

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.jobe.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.



Pannon Egyetem

Vegyészmérnöki- 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.

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 csúcshőmérsékletek 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 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 hőmérsékletszabályozó, 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 hőmérsékletszabályozó 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

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 szenzoradatból 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 szenzoradatbázis 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 céлом 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. Céлом 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 kitétséget.

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 előállítását 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 kitétséget.