



Nagy Balázs

Építőanyagok vizsgálata dinamikus építészeti számításokhoz – helyszíni hőtechnikai

Az épületszerkezeti, épületfizikai és -energetikai szakértői munkák során az épületek, illetve épületszerkezetek dinamikus hő- és nedvességtranszportjának modellezése egyre inkább teret nyer magának hazánkban is. Az e fajta komplex vizsgálatokhoz, melyek a valóságot kiemelkedő mértékben képesek modellezni, azonban az egyes építőanyagok hő- és páratechnikai viselkedésének, anyagtulajdonságainak részletes és mély ismerete elengedhetetlen. Ezen paramétereket épületfizikai és anyagtani helyszíni, valamint laboratóriumi mérésekkel, továbbá a mért adatok ismeretében számításokkal határozhatjuk meg. Jelen cikkben a kapcsolt hő- és páratechnikai számítások alapjairól, valamint a helyszínen is elvégezhető hőtechnikai vizsgálatokról, hőtárolási- és hővezetési tényező-mérésről lesz szó.

Bevezetés

Az épületek energetikai számításakor jelenleg döntő többségében csak az épületszerkezetek hőtechnikai ellenőrzése készül el, melyet szinte kizárólagosan állandósult állapotok feltételezésével számítunk. Az állagvédelmi vizsgálatokat a vonatkozó épületenergetikai jogszabályok jelenleg nem írják elő, de amennyiben páratechnikai számításokra is sor kerül, leggyakrabban szintén állandósult állapotbeli egydimenziós vizsgálatot folytatnak le a szakemberek.

A többdimenziós geometriai modellek, a tranziens (instacioner) állapot, továbbá a kapcsolt hő- és páratechnikai modellezéséhez közkeletű vélekedés, hogy jelenleg nem áll rendelkezésre elegendő adat sem a hazánkban előforduló építőanyagokról, sem pedig feldolgozott adatsorok az épületek környezetében található éghajlatról. Holott az állandósult hőáramlás jelenségét már az első hőtechnikával foglalkozó magyar nyelvű kiadvány, az Építési Zsebkönyv I. kötete is olyannak nyilvánította, mellyel „a valóságban aligha fogunk találkozni” [1].

Ezzel szemben azonban már hazánkban is elérhetőek azon eszközök és módszertanok, melyekkel a szakértői munkák során a szakemberek beszerezhetik a szükséges adatokat és rövid idő alatt lefolytathatják a dinamikus számításokat. E számítások során a lokális körülmények közé helyezhető a tényleges épületmodell, valamint az épület- vagy épületem modelljének anyagtulajdonságait a helyszínen felhasznált építőanyagok és komponensek helyszíni roncsolásmentes, illetve roncsolással járó, vagy előzetes, illetve utólagos laboratóriumi vizsgálataiból megismerve a valóságot jól közelítő számításokat végezhetünk el.

Ahhoz, hogy megismerjük a szükséges vizsgálandó anyagtulajdonságokat és paramétereket, a dinamikus hő- és nedvességtranszport alapegyenleteit nem árt megismerni.





ületfizikai hő- és páratechnikai mérések

Hő- és nedvességtranszport alapjai

Az épületek vagy épületszerkezetek dinamikus hő- és nedvességtranszport modellezéséhez a vizsgált tartomány hőmérséklet- és nedvességeloszlásának egyidejűleg ismeretére van szükségünk, melyek azonban egymástól is függenek. Az építőanyagok épületfizikai tulajdonságai többek között mind a hőmérsékletük, mind pedig a nedvességtartalmuk függvényében általában nem-lineárisan változnak, melyeket a részletes számítások és szimulációk során figyelembe kell vennünk. A hőmérséklet- és nedvességtranszport-egyenleteket tehát egymáshoz kapcsoltnak kell megoldanunk, melyekre számos célszoftver (pl. WUFI, DELPHIN, BMOIST, EPICAC stb.) vagy univerzális szimulációs rendszer (pl. Comsol Multiphysics) áll rendelkezésünkre, utóbbi esetben a fizikai rendszert a felhasználó a modellezni kívánt jelenségek széles tárházával bővítheti.

A kapcsolt hő- és nedvességtranszport numerikus modellezéséhez szükséges parciális differenciálegyenleteket az alábbiakban találhatjuk (az egyszerűsítés végett egydimenziós tartományra felírva), melyek közül az (1)-es a hőtranszportfolyamatokat, míg a (2)-es a nedvesség- és páratranszportot írja le [2]:

$$\frac{\delta H}{\delta T} \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left(\lambda \frac{\delta T}{\delta x} \right) + h_v \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{\delta \delta p}{\mu \delta x} \right) \quad (1)$$

$$\rho_v \frac{\delta \psi}{\delta \varphi} \frac{\delta \varphi}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left(\rho_v D_v \frac{\delta \psi}{\delta \varphi} \frac{\delta \varphi}{\delta t} \right) + \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{\delta \delta p}{\mu \delta x} \right) \quad (2)$$

ahol:

- H – nedves építőanyagok entalpiája [J/m³], melyhez az építőanyagok ρ testsűrűségének [kg/m³] és c_p fajlagos hőkapacitásának [J/kgK] ismerete szükséges;
- T – termodinamikai hőmérséklet [K];
- t – idő [s];
- x – tartomány [m];
- λ – a hővezetési tényező [W/mK];
- h_v – a víz párolgáshője [J/kg];
- δ – az építőanyagok páradiffúziós tényezője [kg/msPa];
- μ – az építőanyagok páradiffúziós ellenállási száma [-];
- p – a parciális páramomás [Pa];
- ρ_v – a víz sűrűsége [kg/m³];
- ψ – a nedves anyagok víztartalma [m³/m³];
- φ – relatív légnedvesség [-];
- D_v – nedvességtranszport tényező [m²/s], melynek meghatározásához ismernünk kell az építőanyag adott relatív légnedvesség melletti nedvességtartalmát megadó függvény (szorpciós, illetve deszorpciós izoterma) az A_v vízfelvételi tényezőjét [kg/m²s^{1/2}] is.

Az (1) egyenlet bal oldalán a nedves építőanyagok hőtartalma található a hőmérséklet és az idő függvényében, a jobb oldal pedig a hő- és nedvességfüggő hővezetést és a páraáramlás okozta hőtartalom-változást írja le, melyet látens hőeffektusnak

is nevezünk. A (2) egyenlettel pedig a nedvességtranszport írható fel egydimenziós tartományban, mely során a szerkezetek egyes pontjaiban történő nedvesség- és páraáramlást az anyagok nedvességtartalmának a relatív légnedvességtől és az idő függvényében határozhatjuk meg, a jobb oldalon szétválasztva a nedvességtranszportot és a páraáramlást.

A helyszíni és laboratóriumi épületfizikai vizsgálatok során az előbbieken bemutatott egyenlet hőmérséklet- és nedvességtartalom-függő anyagtulajdonságait tudjuk meghatározni, valamint a felületi hőmérsékletek ellenőrzésével a számításokban szereplő modellt validálni, igazolni tudjuk. Az egyenletrendszer időben változó megoldásához azonban a peremfeltételek, azaz a környezeti paraméterek, mint például a külső és belső hőmérséklet, relatív légnedvesség és légnyomás, a szélsébség, szélirány, csapadék (melynek csapóeső hányada is fontos információ), a napsugárzás vagy a légnyomás. Továbbá szükséges az egyes peremfeltételek és anyagtulajdonságok közötti kapcsolatokhoz elengedhetetlen fizikai jellemzők ismerete, melyek szintén közvetetten vagy közvetlenül helyszíni, illetve laboratóriumi vizsgálatokkal határozhatóak meg. Ilyenek például az abszorpciós, reflexiós, transzmissziós és emissziós tényezők vagy akár a hőátadási tényező, melynek meghatározására és becslésére is számos módszer létezik a szakirodalomban.

Helyszíni épületfizikai vizsgálatok

Helyszíni épületfizikai vizsgálatok végzése során az épületszerkezetek hőátbocsátási tényezőjének vizsgálatára van elsősorban lehetőség. Mérhetünk továbbá még hővezetési tényezőt, illetve rendkívül fontos a számításokhoz szükséges peremfeltételek rögzítése is. Meghatározhatjuk az építőanyagok nedvességtartalmát, illetve az épületszerkezetekben tapasztalható relatív légnedvesség-állapotok mérésére van lehetőségünk. Jelen cikk-sorozat első részében a hőátbocsátási tényező és a hővezetési tényező vizsgálatával foglalkozunk.

Hőátbocsátási tényező helyszíni vizsgálata

Termográfiával

A legfontosabb megjegyezni, hogy egyetlen hőkamerás felvétel alapján hőátbocsátási tényezőt meghatározni nem szabad. Mivel egy épületszerkezet hőátbocsátási tényezője a valóságban percről-percre változik, az semmiképpen nem jellemezhető egy pillanatfelvétellel. Jelenleg azonban már elérhetőek azok a hőkamerák is, melyek képesek hosszú sorozatmérések elvégzésére, akár több napig rögzített pozícióból történő adatgyűjtésre, illetve távélérésből történő vezérlésre is.

Ez esetben is meg kell azonban jegyeznünk, hogy a kamerával rögzített hőképek vagy teljesen radiometrikus videófelvelesek minden esetben további utólagos feldolgozásra szorulnak, melyek több száz hőkép esetén lényegesen időigényesebbnek bizonyulhatnak, mint



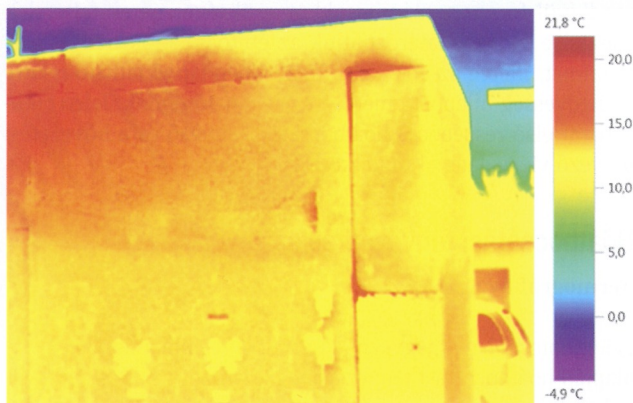
„célműszerrel” történő hőátbocsátástényező-mérés esetén, azonban szerkezeti kapcsolatok, csomópontok instacioner hőtechnikai viselkedésének vizsgálatára csak így tud lehetőségünk nyílni.

A hőképek esetén minden esetben kritikus, hogy beállítsuk a vizsgált felület pontos emissziós tényezőjét, valamint a felületre sugárzott ún. reflektált hőmérsékletet, melyeket a helyszínen tudunk kimérni. A reflektált hőmérsékletet egy egyszerű trükk segítségével tudjuk kimérni: összegyűrt, majd széthajtogatott alufólia hőfényképezése segítségével a vizsgált felület közelében, mely szabálytalan gyűrt felületű alufólia diffúz reflektáló felületként viselkedik. A gyűrt felületű alufólián hőkamerával mért felületi hőmérséklet jó közelítéssel a környezeti sugárzó hőmérséklettel lesz azonos.

Távolabb elhelyezkedő objektumok vizsgálata esetén fontos továbbá, hogy a hőképeken atmoszférakorrekciót is elvégezzünk, mely során a kamera és a vizsgált felület közötti légréteg mért befolyásoló hatásait küszöböljük ki. Ehhez a léghőmérséklet, relatív légnedvesség-tartalom, valamint a kamera és a felület közötti távolság ismeretére van szükségünk.

Az emissziós tényezőt is mérhetjük közvetlen, amennyiben minden eddig említett korrekciót elvégeztünk, és egyetlen ismeretlen maradt a mérés folyamán: egy gyorsbeállású tapintós hőmérsékletmérővel megmérjük a felület tényleges hőmérsékletét, a hőkamerát a pontos méréshez az emissziós tényező beállításával tudjuk kalibrálni.

Meg kell jegyeznünk azt is, hogy az előbbi korrekciók mind irányfüggőek, azaz a kamera felülethez viszonyított irányának változtatásakor a kalibrációt is újra el kellene végeznünk, továbbá mivel a hőmérsékletviszonyok is természetesen folyamatosan változnak (kültérben jelentősen, de még parancsolt hőmérsékletű beltérben is megfigyelhető a hőmérsékletingadozás hatása), így annak folyamatos rögzítésére és korrekciójára van szükség. A korrekciók elvégzése pedig különösen fontos olyan esetben, amikor a vizsgált hőképen például egyszerre többféle emissziós tényezővel bíró felület is található (pl. fémszerkezetek, üveg), melyek esetén a reflexiós hatásokat is figyelembe kell vennünk mind a mérés folyamán, mind pedig az utólagos feldolgozás és korrekciók során. A hőkamerával történő hőátbocsátástényező-mérés tehát hosszú



1. ábra: Kísérleti modellépület hőfényképe

folyamat, és valójában mivel magát a hőátbocsátási tényezőt a vizsgált felületek közvetett méréséből, valamint a külső és belső hőmérsékletek rögzítéséből tudjuk ez esetben is meghatározni, ezért minden olyan esetben, amikor elkerülhető az alkalmazása, vagy nem hordoz többetinformációt (pl. csomópontok vizsgálata), a közvetlen, pontbeli mérési módszert javallott alkalmazni.

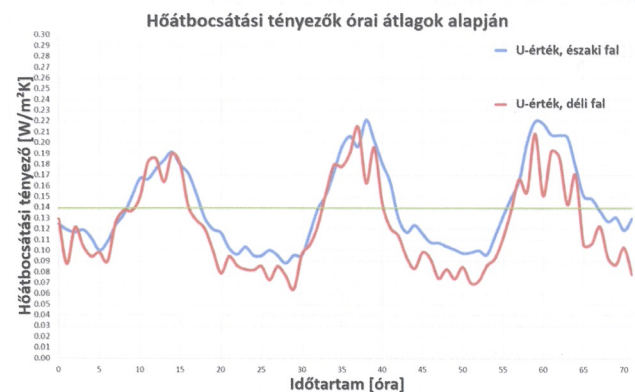
Pontbeli felületi hőmérsékletméréssel

Alapvetően e módszer segítségével vizsgálunk leggyakrabban helyszínen épületszerkezetek hőátbocsátási tényezőjét. A mérés alapja az épületszerkezetek belső vagy külső felületén elhelyezett felületi hőmérsékletmérők, továbbá a belső és külső tér hőmérsékletének szinkronizált regisztrálása. Mind a felületi, mind pedig a léghőmérsékletmérők esetén el kell kerülnünk, hogy közvetlen sugárzásnak, valamint az időjárás viszontagságainak (szél, csapadék) legyenek kitéve. Falszerkezetek vizsgálata során célszerű az északi oldalon, belső felületi hőmérsékletek rögzítésével folytatni a méréseket.

Mint azt az előbbiekben már leszögeztük, ez esetben is több napos mérési sorozat rögzítése szükséges minden esetben, majd a többnapos mérés során számított pillanatnyi hőátbocsátási tényezők figyelmes statisztikai kiértékelésével és az arra alkalmas mérések átlagolásával kaphatjuk meg a szerkezetre jellemző hőátbocsátási tényezőt. Fontos, hogy a kiértékelt szakasz mentes legyen a mérési és a mérést befolyásoló időjárási anomáliáktól (pl. esős idő).

A 2. ábrán két napos konszolidációs időszak után rögzített, belső felületi hőmérsékletek felhasználásával számított hőátbocsátástényező-alakulást találunk egy kísérleti modellépület északi, illetve déli oldalán történt mérésorozat eredményeként. Az idősort éjféltől indítjuk az ábrán. Megfigyelhető, hogy a déli oldalon mért pillanatnyi hőátbocsátási tényező értékek általában alacsonyabbak, mint az északi oldal mérési eredményeiből számítottak, továbbá látható az is, hogy a szerkezet hőtehetetlenségéből adódóan a külső hőmérsékletváltozás a kísérleti épület 40 cm vastag falszerkezetének belső oldalán számottevően késleltetve jelenik meg a mérés folyamán.

Jelenleg már számos mérőrendszer elérhető a hazai piacon is, melyek esetén a beépített számítási eljárásokat fenntartásokkal kezeljük, ilyenek például az előre rögzített hőátbocsátási tényezővel számító megoldások, melyeket legfeljebb belső felületi



2. ábra: Hőátbocsátási tényező időbeli változása, északi és déli tájolású falon mérve

méréssel alkalmazzunk. Azonban a hőátadási tényező valójában a beltérben is folyamatosan változik, melyet a hatályban lévő szabványos hőátadási számítások esetén is tapasztalunk [3]. A vizsgálatok során a következő összefüggést tudjuk alkalmazni a pontosabb mérések érdekében, melyben a hőátadási tényezők meghatározására a későbbiekben részletesen kitérünk:

$$U = \frac{(h_c + h_r) \cdot (t_i - t_{si})}{t_i - t_e} \quad (3)$$

ahol:

- h_c – a konvektív hőátadási tényező [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$];
- h_r – a sugárzási hőátadási tényező [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$];
- t_{si} – a belső felületi hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$];
- t_i és t_e – a belső és külső léghőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$].

Hőáramméréssel

Megemlíthető továbbá, hogy a helyszíni mérések esetén a hőátbocsátási tényező bizonytalanságát is ki tudjuk küszöbölni közvetlen felületi hőáramméréseken alapuló vizsgálattal. E módszer esetén hőárammérő lapokat vagy korongokat rögzítünk a felületre, melyek az adott szenzoron keresztül a felületi hőáramsűrűséget rögzítik. A forgalomban kapható fejlett szenzorok figyelembe veszik a saját maguk hővezetési ellenállását is a mérés folyamán. E mellett pedig csupán a külső és belső léghőmérséklet ismeretére van szükségünk a hőátbocsátási tényező meghatározásához:

$$U = \frac{q}{t_i - t_e} \quad (4)$$

ahol:

- q – a hőárammérővel mért felületi hőáramsűrűség [W/m^2];
- t_i és t_e – a belső és külső léghőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$].

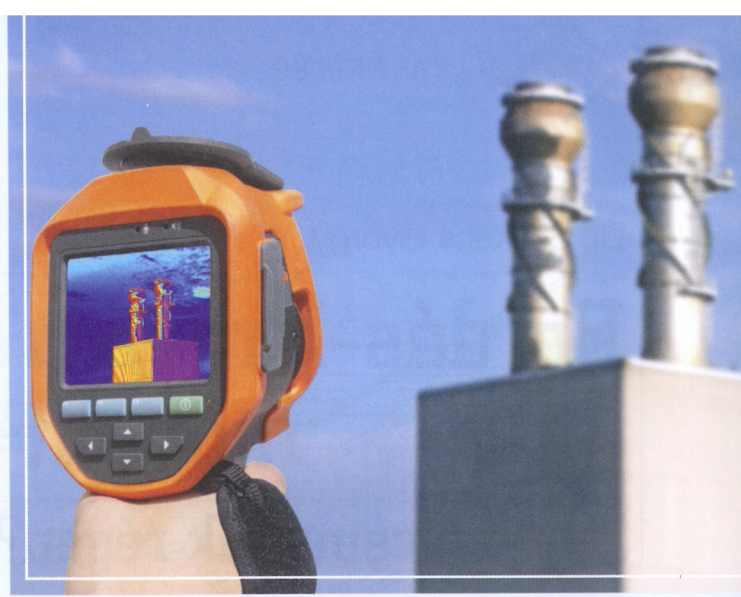
Hővezetési tényező helyszíni mérése

Nem elterjedt mérési módszer hazánkban az építőiparban, azonban az építőanyagok hővezetési tényezőjének helyszíni vizsgálatára is lehetőségünk van, igaz ez esetben minimális roncsolással kell élnünk, ha már meglévő szerkezeteken vizsgálódunk.

A helyszínen is könnyen alkalmazható hővezetési tényező mérési eljárást úgynevezett „non-steady-state thermal needle probe” segítségével, azaz nem állandósult állapotbeli beszúrótűs hővezetési tényező-mérő szenzorral tudjuk elvégezni. A mérés tehát teljesen tranzienst állapotban zajlik, szemben a labormérések során a hazai laborok túlnyomó többségében alkalmazott stacioner állapotot kialakító mérésekkel szemben, de a mérési eredményeket akár $0,02\text{--}6 \text{ W}/\text{mK}$ -es tartományban végezhetjük. Pontosság tekintetében a helyszíni mérés elmarad a laboratóriumitól ($\pm 0,01 \text{ W}/\text{mK}$ -es, illetve $\pm 10\%$ -os hibahatár szemben az akár ezredre pontosan végezhető labormérésekkel), azonban jelentősen gyorsabb mérést biztosít annál (pár perces mérési idő, szemben a labormérések sokszor akár egy-két napot is felölölő mérésével). A helyszíni vizsgálat hátránya továbbá, hogy a hővezetési tényező mérése mindig csak a próbatest pillanatnyi kondíciójában (hőmérséklet, nedvességtartalom) lehetséges, míg laborkörülmények között van lehetőség a próbatestek hőmérsékletének és nedvességtartalmának beállítására is.

A beszúrótűs vizsgálat során a szenzort a vizsgálandó közegbe szúrva, annak hőmérsékleti állandósulása után rövid $30\text{--}120$ másodperces fűtési szakasz következik, mely során a vonalhőforrás fűtési teljesítményét mérjük, és rögzítjük a szenzor hőmérsékletváltozását. A szenzor mindössze a környezetben található $20\text{--}50 \text{ mm}$ -nyi anyaggal lép kapcsolatba, ezen a területen belül zajlik a vizsgálat. A mérési módszer eddig az amerikai ASTM D 5334 -08 jelzetű szabványban került rögzítésre, mely talajok és puha kőzetek hővezetési tényezőjének beszúrótűs vizsgálatáról szól.

A mérési eljárást tehát alapvetően talajok hővezetési tényezőjének meghatározásához fejlesztették és használják, leggyakrabban az agráriumban, azonban teljesen alkalmas az építőanyagok vizsgálatára is, amennyiben abba beszúrható a szenzor. Az egyetlen



megkötés, hogy minden esetben figyelembe kell vennünk, hogy a laboratóriumi mérésnél magasabb hibahatárral dolgozunk, így hőszigetelő anyagok minősítésére semmiképpen nem lesz alkalmas a módszer. Azonban régi, beépített és előregedett (pl. szarufák között elhelyezett) hőszigetelések vizsgálatát akár a helyszínen is pillanatok alatt elvégezhetjük, megfelelő adatokat kapva az avult állapotú hőszigetelés további sorsának kitalálásához. Keményebb anyagok esetén a szenzort jól illeszkedően fúrt lyukba helyezük. A mérési rendszer további előnye, hogy két tűs kialakításban nem csupán a hővezetési tényezőt, de hőkapacitás és hődiffúziós mérésére is alkalmas.

Nem utolsó sorban megjegyezzük, hogy a talajok hővezetési tényezőjének ismerete az épületenergetikában is szükséges, mivel a részletes energetikai számításoknál a talajjal érintkező padló, illetve pincefalak hőveszteségeinek meghatározásáról szóló MSZ EN ISO 13370 szabványos számítási módszer bemenő adatként kezeli a talaj hővezetési tényezőjét, melyet a gyakorlatban nagyvonalúan alapértelmezettként szoktak hagyni a szakemberek, számottevően befolyásolja a számítás eredményét.

Összegzés

Jelen cikkben az épületek és épületszerkezetek dinamikus hő- és páratechnikai számításainak alapjait tárgyaltuk, mely módszertan segítségével számított hőátbocsátási tényezők helyszíni vizsgálatát is áttekintettük. Kitértünk továbbá az építőanyagok hővezetési tényezőjének lehetséges helyszíni vizsgálatára is. A teljes dinamikus hő- és páratechnikai vizsgálatokhoz azonban a peremfeltételek ismeretére, a peremfeltételek és az épületszerkezetek közötti kapcsolatot leíró tényezőkre, valamint olyan anyagtulajdonságok is szükségesek, melyeket megfelelő pontossággal csupán laboratóriumi körülmények között tudunk vizsgálni. A cikk folytatásában az előbbieken felsorolt paramétereikről és anyagtulajdonságok laborvizsgálatáról lesz majd szó.

Felhasznált irodalom

- [1] Dr. Möller Károly: *Építési zsebkönyv I. kötet*, Királyi Magyar Egyetemi Nyomda, Budapest, p. 301–350, 1934.
- [2] Künzel H.M.: *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten*; Doktori disszertáció, Universität Stuttgart, 1994.
- [3] Tóth Elek: *A hővezetési tényezők korrekciójának elmélete és gyakorlata*, Magyar Építőipar LI. évf. 5. szám, p. 238–244, 2014.