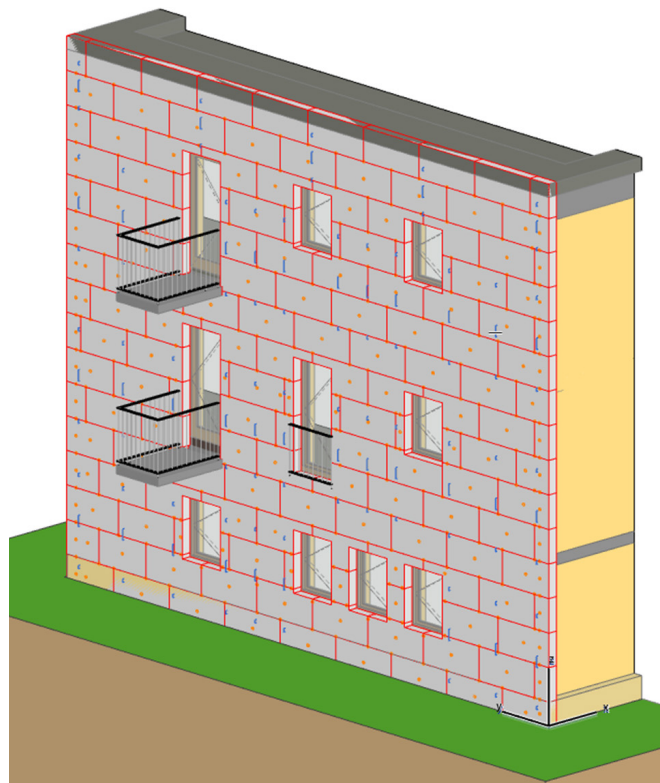
2. | MÓDSZERTAN

2.1. AZ ÁTSZELLŐZTETETT HOMLOKZAT-BURKOLAT FELÉPÍTÉSE

A kutatásunk során egy fiktív, háromszintes, lapostetőű irodaház egyik homlokzatán elhelyezett átszellőztetett homlokzatburkolat rögzítőrendszereinek hőtechnikai vizsgálatát végeztük el. A tervek alapján az épület teherhordó falai Wienerberger Porotherm 30 N+F üreges kerámia falazóelemek, amelyre 1-1 cm külső és belső légzáró vakolat, 15 cm ásványgyapot hőszigetelés, valamint átszellőztetett homlokzatburkolat került. A külső homlokzati fal hőátbocsátási tényezője korrekciók nélkül $0,175 \text{ W/m}^2\text{K}$ -re adódna. A függőleges tartóvázat fix, illetve csúszó pontokkal kell rögzíteni, ezekhez kis és nagy méretű konzolokat terveztünk be. A konzolokat a falazathoz rendszerazonos tokrögzítő ékekkel (pl. HILTI HRD-H 10) kell rögzíteni. A függőleges tartóvázat HILTI MFT-L profilok alkotják, melyek a homlokzati kiosztás során a hőszigetelő táblák illesztési vonalaira kerültek, hogy minél kevesebb hőszigetelő táblát kelljen megvágni, ezzel is csökkentve a hőhidak hatását. A vízszintes tartóvázat HILTI MFP-HT 200-as függesztőprofilok alkotják, ezekre rögzülnek a homlokzatburkoló táblák.

Fontos megjegyezni, hogy a homlokzat modellezése során a külső burkolatot elhanyagoltuk (**3. ábra**), melyre az MSZ EN ISO 6946:2017 [8] szabvány szerinti számítás lehetőséget ad. A kutatás célja a hőszigetelést átszűrő rögzítőelemek hőtechnikai hatásának vizsgálata, ehhez pedig elegendő a rögzítőelemekkel közvetlenül érintkező elemek, mint a tartófal, vakolat, hőszigetelés, konzolok és a dübelek figyelembevétele.

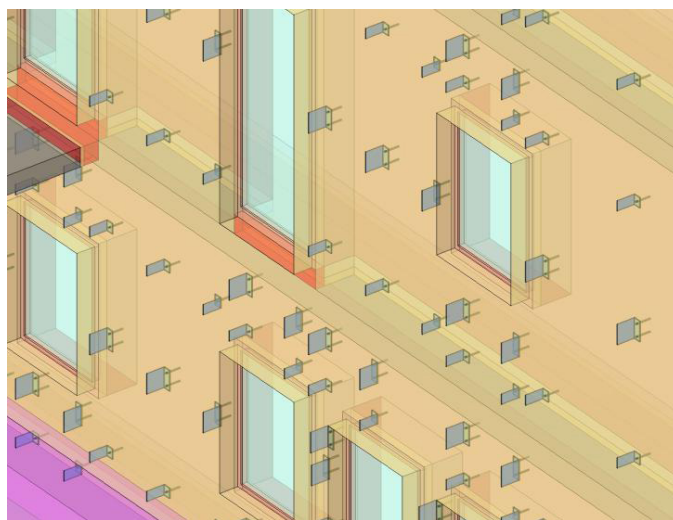
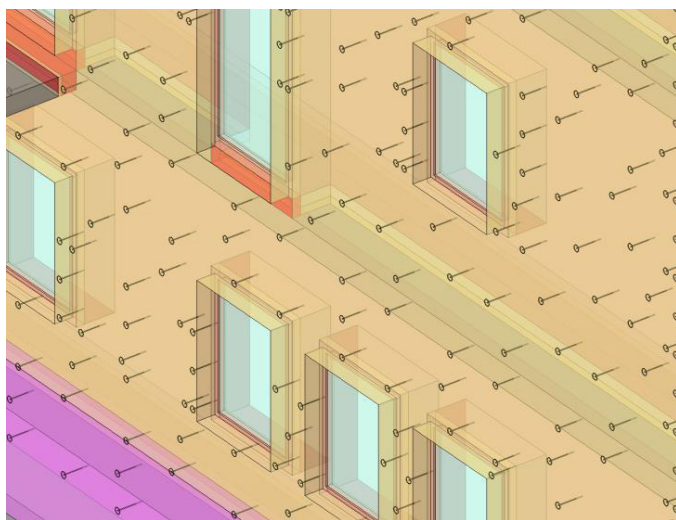
Az egyenes rétegrendű lapostető ($U_{\text{t}} = 0,151 \text{ W/m}^2\text{K}$) kialakítása a 20 cm vastag vasbeton födémen a vízszigetelő réteg alatt és a párazáró réteg felett elhelyezett 25 cm vastag EPS hőszigeteléssel történt. A 20 cm vastag vasbeton pincefödémre alulról 25 cm vastag hőszigetelés került, valamint 7 cm vastag esztrich réteg, így a rétegrendi hőátbocsátási té-



3. ÁBRA: Az épület homlokzatának Archicad 25-ben készült BIM modellje

nyező $0,148 \text{ W/m}^2\text{K}$ -re adódik. Az ablakok és ajtók háromrétegű üvegezéssel, low-E (alacsony emisszivitású) bevonattal, műanyag melegperemes távtartókkal és hőszigetelt műanyag keretekkel jelennek meg a modellben ($U_{\text{ny}} = 0,8 \text{ W/m}^2\text{K}$).

A tervezett átszellőztetett homlokzatburkolat külső homlokzati felülete $106,28 \text{ m}^2$ -re, míg belső felülete $70,06 \text{ m}^2$ -re adódott. A lapostető és pincefal csomópontoknál a csatlakozó lapostetőt és pincefalat $4,73 \text{ m}^2$, a nyílászárókat $13,10 \text{ m}^2$ belső felülettel vettük fel. A homlokzat modellezése után a BIM modell alapján meghatároztuk a hőszigetelés rögzítéséhez



4. ÁBRA: A hőszigetelést tartó dübelek (balra) és a tartókonzolok (jobbra) a COMSOL Multiphysics numerikus multifizikai szoftverben készült modellben

felhasznált dübelek (444 db), a fix (69 db) és a csúszó (107 db) tartókonzolok, valamint a tartókonzolok rögzítéseinek (283 db) darabszámát. Ezek alapján a homlokzati hőszigetelés esetében $6,34 \text{ db/m}^2$, a fix tartókonzolok esetében $0,98 \text{ db/m}^2$, a csúszó konzoloknál pedig $1,53 \text{ db/m}^2$ dübelt vettünk figyelembe (4. ábra).

Az épületinformációs (BIM) és épületfizikai modellezést (BPM) összehangoló munkafolyamatot a [9] jelű szakirodalom alapján fejlesztettük ki. A geometriai modell Archicad 25-ben készült a lehető legnagyobb pontosság figyelembevételével (10^{-4} m), majd az OpenBIM elvei mentén az IFC formátum segítségével konvertáltuk az épületfizikai szimulációk lefutásához. Mivel a hőtechnikai modellezéshez használt szoftver jelenleg nem képes közvetlenül az IFC fájlformátum fogadására, így annak geometriai részét STEP formátumba kellett konvertálni a Rhinoceros 7 szoftver GeometryGym bővítményének segítségével. A folyamat során a nem-geometriai adatok jelentős részének maradéktalan megőrzése egyelőre nem bizonyult lehetségesnek, de a szilárdtest-modell vége-selemes hálózásához szükséges pontosság (10^{-8} m) biztosítható – annak ellenére, hogy ez jóval magasabb, mint amit a választott BIM környezet képes nyújtani. A STEP fájl ezután importálható a COMSOL Multiphysics 5.6 vége-selemes multifizikai szoftverbe, amelyben a hőtechnikai modellezést végeztük, az MSZ EN ISO 10211:2017 [10] szabványban leírt számítási módszertan alapján.

2.2. A MUNKAFLYAMAT LÉPÉSEI

Kutatásunkban az épületinformációs modell (BIM) épületfizikai modellé (BPM) alakítása a következő munkafolyamat szerint történt:

1. A geometria modellezése Archicad 25-ben történt. A felületek és faliak használata a csoportosíthatóságot segíti később a vége-selemes modellezés során. Az IFC fordító ezért a pontos geometria megőrzése miatt szétrobbantott BREP modellt exportált, a parametrikus, kihúzott opció használata elönytelennek bizonyult. Az alkalmazott beállításokkal az épület egészét, vagy alrendszereit (pl. rögzítőelemek egyes csoportjait) is kimenthetjük.
2. Mivel az IFC jelenleg nem támogatott a BPM szoftverekben, ezért azt STEP fájlra kell alakítani, ami részleges metaadat elvesztésével is jár. Ezt a Rhinoceros program GeometryGym pluginja segítségével tettük meg. A modell megfelelő pontosságának ellenőrzése szükséges, ez javarészt manuális javításokat, és szemrevételezés útján történő javítást jelent.
3. Az előkészített 3D modellt STEP fájlként exportáljuk: többféle formátum-opció is rendelkezésre áll (pl. IGES vagy DWG), de a STEP bizonyult a leginkább robosztus választásnak.
4. A STEP fájl már beolvasható a COMSOL-ba, ahol a különböző tartományok összevonása az első lépés, amely során kiderül, hogy a 2. pontban leírt szemrevételezés teljeskörű javítást eredményezett-e: a 10^{-6} m tolerancia nagyságrendekkel az Archicad által biztosított szerkesztési pontosság alatt van (10^{-4} m), emiatt előfordulhat, hogy az összevonás nem végezhető el. Ebben az esetben a 2-4. pontok ismétlése szükséges. Az eredeti BIM modell

felületei, illetve faliak a BPM rendszerezésére remekül használhatóak, ezt ebben a lépésben tesszük meg.

5. A hálózást érdemes lefuttatni közvetlenül az importálást követően, mivel a geometriához köthetően még ekkor is akadhat problémánk a magas pontossági követelmények miatt – a legtöbb hiba ebben a lépésben jelentkezett a tapasztalataink alapján, a már említett toleranciakülönbségek következtében. Érdemes a vége-selemhálót először automatikus, közepes sűrűségű beállítás mellett elkészíteni, majd az első futtatás után szükség szerint finomítani vagy lokálisan tovább sűríteni, esetleg adaptív hálósűrítést alkalmazni.
6. Amennyiben a vége-selemháló hiba nélkül elkészült, az építőanyagok tulajdonságait adhatjuk meg (esetünkben az állandósult állapotbeli hővezetés feltételezése miatt ez csak a hővezetési tényezőt jelentette), amit egyes tartományokhoz, vagy az importálás során létrehozott csoportokhoz rendelhetünk hozzá. Az épületfizikai anyag-tulajdonságok forrása az MSZ EN ISO 10456:2008 [11] szabvány volt.
7. Ezt követően a külső és belső oldali peremfeltételek hozzárendelését tettük meg az MSZ EN ISO 6946:2017 [8], valamint az MSZ 24140:2015 [12] szabvány alapján. A felületekről érdemes kiválasztást csinálni és elmenteni, kisebb modellmódosítások esetén ez jelentős időmegtakarítást jelent.
8. Mérés helyek meghatározása a modellben (domain probes), hogy értékelhető eredményeket nyerjünk ki a modelltől. Az erre használt szondák vonatkozhatnak tartományokra, felületekre, vonalakra vagy pontokra is. A szélsőértékek mellett átlagos, valamint hőmérséklet- vagy hőáram integrálok is leképezhetők.
9. A numerikus modellezés lefuttatása, majd a mért eredmények további számítások számára történő exportálása, illetve különféle szimulált paraméterek (pl. hőmérséklet vagy hőáram) eloszlásának vizualizálása.
10. Jellemzően szükséges az eredmények utófeldolgozása és tisztítása, hogy áttekinthető, könnyen fogyasztható formában tálalhassuk az összefüggéseket. Ezt például Excelben tehetjük meg.

2.3. A NUMERIKUS MODELLEZÉS MÓDSZERTANA

A homlokzat eredő hőátbocsátási tényezőjének numerikus modellezéssel történő meghatározásához első lépésben a csatlakozó, termikus burkot alkotó szerkezetek hőátbocsátását határoztuk meg. Kiszámoltuk a falak, a lapostető, valamint a pince feletti födém U-értékét a vonatkozó MSZ EN ISO 6946:2017 [8] szabvány alapján, illetve figyelembe vettük a nyílászárók (ajtók és ablakok) U-értékét is.

Az átszellőztetett homlokzatburkolatot négy esetben modelleztük meg, hogy figyelembe vehessük az egyes inhomogenitásokat okozó rögzítőelemeket: a referencia modellben (Q1) sem a homlokzati hőszigetelő táblákat rögzítő tárcsák, sem a konzolok nem szerepeltek. A rögzítőrendszereket tartalmazó szimulációs esetek közül pedig az első esetben a homlokzati hőszigetelés rögzítését (Q2), a második esetben a konzolokat (Q3), míg a harmadik esetben mindent figyelembe vettünk, melyet teljes modellnek is nevezhetünk (Q4).

A numerikus modell minden esetben a BIM modellből származtatott geometriát használta. Az állandósult állapotbeli hővezetést leíró parciális differenciálegyenletet a COMSOL Multiphysics 5.6 oldotta meg az [1] egyenlet alapján. A peremfeltételeket a [2] és [3] egyenletek alapján határoztuk meg.

$$\nabla q = \nabla(\lambda_{eff} \nabla T) = 0 \quad (1)$$

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = d_z(h_{ci} + \varepsilon \cdot 4 \cdot \sigma \cdot T_{mi}^3) \quad (2)$$

$$-\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} = d_z(h_{ce} + \varepsilon \cdot 4 \cdot \sigma \cdot T_{mi}^3) \quad (3)$$

ahol a [2] egyenletben h_{ci} a belső felületi hőátadási tényező [$2,5 \text{ W/m}^2\text{K}$], ε a felület hosszúhullámú tartományra vonatkozó emissziós tényezője [0,9], σ a Stefan-Boltzmann állandó [$5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$] és T_{mi} a belső felület és a környezet átlagos termodinamikai hőmérséklete, $293,15 \text{ K}$ értékkel felvéve az MSZ 24140:2015 [10] szabvány alapján. A [3] egyenletben $h_{ce} = 4 + 4 \cdot v$, ahol v a szélesség, 4 m/s értékkel felvéve [9] alapján, T_{me} a külső felület és a környezet átlagos termodinamikai hőmérséklete kelvinben, $268,15 \text{ K}$ értékkel felvéve [11] alapján. A végelelemes hálót négyoldalú (tetraéder) elemekből építettük fel, minimális csomóponti távolságnak 1 mm -t, míg maximum $2,5 \text{ cm}$ -t választva. A végelelemhálót a 5. ábra mutatja be a referencia és teljes modell esetében.

Ahhoz, hogy a homlokzat hőtechnikai teljesítményét meghatározhassuk, az eredő hőáramok összegzésére volt szükség mind a külső-, mind a belső oldali felületeken. Az eredő hőátbocsátási tényező egyszerűsített számítások során tartalmazza a rögzítőelemek hatását és a csatlakozási hőhidak hatását is, ezért így számítottuk ki is az összehasonlíthatóság érdekében. A csatlakozási hőhidak hatását, ha lefuttatjuk a numerikus modell megoldását bármely rögzítőelem nélkül (referenciamodel), és kivonjuk az egydimenziós, kézi számítással meghatározott hőátbocsátási tényezőket a teljes épületburok esetében. Tehát szükségünk van a Q_1 teljes hőáramra [W] a modellből, mely tartalmazza a vonalmenti hőhidak hatását, a hővesztésre a lapostetőn keresztül ($A_{lt}U_{lt}$), a

pince feletti födémen keresztül ($A_{pf}U_{pf}$), a homlokzati falakon keresztül ($A_{hf}U_{hf}$), illetve az ajtókon és ablakokon keresztül ($A_{ny}U_{ny}$). Ha kivonjuk a termikus burok csatlakozó szerkezeiteinek kiszámított hővesztéseit a teljes, szimulált hővesztéséből [melyet a szimulált hőáram $\Delta T = 25 \text{ K}$ hőmérsékletkülönbséggel történő elosztásával kaphatunk meg], majd a termikus burkot alkotó homlokzati falak belső felületére (A_{fal}), fajlagosítjuk, akkor megkapjuk $\Delta U_{csh,sim}$ korrekciós tényezőt, mely kizárólag a geometriai csatlakozások okozta vonalmenti hőhidak hatását tartalmazza [4]:

$$\Delta U_{csh,sim} = ((Q_1/\Delta T) - A_{lt}U_{lt} - A_{pf}U_{pf} - A_{fal}U_{fal} - A_{ny}U_{ny}) / A_{fal} \quad (4)$$

Az egyes esetekre vonatkozó korrekciós tényezőket is meghatároztuk, hogy figyelembe vehessük a pontszerű hőhidak hatását a hőszigetelést rögzítő dübelek esetében ($\Delta U_{düb,sim}$), a homlokzatburkolatot tartó konzolok esetében ($\Delta U_{konz,sim}$), valamint a teljes rögzítőrendszer esetében ($\Delta U_{rögz,sim}$), a négy különböző szimuláció felhasználásával az alábbi egyenletek alapján [5-7]:

$$\Delta U_{düb,sim} = (Q_2 - Q_1) / (A \cdot \Delta T) \quad (5)$$

$$\Delta U_{konz,sim} = (Q_3 - Q_1) / (A \cdot \Delta T) \quad (6)$$

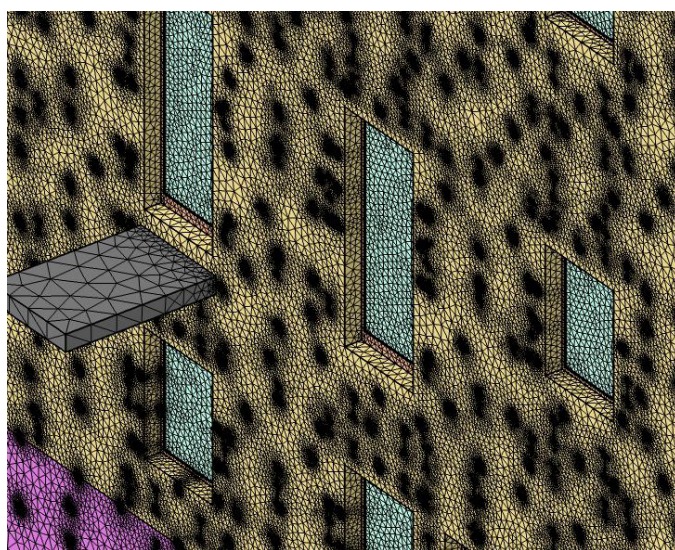
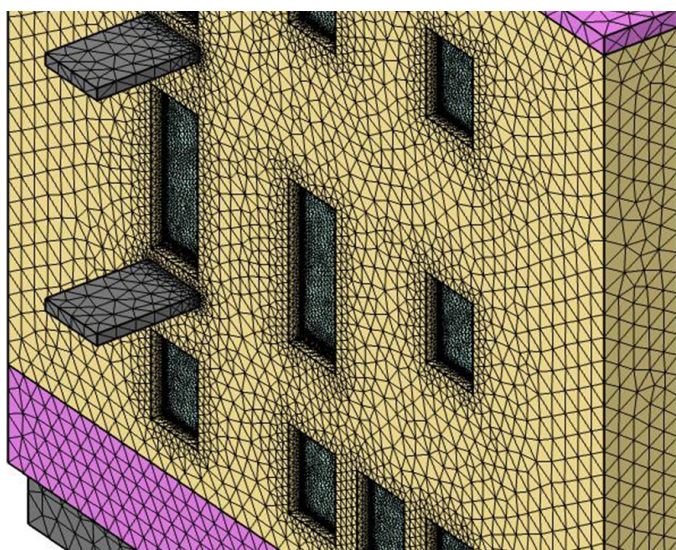
$$\Delta U_{rögz,sim} = (Q_4 - Q_1) / (A \cdot \Delta T) \quad (7)$$

A homlokzati falszerkezet eredő hőátbocsátási tényezője, mely figyelembe veszi a rögzítőelemek pontszerű, illetve a vonalmenti hőhidakat is, az alábbi egyenletek szerint számítható ki az egyes, rögzítőrendszert tartalmazó esetekre vonatkozóan [8-10]:

$$U_{fal,tot,sim,1} = U_{hf} + \Delta U_{düb,sim} + \Delta U_{konz,sim} + \Delta U_{csh,sim} \quad (8)$$

$$U_{fal,tot,sim,2} = U_{hf} + \Delta U_{rögz,sim} + \Delta U_{csh,sim} \quad (9)$$

$$U_{fal,tot,sim,3} = ((Q_4/\Delta T) - A_{lt}U_{lt} - A_{pf}U_{pf} - A_{ny}U_{ny}) / A_{fal} \quad (10)$$



5. ÁBRA: Az rögzítőelemek nélküli referencia modell (Q1, balra) és a teljes modell (Q4, jobbra) végelelemes hálója

2.4. BIM-ALAPÚ HŐTECHNIKAI MODELLEZÉS SORÁN SZÜKSÉGES EGYSZERŰSÍTÉSEK

BIM-alapú épületfizikai modellezés során a geometria ellenőrzése és a megfelelő formátumba való importálása egy összetett folyamat, emiatt több okból kifolyólag is előfordulhatnak hibák. A modell létrehozása során geometriai modellhibák léphetnek fel és a modell energetikai szoftverbe való exportálása során is problémák adódhatnak. A lehetséges hibák kiküszöbölése érdekében mind a geometriai, mind az épületfizikai modell felépítésekor a modellek egyszerűsítésére, limitációjára volt szükség. Ezen egyszerűsítések például a valóság és a BIM modell közötti egyszerűsítések (pl. geometriai egyszerűsítések, kivitelezési pontatlanságok elhanyagolása) vagy a BIM és az épületfizikai modellezés közötti egyszerűsítések (pl. végeselemes modellezéssel és peremfeltételek megadásával kompatibilis modell), vagy akár átfogó, a valóság és az épületfizikai modell közötti egyszerűsítések (pl. állandósult állapot, hőtechnikai modell figyelembevétele) voltak.

2.5. EGYSZERŰSÍTETT SZÁMÍTÁSOK AZ EREDMÉNYEK ÖSSZEHASONLÍTÁSÁHOZ

A homlokzati részlet eredő hőátbocsátási tényezőjét az eredmények összehasonlítása végett különböző, a tervezési folyamatok során gyakran alkalmazott egyszerűsített számításokkal is meghatároztuk, amelyhez a geometriai adatokat szintén a modell szolgáltatta. A csatlakozási hőhidak hatásait a 7/2006. TNM rendelet [13] egyszerűsített eljárása alapján vettük figyelembe. Az épületek energetikai tanúsítása során az egyszerűsített módszer szerint a hőhidak hatását a falsarkok, a nyílászáró beépítések, a lapostetők, valamint a közben-ső és pincefödémek csatlakozási hosszainak összegzésével vehetjük figyelembe. A csatlakozási hőhidak összes hossza 98,65 m a modellezett épületben, amelyet osztva a belső fal-felülettel 1,41 m/m² fajlagos érték adódott. Ez azt jelenti, hogy a hőszigetelt fal hőhidak hatását kifejező korrekciós tényezője $\chi = 0,3$, amely alapján a korrigált hőátbocsátási tényezőt (mely tartalmazza a dűbelek és tartókonzolok hatásait is) a csatlakozási hőhidak hatásai miatt további 30 %-kal növelni szükséges. A csatlakozási hőhidak korrekcióját megkaphatjuk, ha a megnövelt U-értékből kivonjuk a fal U-értékét:

$$\Delta U_{csh, egysz} = U_{fal, korr} \cdot (1 + \chi) - U_{fal, korr} \quad (11)$$

A hőszigetelést rögzítő dűbelek $\Delta U_{düb, egysz}$ hatását a MSZ EN ISO 6946:2017 [8] szabvány alapján, míg a tartókonzolok hőtechnikai hatását a Hilti hőhidkatalógusa [14] alapján határoztuk meg. A hőhidkatalógus alapján a fix tartókonzolok pontbeli hőátbocsátási tényezője $\chi_{fix} = 0,0534$ W/K, a csúszó tartókonzolok pontbeli hőátbocsátási tényezője $\chi_{csúszó} = 0,0336$ W/K. Az átlagos darabszámokkal szorozva megkaphatjuk a konzolok miatti korrekció értékét [12]. A homlokzat eredő hőátbocsátási tényezője egyszerűsített módszerrel számolva pedig a [13] képlet szerint adódik:

$$\Delta U_{konz, egysz} = n_{fix} \cdot \chi_{fix} + n_{csúszó} \cdot \chi_{csúszó} \quad (12)$$

$$U_{fal, tot, egysz} = U_{fal} + \Delta U_{csh, egysz} + \Delta U_{düb, egysz} + \Delta U_{konz, egysz} \quad (13)$$

3. | EREDMÉNYEK

3.1. NUMERIKUS MODELLEZÉS

A numerikus hőtechnikai modellezés során lehetőség van az eredmények ábrázolására 2D-s vízszintes és függőleges metszetek segítségével is, melyek nyomtatásban könnyebben értelmezhetőbbek, mint a 3D-s ábrák. A tervezett homlokzat hőmérsékleteloszlását a **6. és 7. ábrák** szemléltetik.

A **6. ábrán** a referenciamodell látható, amikor a rögzítőrendszer elemeit (dűbelek, tartókonzolok) elhanyagoltuk, így a pontbeli hőhidak hatásait egyáltalán nem vettük figyelembe. Azonban az is látható, hogy a csatlakozó épületburkolati elemek vonalmenti hőhidakat okoznak a földem és a nyílászárók kerületei mentén. Ennek ellenére a belső felületek saját-léptékben mért hőmérséklete (f_{rsi}) a modellen mindenhol 0,8 felett volt, így a szerkezetben nem várhatóak állagvédelmi problémák.

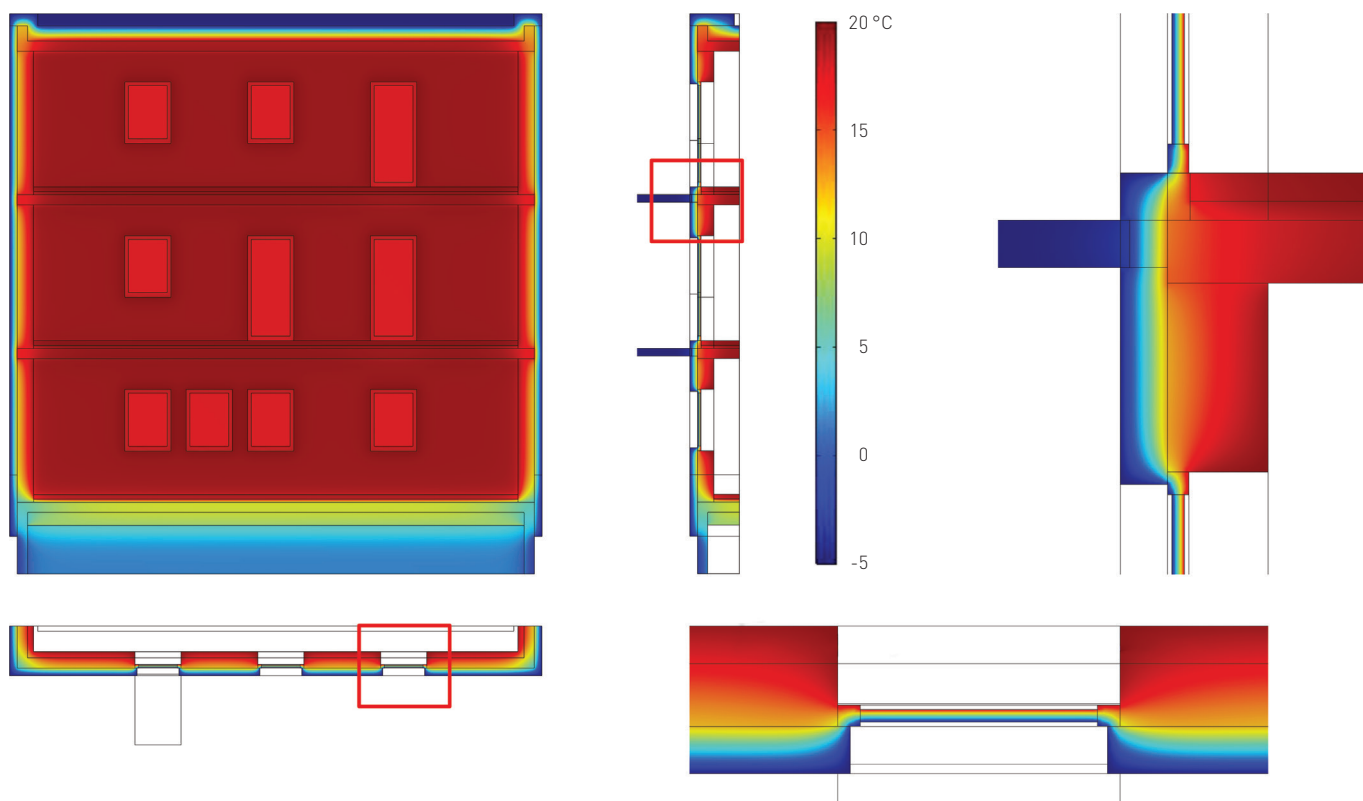
A **7. ábrán** a teljes modell látható, amikor a rögzítőelemeket is figyelembe vettük a modellezés során. Látható, hogy a dűbelek és a tartókonzolok által okozott pontbeli hőhidak megváltoztatják az épületburok hőmérsékleteloszlását, legfőképpen a hőszigetelésben és a falazóelemekben a rögzítőelemeken keresztül felvett metszetekben. Azonban a hőmérsékleteloszlás és a hőáramsűrűség csak a rögzítések körül változik, amelyek alapján elmondható, hogy a rögzítőrendszereknek csak csekély, szinte elhanyagolható hatásuk van a belső felületi hőmérsékletre, amelyek továbbra is 0,8 feletti hőmérsékleti tényezőt eredményeznek.

3.2. HŐÁTBOCSÁTÁSI TÉNYEZŐK

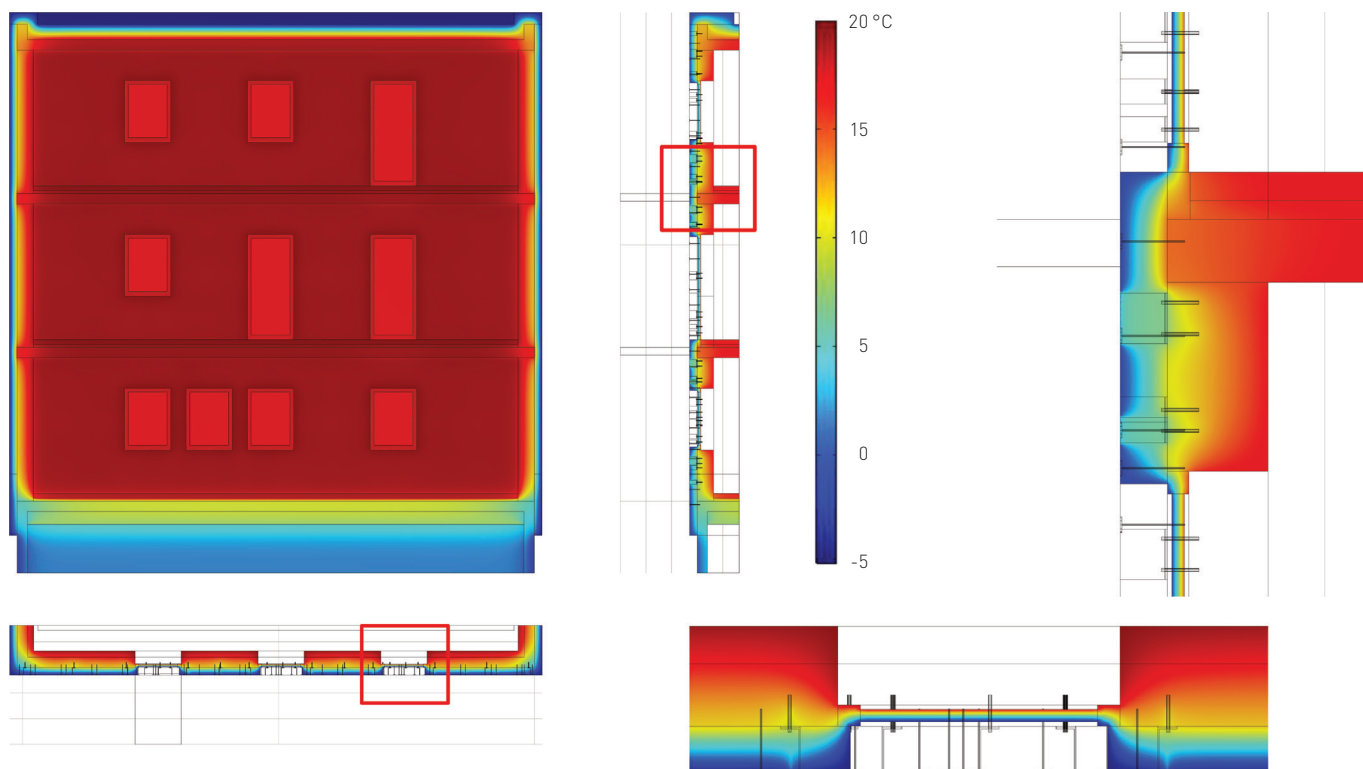
A szimuláció során a hőátbocsátási tényezőket a [8-10] egyenletek alapján határoztuk meg. Az eredő hőátbocsátási tényezőt a [13] egyenlet alapján egyszerűsített módszerek segítségével is kiszámítottuk. A BIM-alapú szimulációk, valamint az egyszerűsített számítási módszerek eredményeit az **1. táblázat** foglalja össze.

Eredményeink alapján, amennyiben a dűbelek és tartókonzolok korrekcióit egyenként határozzuk meg, akkor a rögzítések korrekciója 7%-kal nagyobbra adódik (0,0449 W/m²K), mint az együttes modellezésük esetében (0,0420 W/m²K). A különbség abból származik, hogy a hőhidak hatása alapvetően nem szuperponálható. Ez a különbség jelen esetben nem számottevő, valamint az eltérés a biztonság javára történik, így a számítási kapacitás csökkentésének érdekében ezek az eredmények is felhasználhatók. A modellek futtatása során ugyanis a teljes modell mintegy 5-6-szor több időt vett igénybe azonos számítógépen, mint a dűbelek vagy konzolokat tartalmazó modellek külön-külön, ráadásul lényegesen kevesebb RAM-ot használtunk fel a futtatás során.

A teljes homlokzat a rögzítésekkel modellezve (Szim3) ugyanazt az eredményt adja, mint a második szimuláció (Szim2), ahol a hőhidak, illetve a mechanikai rögzítések más-más esetekből adódnak. Ez azt jelenti, hogy a vonalmenti hőhidak nem változtatták meg érzékelhető mértékben a dűbelek és konzolok által okozott pontbeli hőhidakat. A dűbelek kor-



6. ÁBRA: Hőmérsékleteloszlás a referencia modell (Q1) esetében, rögzítőelemek nélkül



7. ÁBRA: Hőmérsékleteloszlás a minden inhomogenitást okozó rögzítőelemet tartalmazó teljes modell (Q4) esetében

1. TÁBLÁZAT: Az eredő hőátbocsátási tényezők és összetevőik

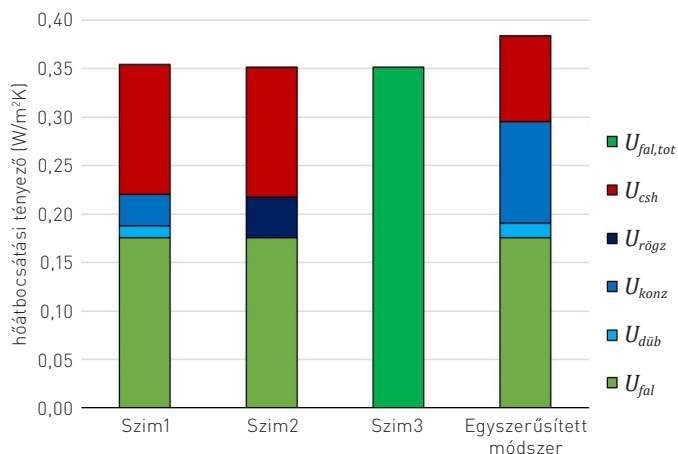
	Szimulációs eredmények			Egyszerűsített módszer (W/m ² K)
	Szim1 (W/m ² K)	Szim2 (W/m ² K)	Szim3 (W/m ² K)	
U_{fal}	0.1754	0.1754	-	0.1754
$\Delta U_{düb}$	0.0124	-	-	0.0151
ΔU_{konz}	0.0325	-	-	0.1047
$\Delta U_{rögz}$	-	0.0420	-	-
$U_{fal,korr}$	0.2203	0.2174	-	0.2952
ΔU_{csh}	0.1340	0.1340	-	0.0886
$U_{fal,tot}$	0.3543	0.3514	0.3514	0.3838

rekciós értékét összehasonlítva a konzolokkal, azt láthatjuk, hogy utóbbi 2,6-szorosa az előbbinek, a tartókonzolok hatása jelentősebb.

A numerikus szimulációval meghatározott korrigált hőátbocsátási tényező 0,22 W/m²K-re adódott, ami megfelel a 7/2006. TNM rendeletben [13] meghatározott $U_{max,fal} = 0,24$ W/m²K követelményértéknek. Meg kell jegyeznünk, hogy ez lényegesen, mintegy 26%-kal több, mint a korrekció nélküli egydimenziós hőátbocsátási tényező. A dübelek és konzolok figyelembevétele a rétegtervi hőátbocsátási tényező értékében tehát nem elhanyagolható, hatásuk számottevő! A vonalmenti hőhidak hatását figyelembe vevő korrekciós tényező numerikus szimulációval figyelembe véve 0,134 W/m²K-re adódott a numerikus szimulációk során, így a tartófal eredő hőátbocsátási tényezője $U_{fal,tot,szim} = 0,35$ W/m²K.

A numerikus számításokkal meghatározott eredményeket összehasonlítva az egyszerűsített módszerrel, a dübelkorrekcióra 22%-kal kisebb értéket kaptunk numerikus a szimuláció esetében. Azonban az MSZ EN ISO 6946:2017 [8] alapján egyszerűsített módszerrel meghatározott eredmény a biztonság javára közelít, így véleményünk szerint felhasználható hasonló számítások során. A tartókonzolok korrekcióját a hivatkozott hőhidkatalógus [14] alapján figyelembe véve viszont háromszor nagyobb eredmény adódik, mint numerikus szimulációk esetében. Az eltérés abból adódhat, hogy a hőhidkatalógusban alkalmazott falazóblokk eltér a kutatásunkban használttól, valamint a katalógusban szereplő kialakítások modellezése egyszerűbb, és anyagok hővezetési tényezői sem egyeznek meg az általunk alkalmazott, szabványos értékekkel. Bár a tartókonzolok gyártói hőhidkatalógus szerinti korrekciója a biztonság javára közelít, ez esetben a jelentős különbség miatt nem javasoljuk az alkalmazását, főleg amennyiben a falazóblokkok nagyban eltérnek a katalógusban szereplőktől. A tartófal korrigált hőátbocsátási tényezője a rögzítőrendszerek nagyobb korrekciója miatt nem felel meg az itthon érvényben lévő szabályozásoknak, a számított érték közel 35%-kal magasabb, mint a numerikus szimuláció segítségével meghatározott eredmény (1. táblázat).

Összehasonlítva a vonalmenti hőhidak korrekcióját látható, hogy az egyszerűsített számítások nem a biztonság javára közelítenek, mivel a numerikus szimuláció 51%-kal magasabb korrekciós értéket eredményezett, mint az egyszerűsített



8. ÁBRA: Az eredő hőátbocsátási tényezők összetevői

számítás. A 7/2006 TNM rendeletben meghatározott módszertan és korrekciós tényezők 2006 óta változatlanok, emiatt ezek az értékek elavultak és nem alkalmasak a jelentősen hőszigetelt épületek számítására, így ezekben az esetekben részletes számítási mód vagy numerikus modellezés javasolt. Végezetül az egyszerűsített számítási módszer 10%-kal magasabb eredő hőátbocsátási tényezőket eredményezett, mint a numerikus szimulációval számított érték. Az eltéréseket a 8. ábrán is vizualizáltuk, melyen az eredő hőátbocsátási tényező egyes összetevői jól láthatók.

4. | ÖSSZEFOGLALÁS

Tanulmányunkban az átszellőztetett homlokzatburkolatok BIM modellen alapuló épületfizikai modellezését mutattuk be. Első lépésként létrehoztunk egy OpenBIM alapú munkafolyamatot, mely bármilyen épületfizikai probléma multifizikai modellezésére alkalmas, amit hőtechnikai kérdések vizsgálatával demonstráltunk is. Ezt követően numerikus hőtechnikai modellezés segítségével különböző modellezési eseteket vizsgáltunk a homlokzati falak hőátbocsátási tényezőjének meghatározásához. Ezekben a scénáriókban a homlokzati hőszigetelést rögzítő dübeleket, valamint a hátszerkezet konzoljait elhanyagoltuk, illetve külön, valamint együttesen is figyelembe vettük. A hőátbocsátási tényezőket kézi, egyszerűsített módszerekkel is kiszámoltuk a hatályos hazai jogszabályok, vonatkozó szabványok alapján.

Az eredményeink azt mutatták, hogy a numerikus modellezés alacsonyabb eredő hőátbocsátási tényezőt eredményezett, mint az egyszerűsített számítások. Megállapítottuk, hogy a rögzítőelemek hatásának elhanyagolása a rétegtervi hőátbocsátási tényezőben jelentős hibát eredményez, ezek hatását mindig figyelembe kell vennünk! Kijelenthetjük továbbá, hogy a rögzítőelemek figyelembevétele egyszerűsített módszerek alkalmazásával nagyobb eredményt adott, mely akár a hőveszteségek jelentős túlméretezéséhez is vezethet. Az általunk bemutatott BIM alapú numerikus hőtechnikai modellezés hiánypótló módszertant jelent a BIM alapú mérnöki tevékenységek folytatásához, legyen szó homlokzattervezésről vagy épületfizikai modellezésről.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatás az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-21-2 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának szakmai támogatásával készült.
A kutatás az Innovációs és Technológiai Minisztérium ÚNKP-21-4 kódszámú Új Nemzeti Kiválóság Programjának szakmai támogatásával készült.

FORRÁSOK

- [1] Ibañez-Puy, M., Vidaurre-Arbizu, M., Sacristán-Fernández, J.A., Martín-Gómez, C. (2017). Opaque ventilated façades: Thermal and energy performance review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 79(C), pp. 180-191. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.059>
- [2] Petresevics Fanni, Nagy Balázs (2022). FEM-based evaluation of the point thermal transmittance of various types of ventilated façade cladding fastening systems. *Buildings* 12(8), p. 1153. <https://doi.org/10.3390/buildings12081153>
- [3] Ujma, A., Pomada, M. (2019). Analysis of the temperature distribution in the place of fixing the ventilated facade. *E3S Web Conf.* 97, p. 01041. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199701041>
- [4] Šadauskienė, J., Ramanauskas, J., Šeduikytė, L., Buska, A. (2015). Assessment of buildings with ventilated facade systems and evaluation of point thermal bridges. *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering* 11(2), pp. 59-71. <https://doi.org/10.5755/j01.sace.11.2.12606>
- [5] Levinskýtė, A., Bliūdžius, R., Burlingis, A., Makaveckas, T. (2019). Dependencies of heat transmittance through the ventilated wall system on thermal conductivity of connectors crossing thermal insulation layer. *MATEC Web of Conf.*: 4th Central European symposium on building physics (CESBP 2019), Prága, 2019.09.2-5. Les Ulis : EDP Sciences. 2019, vol. 282, art. no. 2089, p. 1-7. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928202089>
- [6] Theodosiou, T., Tsikaloudaki, K., Tsoka, S., Chastas, P. (2019). Thermal bridging problems on advanced cladding systems and smart building facades. *Journal of Cleaner Production* 214, pp. 62-69. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.286>
- [7] Csapó Máté, Izrael Anna (2021). BIM alapú tervezés a gyakorlatban. *Magyar Építőipar* 2021.3-4, pp. 100-107. <https://doi.org/10.17168/MEIP.2021.70.100>
- [8] MSZ EN ISO 6946:2017 Épületszerkezetek és épületelemek. Hővezetési ellenállás és hőátbocsátás. Számítási módszerek (ISO 6946:2017, 2021. decemberi helyesbített változat), MSZT, Budapest
- [9] Fürtő Balázs, Nagy Balázs (2023). BIM based hygrothermal modelling of building constructions. *Acta Polytechnica CTU Proceedings* 38. <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/APP/article/view/8286>
- [10] MSZ EN ISO 10211:2017 Hőhidak az épületszerkezetekben. Hőáramok és felületi hőmérsékletek. Részletes számítások (ISO 10211:2017), MSZT, Budapest
- [11] MSZ EN ISO 10456:2008 Építési anyagok és termékek. Hő- és nedveségtechnikai tulajdonságok. Táblázatos tervezési értékek, illetve eljárások a közölt és tervezési hőtechnikai értékek meghatározására (ISO 10456:2007), MSZT, Budapest
- [12] MSZ 24140:2015 Épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számításai, MSZT, Budapest
- [13] 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról, <https://njt.hu/jogszabaly/2006-7-20-6F>
- [14] Hilti: Ventilated Facades: Technical Manual v1.0. 134 p. https://www.hilti.hu/content/dam/documents/pdf/e4/engineering/manuals/MFT_Technical%20Manual%20PRINTING%20V1.0%20low.pdf