

Nagy Balázs* – Dr. habil Stocker György**

NEDVESSÉGHIDAK AZ ÉPÜLETSZERKEZETEKBE

KIVONAT/HU

Épületeink energetikai teljesítőképességének megfelelőségére jelenleg szigorú szabályok vonatkoznak, azonban az épületburokkal kapcsolatban csak és kizárólag hőátbocsátási előírásoknak kell megfelelni. Emiatt a tervezők jelenleg nincsenek rákényszerítve, hogy az épületek nedvességtechnikai tervezésével is kellő mélységben foglalkozzanak, mely azonban az energiahatékony és élhető, valamint az új közel nulla energiaigényű követelményeknek megfelelő épületek esetén is kiemelkedően fontos lenne. Cikkünkben bemutatunk egy alkalmas módszert, mellyel az épületszerkezetek hő- és nedvességtechnikai viselkedése együttesen vizsgálható. Az épületszerkezetek nedvességátbocsátási képességének vizsgálatát egy példán keresztül szemléltetve mutatjuk be, melyben megvizsgálunk két hőszigetelőanyaggal töltött falazóblokkból készült falazat és falsarok csomópont hő- és nedvességhidait is.

Kulcsszavak: hő- és nedvességtranszport, hő- és nedvességhid

ABSTRACT/ENG

Buildings' energy performance is currently under strict regulation in relation of the building envelope, however only thermal transmittance requirement have to be met. For this reason, designers are currently not pushed to deal with buildings' moisture engineering design in detail, although it would be outstandingly important for energy-efficient and livable buildings as well as for new buildings with nearly zero energy requirements. In our article we present a suitable method for jointly assessing the thermal and moisture behavior of buildings. We are illustrating the moisture transfer performance of building constructions through an example in which we analyze the thermal and moisture bridging effects of masonry walls and wall corner joint of two kind of thermal insulation filled blocks.

Keywords: heat and moisture transport, thermal and moisture bridge

Ektorált tartalom

1. | BEVEZETÉS

A jelenlegi épületenergetikai követelmények kiemelkedő hőszigetelő-képességű épületburok tervezését írják elő. Az alacsony és közel nulla energiaigényű épületek károsodásmentes és valóban energiahatékony kialakítását az új határolószervezetek megfelelő együttes hő- és nedvességtechnikai tervezése garantálhatja. Bár sem az épületenergetikai rendelet [1], sem pedig a tanúsítási rendelet [2] nem írja elő a nedvességtechnikai vizsgálatok szükségességét, azonban az épületek és épülethatárolószervezetek hőtechnikai számításáról szóló hatályos magyar szabvány [3] 4. fejezete a nedvességtechnikai-állagvédelmi számításokról szól. Ez a szabvány azonban csupán egy állandósult állapotbeli, egydimenziós, grafoanalitikus, Glaser-módszeren alapuló számítási eljárást közöl. A szintén hatályos hő- és nedvességtechnikai viselkedésről szóló szabvány [4] is ezt az egyszerűsített módszert alapul vevő megoldást alkalmazza, melyben a számításokat immáron akár havi bontásban is elvégezhetjük, megállapítva egy egydimenziós(nak egyszerűsített) épületemelet esetén a kritikus felületi nedvességet, és a szerkezeten belüli

páralecsapódást megelőző belső felületi hőmérsékletet. Az épületenergetikai tervezéssel foglalkozó szakemberek szinte kivétel nélkül e két szabvány szerint ellenőrzik a határolószervezetek nedvességtechnikai megfelelőségét. Létezik azonban szabvány a nedvességvándorlás numerikus szimulációval történő számítására [5], melyet felhasználva dinamikusan, akár órai bontásban, valamint az anyagok hő- és nedvességkapacitásának, valamint a páradiffúzió mellett a folyadéktranszport figyelembevételével is tudjuk vizsgálni az épületszerkezeteket. Jelen cikkünkben bemutatott módszertanhoz az ebben a szabványban közölt kapcsolt hő- és nedvességtechnikai modellezés nyújtja az alapot.

Számos esetben felmerült az utóbbi időben, hogy szükség lenne olyan módszerre, mellyel egyszerűen összehasonlítható lehet a komplex épületelemek, valamint az épületszerkezeti csomópontok nedvességtechnikai teljesítőképessége is. Ezáltal nem csupán az épületszerkezetek hőhidainak (azaz épületszerkezeten belüli hőáramsűrűségváltozásoknak) elemzésére lenne mód,

hanem az úgynevezett nedvességhidak viselkedésére és hatására is fény derülhetne, melyekkel bemutatható lenne az épületszerkezeten belüli nedvességáramsűrűségváltozás is. A kérdés az, hogy szükséges lehet-e külön vizsgálni a nedvességhidakat az épületszerkezeteken belül, vagy ahol hőhid alakul ki, ott minden esetben nedvességhid is található (esetleg fordítva). A következőkben egy állandósult állapotbeli kapcsolt hő- és nedvességtranszport modellezésen alapuló megoldást mutatunk be, mellyel képesek lehetünk elemezni a komplex épületelemek és épületszerkezetek nedvességtechnikai viselkedését is.

2. | KAPCSOLT HŐ- ÉS NEDVESSÉGTRANSPORT (HAM) MODELLEZÉSE

A nedvességhidak elemzéséhez a hőhidak meghatározáshoz alkalmazott állandósult állapotbeli hővezetés differenciálegyenletét kell alapul vennünk és kiegészítenünk (1. egyenlet), továbbá kapcsoltan a nedvességtranszport differenciálegyenletét (2. egyenlet) is meg kell oldanunk. Ezen egyenleteket az épületszerkezetek és épületelemek belüli nedvességvándorlás numerikus számításáról szóló szabvány ismerteti [5]. Az egyenletek segítségével a vizsgált épületelemek és épületszerkezeteken, illetve felületükön meghatározható „q” hőáramsűrűség és „g” nedvességáramsűrűség is, mely későbbi számításaink alapját fogja képezni.

$$\nabla q = \nabla[\lambda_{\text{eff}} \cdot \nabla T + L_v \cdot \delta_v \cdot \nabla(\varphi \cdot p_{\text{sat}})] = 0 \quad (1)$$

$$\nabla g = \nabla[\xi \cdot D_w \cdot \nabla \varphi + \delta_p \cdot \nabla(\varphi \cdot p_{\text{sat}})] = 0 \quad (2)$$

Az 1-es és 2-es parciális differenciálegyenlet kapcsolt megoldása során lehetőségünk adódik, hogy az anyagok λ_{eff} effektív hővezetési tényezőjét mind a hőmérséklet, mind pedig a nedvességtartalom alapján változtassuk. Ehhez ismernünk kell az adott anyag hővezetési tényezőjére vonatkozó, hőmérséklet- és nedvességtartalomváltozást leíró konverziós tényezőket, melyekre laboratóriumi mérések hiányában a vonatkozó szabványban [6] találunk táblázatos tervezési értékeket. Figyelembe tudjuk venni továbbá a víz párolgásának hatásait is, melyhez a víz L_v párolgáshőjének, δ_v páradiffúziós tényezőjének, valamint Φ relatív nedvességtartalomnak és p_{sat} telítési nedvességtartalom meghatározása szükséges. A nedvességtranszport egyenletében pedig figyelembe kell vennünk a kapillárisan aktív anyagok adott relatív nedvességtartalomhoz tartozó D_w folyadéktranszport tényezőjét és ξ differenciális nedvességkapacitását is, továbbá δ_p páradiffúziós tényezőjét is.

Az épületszerkezetek hőhidait a vonalmenti hőátbocsátási tényezővel jellemezzük, mely megmutatja, hogy az adott csomópont egy folyóméteren egy Kelvin hőmérsékletkülönbség hatására hány Joule energia áramlik át egy másodperc alatt. Utóbbi hányadost a mértékegységek felírásánál Watt-ként adjuk meg ($W=J/s$). Az épületszerkezetek hőhidainak számítását bemutató szabvány [7] alapján a vonalmenti hőátbocsátási tényezőt a két vizsgált teret elválasztó épületemelet L_{2D} termikus kapcsolati tényezőjéből, valamint a tereket elválasztó j darab „egydimenziós” épületemelet U_j hőátbocsátási tényezőjének és l_j hosszának ismeretében a következőképpen lehet megadni:

$$\Psi = L_{2D} - \sum U_j \cdot l_j \quad (3)$$

A termikus kapcsolati tényező a belső felületi hőáramsűrűség hőmérsékletkülönbséggel és belső hosszal vett hányadosa:

$$L_{2D} = Q / (l \cdot \Delta T) \quad (4)$$

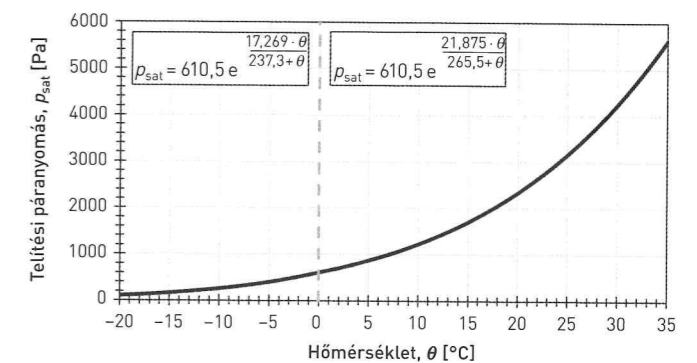
A nedvességhidak jellemzésére a vonalmenti hőátbocsátási tényezőhöz hasonló módon meghatározhatunk egy vonalmenti nedvességátbocsátási tényezőt, melyet jelöljünk „v”-vel. Ez a tényező megmutatja, hogy egységnyi párányomáskülönbség hatására egy másodperc alatt egy folyóméter csatlakozó épületszerkezeti szakaszon hány kg nedvességtöbblet képes áthaladni a különálló épületelemek nedvességátbocsátási képességéhez képest, melyet az alábbi összefüggéssel adhatunk meg:

$$v = G / (l \cdot \Delta p) - \sum M_j \cdot l_j \quad (5)$$

Az 5-ös egyenlet alapján látható, hogy a vonalmenti nedvességátbocsátási tényező számításához meg kell határozunk a vizsgált épületszerkezeti csomópont belső felületén G nedvességáramot, mely a csomópont l belső felületén alakul ki Δp párányomás különbség hatására. Az épületszerkezet két oldalán található párányomásokat azok hőmérsékletének és relatív nedvességtartalmának ismeretében adhatjuk meg:

$$\Delta p = \Phi_i \cdot p_{\text{sat}}(\theta_i) - \Phi_e \cdot p_{\text{sat}}(\theta_e), \quad (6)$$

ahol az adott θ_i belső és θ_e külső hőmérséklet függvényében a telítési párányomást az 1. ábra alapján határozhatjuk meg, míg Φ_i és Φ_e a belső és külső relatív nedvességtartalom értéke.



1. ÁBRA: Telítési párányomás a hőmérséklet függvényében az MSZ EN ISO 13788:2013 alapján

A vonalmenti nedvességátbocsátási tényező meghatározásához szükségünk van továbbá az egyes csatlakozó épületelemek „egydimenziós” nedvességátbocsátási tényezőjére is, melyet „M”-el jelöltünk. A nedvességátbocsátási tényező homogén, egyrétegű, nem kapillárisan aktív épületelemek esetén 1 m-el szorozva megegyezik a páradiffúziós tényezővel. Azonban mivel az általunk végzett kapcsolt hő- és nedvességtranszport (Heat And Moisture transport, HAM) szimuláció során nem csak a pára-, hanem a folyadéktranszportot is figyelembe vesszük, valamint az „egydimenziós” esetben is kétdimenziós, komplex szimulációt végzünk, ezért szükséges a fogalmak elválasztása és új tényező bevezetése. A nedvességátbocsátási tényező „q” belső felületi nedvességáramsűrűség (avagy nedvességfluxus) Δp kétoldali párányomás különbséggel vett hányadosa, mértékegysége $kg/(m^2 \cdot s \cdot Pa)$, egyszerűsítve s/m .

* doktorjelölt, BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

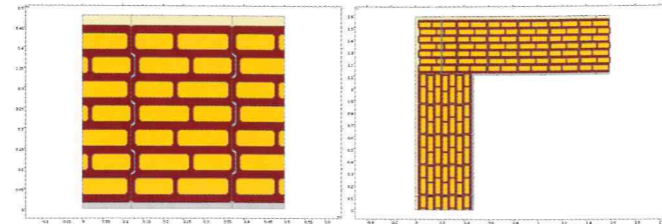
** tanszékvezető, egyetemi docens, BME Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

3. | HŐHIDAK ÉS NEDVESSÉGHIDAK VIZSGÁLATA

A hőhidak és nedvességvidak viselkedését cikkünkben két, falsarkot bemutató példán keresztül szemléltetjük. Az állandósult állapotbeli végeleemes kapcsolt HAM szimulációt Comsol Multiphysics szoftverrel készítettük, melyben lehetőségünk van bármilyen parciális differenciálegyenlet-rendszer kapcsolt megoldására. A cikkben bemutatott szimulációkhoz januári budapesti külső klímát vettünk fel (0,9 °C és 73% relatív légnedvességtartalom), míg a belső légállapotokat a nedvességvándorlás numerikus szimulációjáról szóló szabvány C melléklete alapján [5] határoztuk meg (20 °C és 41% relatív légnedvességtartalom). A peremfeltételekhez szabványos hőátadási és nedvességátadási tényezőket alkalmaztunk [5].

Első példánkban egy kőzetgyapattal (MW) és egy expandált polisztirolhabbal (EPS) töltött falazóblokkból kialakított falsarok esetén határozzuk meg a vonalmenti hőátbocsátási és nedvességátbocsátási tényezőket. A vizsgálat érdekességét az adja, hogy a példában szereplő falazóblokkokhoz hasonló elemeket gyártó és forgalmazó vállalatok a termékeik adatlapjain egységesen 5/10 páradiffúziós ellenállási számot tüntetnek fel a hőszigetelő töltetűl függetlenül a falazatok és falazati termékek hőtechnikai tulajdonságainak meghatározási módszereit közlő szabvány [8] A melléklete alapján. Amennyiben ez igaz, úgy jelen vizsgálat alapján mind a falazatok „M” nedvességátbocsátási tényezőjére, mind pedig „v” vonalmenti nedvességátbocsátási tényezőjére egyező értéket kellene kapnunk. Belátható azonban, hogy míg a kőzetgyapot hőszigetelések páradiffúziós ellenállási száma 1-3,5 közötti, az expandált polisztirolhabokra vonatkozó 20-100 közötti értékek ennél kb. 20-30-szor nagyobbak, tehát az EPS termékek lényegesen kisebb mértékben páraáteresztők, mint a kőzetgyapokok [9].

A falakról és falsarkokról kétdimenziós, részletes geometriai modelleket készítettünk, melyek a 2. ábrán láthatók. Az anyagtulajdonságokat laboratóriumi mérések alapján vettük fel [10]. A két eltérő töltetű falazóblokk esetén mind az égetett kerámia,



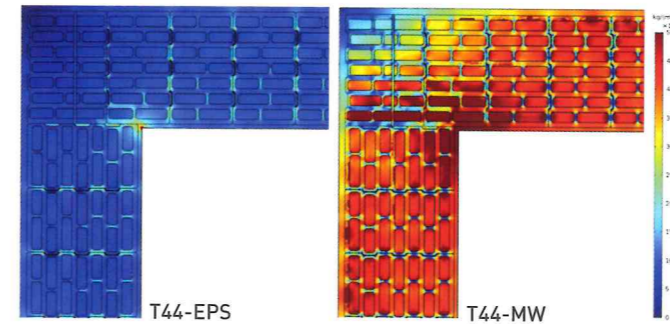
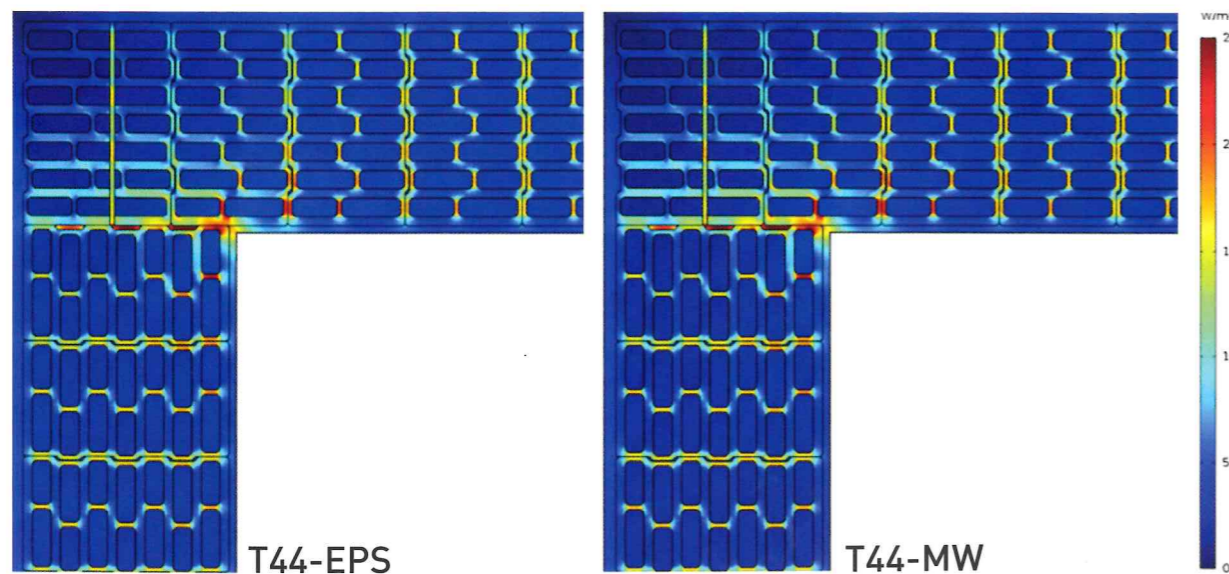
2. ÁBRA: A numerikus vizsgálatokhoz alkalmazott geometriai modellek: zavartalan falszakasz (balra) és falsarok csomóponti kialakítás (jobbra)

mind a belső oldalon alkalmazott 1,5 cm gipszes vakolat, mind pedig a külső oldalon lévő 2 cm vastagságú hőszigetelő vakolat megegyező volt.

A szimulációk elvégzése után a keresztmetszetekben a hőáramsűrűségeloszlást (lásd 3. ábra) vizsgálva a hőáramok azonos útvonalat mutatnak. A falazóblokkokban a legnagyobb hőáramsűrűségek a hőáramokkal párhuzamos égetett kerámia részeken, a nüt-féderes kapcsolatnál valamint a belső távtartó bordáknál alakulnak ki, továbbá megnövekedett hőáramsűrűségeket látunk a sarokkialakítás azon pontjainál is, ahol függőleges habarcskitöltésre volt szükség.

A zavartalan falazat hőátbocsátási tényezője kőzetgyapot töltet esetén $U_{T44-MW} = 0,192 \text{ W/m}^2\text{K}$, míg EPS töltet esetén $U_{T44-EPS} = 0,216 \text{ W/m}^2\text{K}$ -re adódott. A 12,5%-nyi többletet a kőzetgyapot és az expandált polisztirolhab eltérő hővezetési tényezője okozza, előbbi 0,031 W/mK-el, utóbbi 0,037 W/mK-el vettük figyelembe. A szimulációkat lefuttatuk a nedvességtranszport elhagyásával is. Ekkor 0,165 W/m²K és 0,181 W/m²K hőátbocsátási tényezőket kaptunk. A nedvességvándorlást is figyelembe véve tehát kőzetgyapot töltet esetén 16,4%-al, EPS esetén 19,3%-al nagyobb hőátbocsátási tényezőt kapunk, melynek oka a töltőanyagok eltérő nedvességtechnikai viselkedése. Ez a jelentős különbség számottevő lehet az épületek hőveszteségeinek számításakor!

3. ÁBRA: Hőáramsűrűség-eloszlás a falsarok keresztmetszetében



4. ÁBRA: Nedvességáram sűrűség-eloszlása a falsarok keresztmetszetében

A falsarokra kiszámítottuk a vonalmenti hőátbocsátási tényezőket is, melyek $\psi_{T44-MW} = 0,0377 \text{ W/mK}$ és $\psi_{T44-EPS} = 0,0405 \text{ W/mK}$ -re adódtak. Amennyiben a nedvességvándorlást elhanyagoljuk, a falsarok vonalmenti hőátbocsátási tényezői növekednek: 0,0554 W/mK és 0,0544 W/mK. Az értékek között kapcsolt HAM szimuláció esetén 7%, míg csak hőtechnikai szimuláció esetén 1,8% differencia adódott.

A nedvességáramsűrűségeket ábrázolva rögtön szembetűnő a két eltérő hőszigetelőanyaggal töltött falazóblokk nedvességtechnikai viselkedésének különbsége (lásd 4. ábra). EPS töltet esetén a legnagyobb nedvességáramsűrűségek az égetett kerámia részeken találhatók, elsősorban az összeérő falazóblokk részeken, valamint a belső saroknál. A kőzetgyapattal töltött falazóblokkok esetén viszont a nedvességvándorlás túlnyomórészt a hőszigetelőtöltetek keresztmetszetében következik be, és a belső falsaroknál lényegesen kiterjedtebb nedvességáramsűrűségi zóna alakulhat ki.

Zavartalan falazat esetén a nedvességátbocsátási tényező $M_{T44-MW} = 22,8 \cdot 10^{-12} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ és $M_{T44-EPS} = 5,87 \cdot 10^{-12} \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ értéket vettek fel. Ezen értékeket értelemszerűen kizárólag hőtechnikai vizsgálattal nem tudjuk előállítani. Látható, hogy a kőzetgyapattal töltött falazóblokkokból épített falazat mintegy 3,88-szor több nedvességet képes áttereszteni egységnyi idő és páranomás alatt, mint az EPS-el töltött. Ezen értékeket a falazatra jellemző páradiffúziós tényezőnek tekintve meghatározhatjuk a páradiffúziós ellenállási számokat is, melyhez a levegő $\delta_1 = 0,17 \cdot 10^{-9} \text{ kg/m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ páradiffúziós tényezőjét osztjuk a falazatok páradiffúziós tényezőjével. Kőzetgyapot esetén $\mu_{T44-MW} = 7,5$ -et, míg EPS töltet esetén $\mu_{T44-EPS} = 29$ -et kaptunk. A szimulációk során az égetett kerámia páradiffúziós ellenállási számát labormérések alapján 10/15-nek, a vakolatokét 8-nak, a kőzetgyapotét 1,3-nak, míg az expandált polisztirolhabét 30-nak vettük fel. Ezek alapján láthatjuk, hogy kőzetgyapot töltet esetén a falazatra kapott értéket a töltet alacsony páradiffúziós ellenállása csökkentette, viszont ezzel szemben a polisztirolhab jelentősen növelte. Az a gyakorlat, mely szerint a termékgyártók az égetett kerámia szabványos μ -értékét tüntetik fel a falazóblokkok páradiffúziós ellenállási számaként nem szerencsés, hiszen az jelentősen eltérhet a szimulációval előállított értékhez képest!

A vonalmenti nedvességátbocsátási tényezőket kiszámítva $v_{MW} = 3,1 \cdot 10^{-12} \text{ kg/m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ és $v_{EPS} = 0,68 \cdot 10^{-12} \text{ kg/m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$ -t kaptunk. Ez esetben a kőzetgyapattal töltött falazóblokkokból készült falsarok 4,56-szor több vonalmenti nedvességátbocsátási képességgel rendelkezett, mint a polisztirolal töltött változat.

4. | ÖSSZEGRÉS ÉS MEGÁLLAPÍTÁSOK

Cikkünkben bemutattunk egy kapcsolt hő- és nedvességtranszport modellezésen alapuló módszert, mellyel meghatározható az egyes épületelemek és épületszerkezetek hő- és nedvességátbocsátási képessége. Kapcsolt HAM szimuláció alkalmazásával vizualizálhatóak a hő- és nedvességvidas területek egy épületszerkezeten vagy szerkezeti csomóponton belül, továbbá akár meghatározhatóak az összetett építőelemek páradiffúziós ellenállási számai is.

A bemutatott példa alapján láthattuk, hogy a csupán hőtechnikai szimulációval kapott hőátbocsátási tényezőnél jelentősen nagyobb értékeket kaphatunk, ha kapcsolt HAM szimulációt végzünk, mely során figyelembe vesszük a nedvességvándorlás hatásait is. A vizsgálat során bemutattuk, hogy a falazóblokkon belüli hőtranszport hasonlóan, míg a nedvességvándorlás jelentősen eltérően alakul, EPS töltet esetén a kerámia keresztül, míg kőzetgyapot esetén a tölteten keresztül a jelentősebb nedvességáramok. Továbbá megfigyelhető, hogy eltérő töltetek esetén a hőhidak és nedvességvidak jelentősen eltérő mértékek is lehetnek. A vonalmenti hőhidak mértékét is befolyásolja a nedvességvándorlás figyelembevétele.

A vonalmenti nedvességátbocsátási tényező számításával és elemzésével az épületszerkezeti csomópontok többlet-nedvességáteresztő képessége vizsgálhatóvá válik. Ezáltal az épületszerkezeti kialakítást már nem csak hőtechnikailag, a vonalmenti hőátbocsátási tényező vagy a sajátléptékben mért belső felületi hőmérséklet segítségével vizsgálhatjuk, hanem nedvességáteresztő képességük szerint is.

Közösnyilvánítás

A tanulmány alapjául szolgáló kutatást az Emberi Erőforrások Minisztériuma által meghirdetett Felsőoktatási Intézményi Kiválósági Program támogatta, a BME FIKP-VÍZ tématerületi programja keretében.

HIVATKOZÁSOK

- [1] 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról, <http://www.njt.hu>
- [2] 76/2008. (VI. 30.) Korm. rendelet az épületek energetikai jellemzőinek tanúsításáról, <http://www.njt.hu>
- [3] MSZ 24140:2015 Épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számításai
- [4] MSZ EN ISO 13788:2013 Épületszerkezetek és épületelemek hő- és nedvességtechnikai viselkedése. A kritikus felületi nedvességet és a szerkezeten belüli páralecsapódást megelőző belső felületi hőmérséklet. Számítási módszerek (ISO 13788:2001)
- [5] MSZ EN 15026:2007 Épületszerkezetek és épületelemek hő- és nedvességtechnikai viselkedése. A nedvességvándorlás becslése numerikus szimulációval
- [6] MSZ EN ISO 10456:2008 Építési anyagok és termékek. Hő- és nedvességtechnikai tulajdonságok. Táblázatos tervezési értékek, eljárások a minősítési és a tervezési hőtechnikai értékek meghatározására (ISO 10456:2007)
- [7] MSZ EN ISO 10211:2017 Hőhidak az épületszerkezetekben. Hőáramok és felületi hőmérsékletek. Részletes számítások (ISO 10211:2017)
- [8] MSZ EN 1745:2012 Falazatok és falazati termékek. A hőtechnikai tulajdonságok meghatározásának módszerei
- [9] Bozsaky Dávid: Építési Hőszigetelő Anyagok. Terc Kft. [2017]
- [10] Nagy Balázs, Tóth Elek: Hygrothermal behaviour of hollow and filled ceramic masonry blocks. RILEM Proceedings PRO 112: Moisture in Materials and Structures. pp. 279-288. [2016]