



Pannon Egyetem

Vegyésmérnöki- és Anyagtudományok Doktori Iskola (VMADI)

Doktori (PhD) értekezés tézisei

Fázisváltó hőtároló mikrokapszulák energiahatékonysági számításai modellházakban

Készítette:

Ferencz Mónika

Okleveles környezetmérnök

Témavezető:

Dr. Feczkó Tivadar

Veszprém

2026

Bevezetés

A hőtárolás az épületfizikában és az épületenergetikai kutatásban meghatározó kérdéssé vált. Az épület termikus viselkedését nemcsak a hőveszteségek és hőnyereségek nagysága, hanem az is meghatározza, hogy a szerkezet mennyire képes ezek időfüggő hatásait mérsékelni. A hőtároló képesség ezért nem másodlagos szerkezeti tulajdonság, hanem a dinamikus termikus viselkedés egyik alapvető meghatározója.

Ebben az összefüggésben a látens hőtárolás kiemelt jelentőségű. Míg az érzékelhető hő tárolása a szerkezeti anyag hőmérsékletének változásához kapcsolódik, a fázisváltáson alapuló tárolás lehetővé teszi, hogy jelentős mennyiségű energia nyelődjön el és szabaduljon fel viszonylag szűk hőmérséklet-tartományban. Épületfizikai szempontból ez azért fontos, mert a tárolási hatás nem egyszerűen a tömeg növekedéséből adódik, hanem olyan hőmérséklet-tartományban jelenik meg, amely közvetlen kapcsolatban áll a beltéri viszonyokkal és a hőkomforttal. Ez magyarázza, hogy a fázisváltó anyagok az épületbe integrált hőtárolás egyik intenzíven vizsgált területévé váltak.

A PCM-alapú megoldások közül a vakolat külön figyelmet érdemel, mert gyakorlati lehetőséget kínál az épület fal belső oldalán megvalósítható látens hőtárolásra. A mikrokapszulázott PCM-et tartalmazó vakolat nem egyszerűen egy újabb anyagréteg, hanem módosítja a szerkezet időfüggő termikus válaszát. Melegebb időszakokban a beérkező hő egy részét elnyeli, majd azt később adja le, ezáltal közvetlenül befolyásolja a beltéri hőmérséklet napi lefutását. Emiatt a PCM hatása nem írható le megfelelően pusztán az abszolút maximumok és minimumok összehasonlításával. Jelentősége a napi hőmérséklet-amplitúdó, a csúcshőmérsékletek időbeli helyzete és a termikusan kedvezőtlen időszakok időtartama felől ragadható meg.

Ez a kérdés különösen fontos könnyűszerkezetes épületek esetében. Alacsony termikus tömegük miatt ezek a szerkezetek gyorsan reagálnak a változó külső körülményekre. Napsugárzás hatására a külső felületek rövid idő alatt jelentősen felmelegedhetnek, és az ebből származó hőterhelés gyorsan megjelenhet a beltérben is. Kis belső térfogatú, könnyűszerkezetes terekben ez nagyobb napi beltéri hőmérséklet-ingadozásban és élesebb hőmérsékletcsúcsokban jelentkezhet. Ilyen körülmények között a dinamikus viselkedés fontosabb, mint az átlagértékek, mert egy napi átlaghőmérséklet elfogadhatónak tűnhet akkor is, ha rövid, de lényeges túlmelegedési időszakok alakulnak ki.

Ez különösen igaz szabadon futó mérési körülmények között, amikor nincs aktív fűtési vagy hűtési rendszer, amely elfedné az épület természetes dinamikus válaszát. Ilyenkor a mért beltéri termikus viselkedés közvetlenül tükrözi a szerkezet, a napsugárzás, a külső hőmérséklet-ingadozás és a hőtároló képesség kölcsönhatását. A free-running mérések ezért különösen alkalmasak a szerkezetbe integrált PCM tényleges hatásának vizsgálatára. Ugyanakkor ez azt is jelenti, hogy az értelmezésnek figyelembe kell vennie a természetes időjárási változékonyságot. A PCM teljesítményének értékeléséhez ezért nemcsak mérési adatokra, hanem olyan megközelítésre is szükség van, amely képes feltárni a hosszú és erősen változó adatsorokban megjelenő összefüggéseket.

A jelen munka alapját egy 2021-ben végzett, 105 napos mérési kampány képezi, amely két azonos könnyűszerkezetes modellházban zajlott. A két ház geometriája és szerkezeti felépítése megegyezett. A különbség az volt, hogy az egyik ház belső falszerkezetében mikrokapszulázott PCM-et tartalmazó vakolat volt, míg a másik referenciaházban nem. A rendelkezésre álló adathalmaz nagy számú, 5 perces időfelbontású nyers szenzoradatokból áll. Az idősorok hossza és sűrűsége lehetővé teszi, hogy a két ház termikus viselkedése ne néhány kiválasztott nap, hanem a teljes mérési időszak alapján legyen értékelhető.

A nagyméretű szenzoradattáris feldolgozása és kiértékelése Python-alapú, reprodukálható munkafolyamatban történt, több esetben statisztikai értékelési módszerekkel. Ennek különös jelentősége van, mert a dolgozat nem néhány kiragadott nap vagy egyedi időjárási helyzet alapján von le következtetéseket, hanem a teljes mérési periódus természetes meteorológiai változékonyságát tartalmazó adathalmazra épít. Ebben az értelemben a nagy adathalmaz kezelése nem pusztán technikai kérdés volt, hanem a levont következtetések érvényességének egyik feltétele.

A dolgozat a PCM-vakolat hatását olyan mérési és kiértékelési keretben vizsgálja, amely lehetővé teszi a beltéri hőmérséklet napi lefutásának, a dinamikus termikus válasznak, valamint a gyakorlati alkalmazhatóság szempontjából lényeges összefüggéseknek az értelmezését. A disszertáció célja ezért nem csupán annak kimutatása, hogy a PCM befolyásolja a termikus viselkedést, hanem annak vizsgálata is, hogy ez a hatás miként jelenik meg egy mért, könnyűszerkezetes rendszerben, és hogyan értelmezhető a gyakorlat szempontjából.

Célkitűzés

Kutatómunkám célja annak meghatározása volt, hogy a mikrokapszulázott fázisváltó anyagot tartalmazó vakolat miként módosítja könnyűszerkezetes modellházak beltéri hőviselkedését valós, természetesen változó külső körülmények között. A vizsgálat középpontjában nem csupán az állt, hogy a PCM jelenléte csökkenti-e a napi hőmérsékleti szélsőértékeket, hanem az is, hogy ez a hatás miként jelenik meg a teljes napi hőmérséklet-lefutásban, milyen kapcsolatban áll a komforttal, és a szerkezet mely felületein várható a legnagyobb gyakorlati jelentősége.

A dolgozat három, egymással szorosan összefüggő kérdés köré szerveződik.

Az első kérdés arra irányult, hogy a PCM-vakolat milyen mértékben és milyen formában módosítja a könnyűszerkezetes modellház beltéri hőmérsékleti válaszát valós, természetesen változó külső körülmények között. Ennek keretében célom volt annak vizsgálata, hogy a PCM-et tartalmazó vakolat csökkenti-e a napi beltéri hőmérséklet-amplitúdót, mérsékli-e a napi maximumokat és minimumokat, valamint mennyire tekinthető ez a hatás következetesnek a teljes mérési periódus során. E kérdéshez kapcsolódott annak értelmezése is, hogy a modellházakban a napsugárzás hatására kialakuló hőcsapda-jelenség milyen mértékben jelenik meg, és ezt a PCM-vakolat hogyan befolyásolja.

A második kérdés a dinamikus válasz időbeli szerkezetére összpontosított. Ennek középpontjában a csúcsidei késés, vagyis az állt, hogy a PCM nemcsak a beltéri hőmérsékletcsúcs nagyságát módosítja, hanem annak időpontját is későbbre tolja. Célom volt a csúcsidei késés mértékének számszerűsítése, valamint annak vizsgálata, hogy ez az időbeli eltolódás milyen kapcsolatban áll a termikus komforttal. A dolgozat ezért arra is választ keresett, hogy a napi maximum későbbi megjelenése miként befolyásolja a komforttartományon belül töltött idő arányát és a túlmelegedési kitettséget.

A harmadik kérdés a gyakorlati alkalmazhatóság felől közelítette meg a problémát. Ha a PCM kedvező hatása igazolható, a következő lépés annak meghatározása, hogy a szerkezet mely tájolásai és épületelemei esetében várható a legnagyobb előny. A dolgozat célja ezért nem egy általános, átlagos PCM-hatás megadása volt, hanem annak meghatározása mérési adatok alapján, hogy mely felületek tekinthetők a legkedvezőbb alkalmazási helyeknek. Ennek mérnöki jelentősége különösen ott nagy, ahol a PCM mennyisége, helye vagy a kezelhető felület korlátozott, és ezért a felületek rangsorolása gyakorlati döntési kérdéssé válik.

A fenti kérdések megválaszolásához olyan értékelési eljárások alkalmazását tűztem ki célul, amelyek a hosszú idősorokat és a nagy számú mérési adatot dinamikus és statisztikai szempontból is értelmezhetővé teszik. A cél ezért nem pusztán a két ház egyszerű összehasonlítása volt, hanem olyan módszertani keret kialakítása is, amely a teljes mérési periódus természetes meteorológiai változékonyságát figyelembe véve teszi lehetővé a PCM-vakolat hatásának értékelését.

Alkalmazott módszerek

A mérési adatok feldolgozása és kiértékelése reprodukálható, Python-alapú munkafolyamatban történt. A nyers idősorok időszinkronizálása, ellenőrzése, tisztítása és a további számított jellemzők előállítása programozott környezetben zajlott.

A kiértékelés egyik alapját napi összegző mutatók képezték. Az egyes napokra beltéri és külső napi maximum- és minimumhőmérsékletek, valamint az ezekből számított napi amplitúdók kerültek meghatározásra. A napi beltéri hőmérséklet-ingadozás jellemzésére ezek a mutatók szolgáltak elsődleges alapul.

A hosszú idősorok dinamikus összehasonlítására Poincaré-ábrázolást alkalmaztam. A módszer lehetővé tette, hogy a teljes mérési időszak hőmérsékleti viselkedése ne csak időfüggő görbék, hanem egységes, összehasonlítható geometriai reprezentáció formájában is értelmezhető legyen.

A csúcsidei késés meghatározásához a napi hőmérsékletcsúcsok időpontját határoztam meg. Mivel a nyers görbék a csúcstartományban rövid idejű ingadozásokat és több közeli lokális maximumot is tartalmazhattak, a csúcshelyzetek azonosítása simított idősorokon történt. A késés mértékét a megfelelő külső és belső csúcspontok időpontkülönbségeként számítottam. A csúcsidei késés értékelése nem egyetlen jellemző napra, hanem a teljes mérési periódus napi értékeire épült. A napi késések statisztikai jellemzésével vált lehetővé annak bemutatása, hogy a jelenség nem alkalmi, hanem a teljes időszakban értelmezhető dinamikus sajátosság.

A komfortértékeléshez az EN 16798-1:2019 szabvány adaptív komfortszemléletét alkalmaztam. A beltéri hőmérsékleti idősorokat a külső körülményekhez igazodó komforthőmérséklethez és komforttartományhoz viszonyítottam, majd ezek alapján értékeltem a komforttartományon belül töltött idő arányát és a túlmelegedési kitettséget.

A tájolás szerinti vizsgálatban a külső és belső felületi hőmérsékletek napi szélsőértékei kerültek összehasonlításra. Az tájolási irány szerinti viselkedés jellemzésére trendalapú és más statisztikai mutatókat alkalmaztam. A tájolásfüggő termikus különbségek értelmezéséhez jellemző hőmérséklet-különbség és jellemző hőáramsűrűség mutatókat használtam, amelyek lehetővé tették az egyes felületek mérési adatokon alapuló, összehasonlítható értékelését.

Új tudományos eredmények (Tézisek)

A tézisek egy 2021-ben végzett, 105 napos, szabadon futó mérési kampány adatain alapulnak. A vizsgálat két azonos geometriájú és szerkezeti kialakítású könnyűszerkezetes modellház összehasonlítására épült. Az egyik modellház belső oldali függőleges falfelületein mikrokapszulázott PCM-et tartalmazó vakolat-bélésréteg volt, míg a referenciaház PCM-es vakolat nélküli kialakítású volt.

A következtetések közvetlen érvényessége erre a mérési időszakra, az adott meteorológiai körülményekre, az alkalmazott PCM-mennyiségre, a szabadon futó üzemmódra és a vizsgált határoló szerkezeti kialakításra vonatkozik. A tézisek általánosítható tudományos hozzájárulása abban áll, hogy nagyfelbontású mérési idősorok alapján számszerűsítik a PCM-vakolat dinamikus hőmérsékletcsillapító, csúcsidei eltolódást okozó, termikus komfortra gyakorolt és tájolásfüggő hatását. A konkrét számszerű eredmények e peremfeltételek között értelmezhetők, ugyanakkor az alkalmazott adatfeldolgozási és értékelési módszertan más, hasonló mérési elrendezésű PCM-es épületfizikai vizsgálatokban is alkalmazható.

1. A teljes mérési időszak dinamikus hőmérsékleti viselkedésének áttekinthető összehasonlítására Poincaré-ábrázolást alkalmaztam a hosszú, 5 perces felbontású beltéri hőmérsékleti idősorokon. A módszerrel a modellházak termikus viselkedése vizuálisan és matematikailag is összehasonlítható a szórások és a pontthalmaz kiterjedésének értékelésével. Az ábrázolás alapján a PCM-ház beltéri hőmérsékleti válasza kisebb amplitúdójú és kiegyenlítettebb volt, mint a referenciaházé. **[S1-S3]**.
2. A PCM-vakolat napi hőmérsékletcsillapító hatását a teljes, 105 napos mérési időszak alapján számszerűsítettem. Az átlagos napi beltéri hőmérséklet-amplitúdó a referenciaházban 6,3 °C, míg a PCM-házban 3,6 °C volt. Ez igazolta, hogy az adott

könnyűszerkezetes modellházas rendszerben a PCM látens hőtároló hatása következetesen mérsékelte a napi beltéri hőmérséklet-ingadozást.[S1].

3. A referenciaház hőcsapda-jellegű viselkedését a teljes mérési időszak napi belső és külső maximumhőmérsékleteinek, valamint a napsugárzásnak az együttes elemzésével mutattam ki. A külső hőmérséklet és a napsugárzás függvényében képzett 3D válaszfelületek segítségével igazoltam, hogy a referenciaházban a napi beltéri maximumhőmérsékletek nagyobb mértékben haladták meg a külső léghőmérsékletet, mint a PCM-házban. A két válaszfelület különbsége alapján az alkalmazott PCM-vakolat az adott kísérleti rendszerben mérsékelte a külső környezethez viszonyított beltéri túlmelegedést.[S1].
4. A PCM-vakolat csúcsidei eltoló hatását reprodukálható görbesimítást alkalmazó csúcskeresési eljárással, hosszú mérési idősoron számszerűsítettem. A PCM-házban a hőmérsékleti csúcsok átlagos késése megközelítőleg kétszerese volt a referenciaházban mért értéknek. Ez azt mutatta, hogy a PCM hatása nemcsak a csúcs hőmérsékletek mérséklésében, hanem a napi hőválasz időbeli átrendezésében is megjelent.[S2].
5. Kimutattam, hogy a PCM-vakolat által okozott csúcsidei eltolódás a termikus komfort szempontjából is kedvező hatású. Az adaptív komforttartományhoz viszonyított értékelés alapján a PCM-házban nőtt a komfort-tartományon belül töltött idő aránya. Ez igazolta, hogy a PCM hatása nemcsak a napi szélsőértékek módosításában, hanem a hőmérsékleti csúcsok kedvezőbb időbeli elhelyezkedésében is megjelenik, és közvetlenül hozzájárul az épület jobb termikus komfortjához.[S2].
6. Mért felületi hőmérsékleti adatokból, nem szimulációs modellezéssel határoztam meg a PCM célzott elhelyezése szempontjából optimális tájolási sorrendet. A napi szélsőértékekből karakterisztikus hőmérséklet-különbséget számítottam, majd ebből a Fourier-féle hővezetési összefüggés alapján hőáramsűrűséget becsültem. Az így kapott rangsor szerint az adott kísérleti rendszerben a tető és a nyugati tájolás bizonyult a legkedvezőbb célfelületnek, míg az északi tájolás szerepe lényegesen kisebb volt.[S3].

A tézisek alapjául szolgáló publikációk

[S1] Ferencz, M., Németh, B., Gyenis, J., Feczkó, T.: Statistical evaluation of PCM plaster lining impact on indoor temperature fluctuation due to variability of outdoor temperature and solar radiation along a whole spring season. Journal of Building Engineering, 99, 111626, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.111626>

[S2] Ferencz, M., Nagy, B., Németh, B., Gyenis, J., Feczkó, T.: Quantifying thermal time lag due to PCM plaster in model houses. Buildings, 15(22), 4120, 2025. <https://doi.org/10.3390/buildings15224120>

[S3] Ferencz, M., Nagy, B., Gyenis, J., Feczkó, T.: An Experimental Study on the Thermal Behavior of PCM Plaster-Lined Model House Walls During a Whole Spring Season Influenced by Their Orientation. Thermo, 6(2), 23, 2026. <https://doi.org/10.3390/thermo6020023>

Egyéb, a dolgozat témájához kapcsolódó saját publikációk

[S4] Németh, B., Ujhidy, A., Tóth, J., Ferencz, M., Kurdi, R., Gyenis, J., Feczkó, T.: Power consumption of model houses with and without PCM plaster lining using different heating methods. Energy and Buildings, 284, 112845, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112845>

[S5] Németh, B., Ferencz, M., Kovács, S., Trif, L., Lendvai, J., Kolay Kovács, Á., Király, K., Feczkó, T.: Fázisváltó hőtároló anyagok előállítása hulladék zsírból és használt növényi olajból. Energiagazdálkodás, 65. évf., különszám, 26–33, 2024.