



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2

BUDAPESTI MŰSZAKI ÉS GAZDASÁGTUDOMÁNYI EGYETEM

GÉPÉSZMÉRNÖKI KAR

ÉPÜLETGÉPÉSZETI ÉS GÉPÉSZETI ELJÁRÁSTECHNIKA TANSZÉK



BARCZI MILÁN

OTDK DOLGOZAT

Egyzónás épülethez tartozó modell prediktív szabályozás felépítése és tesztelése

Témavezető:

Dr. Horváth Miklós

egyetemi docens

Külső konzulens:

Dr. Luspay Tamás

kutató, HUN-REN SZTAKI

Budapest, 2025

Nyilatkozat az önálló munkáról

Alulírott, *Barczy Milán (UYW7EN)*, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem hallgatója, büntetőjogi és fegyelmi felelősségem tudatában kijelentem, hogy ezt a dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, és dolgozatomban csak a megadott forrásokat használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a hatályos előírásoknak megfelelően, a forrás megadásával megjelöltem.

Budapest, 2025.01.14.

Barczy Milán

TARTALOMJEGYZÉK

1. Bevezetés.....	3
2. Irodalomkutatás	6
2.1. Épületgépészeti rendszerek szabályozási megoldásai, jellegzetességei	6
2.2. Modell prediktív kontroll	8
2.3. Egyszerűsített modellezési eljárások	11
3. Modell identifikáció	14
3.1. Épület bemutatása.....	14
3.2. Dinamikus szimuláció	15
3.2.1. Geometria és szerkezet definiálása.....	15
3.2.2. Jelenlét, belső terhelések és gépészet	17
3.3. Állapottér modell létrehozása.....	19
3.4. Gray-box modell identifikáció	26
3.4.1. DesignBuilder szimulációs eredmények	26
3.4.2. Paraméter kalibráció.....	28
3.4.3. Gray-box modell tesztelés	30
4. Modell prediktív kontroller felépítése.....	32
4.1. Predikció felépítése	32
4.2. Optimalizálási probléma.....	34
4.3. Kvadratikus megoldó alkalmazás.....	36
4.4. Predikciós horizont és súlytagok megválasztása	37
4.5. Fmincon függvény korlátai az optimalizáláskor	40
5. Társszimuláció	41
5.1. EnergyPlus & Matlab	41
5.2. Társszimulációs vizsgálat és eredmények	44
6. Összefoglalás.....	50
7. Irodalomjegyzék.....	51

1. BEVEZETÉS

Az elmúlt évek végső energiafogyasztásának 40%-át az épületek teszik ki az Európai Unióban, míg az üvegházhatású gázok tekintetében ez az érték 36%, mely legfőképpen az épületállomány jelentős részének fosszilis tüzelőanyaggal való fűtése miatt jelentkezik [1]. Ennek következtében az épületek energiahatékonyságáról szóló irányelv 2030-tól minden új épületre megszabja a kibocsátásmentesség kritériumát, mégpedig a teljes életciklusra vonatkozó globális felmelegedési potenciál (GWP) alapján. A 2050-re megfogalmazott klímasemleges gazdasági cél már azt tűzi ki, hogy a környezetre egyáltalán ne legyenek kártékony hatással az épületek, vagyis nettó nulla üvegházhatású gázkibocsátással rendelkezzenek. A dekarbonizáció érdekében szükséges a meglévő állomány felújítása, kezdve a legrosszabb energiahatékonyságú épületekkel, valamint a fűtéshez alkalmazott fosszilis tüzelőanyaggal üzemelő kazánok folyamatos leváltásával, például az erre vonatkozó támogatások megszüntetésével. Emellett az egyre inkább terjedő napelemes termelésre és elektrifikált épülettechnikai rendszerekre is jelentős mértékben támaszkodik az uniós célkitűzés. A napelemes rendszerek hálózatba történő integrációja számos kihívást jelent, hiszen a kialakított elektromos hálózat csak bizonyos mértékig képes kezelni az újonnan megjelent termelőket. Törekedni kell tehát a megtermelt energia minél nagyobb mértékű helyben fogyasztására, mely jelenthet egy vagy akár több háztartást is lakóépületek esetében. A megújuló energiatermelés időjárásfüggő tulajdonságának következtében fellép az egyidejűségi probléma, amely során a termelési és felhasználási időszakok eltérnek. A probléma kezelésében jelentős szereppel bírnak az energiatárolási lehetőségek, melyek lehetővé teszik a megtermelt energia későbbi, igény szerinti időpontban történő felhasználását. Az említett rendszerek kialakítása és üzemeltetése csak kellő pontosságú méretezéssel és megfelelő szabályozástechnikai kialakítással képes beváltani a megfogalmazott célkitűzéseket.

Dolgozatomban a szabályozástechnikai lehetőségekkel foglalkozom, azon belül bemutatom a modell prediktív szabályozás (MPC) elméleti alapjait és felépítését, amely az elmúlt két évtizedben egyre nagyobb szerephez jutott az épületgépészeti és irányítástechnikai szakirodalomban. Bár épületüzemeltetésben még jellemzően kísérleti szinten fordul jelenleg elő, a feldolgozóiparban már a hetvenes évek végén, nyolcvanas évek elején megjelent a fejlett irányítási elmélet [2], amelyből mára számos megvalósított példa létezik. Ennek oka, hogy az egyre bonyolultabb rendszerek és szigorodó előírások növelik az igényt az MPC alkalmazására, mely összetett feladatok és rendszerek modellezése alapján képes optimálisan összehangolt működte-

tésre. Emellett a globális piaci verseny a maximális energiahatékonyságot és termelési kapacitást követeli meg, amelyek optimalizálását az MPC jól képes kezelni. Egy gyártóüzemben az olyan komplex problémák, mint a méretezés, ütemezés, csomagolás, leltározás és erőforrás-elosztás összehangolt működést igényelnek a hatékony termeléshez, amelyet fejlett szabályozási technológiával lehet elérni. Hasonlóképpen, a városi közlekedés nagy forgalmú hálózatainak koordinált irányítása is kritikus szerepet játszik, amelyhez az egyes csomópontok optimális összehangolása szükséges, amit szintén MPC alkalmazásával lehet megvalósítani. [3]

Az épületek fűtésére, hűtésére és szellőztetésére (továbbiakban: HVAC) vonatkozó modell-alapú szabályozási módszertan alkalmazása bizonyítottan hatékonyan csökkenti az energiafogyasztást és a szennyezőanyag-kibocsátást, különösen akkor, ha a környezeti feltételekre és a fogyasztási trendekre vonatkozó előrejelzések rendelkezésre állnak és implementálhatók a szabályozási formulába. A jelenlegi elektromos hálózatról a jövő okoshálózataira (smart grid) való átmenet korszakát éljük, ahol a megújuló energiaforrások rendkívül nagymértékű térnyerése komoly kihívásokat állít az elektromos hálózat stabilitásával és működésével szemben. Az ilyen hálózatokat ugyanis nem arra tervezték, hogy azok részeként egyszerűen integrálhatóak legyenek az időjárásfüggő megújuló források. Különösen a szél- és napenergia termelők időszakos és változó természete jelent kihívást, mely legtöbb esetben egyidejűségi problémához vezet, amely során az elektromos energia fogyasztási időszak eltér a termeléstől. E kihívások kezeléséhez a hálózatok energiagazdálkodási fejlesztései során törekedni kell az ilyen rendszerek általános megbízhatóságának és fenttarthatóságának növelésére. Lakossági oldalról pedig pontosítani kell a helyi megtermelt energia minél nagyobb mértékű helyben fogyasztására. A hálózattól való függetlenedés mindkét oldal számára kedvező lehet, a termelő költséghatékonyan és fenntartható módon kezeli a forrását, a hálózat számára pedig kisebb terhelést jelent. Ennek érdekében szükséges a villamosenergia akkumulátorban vagy egyéb termikus módon való tárolása helyi szinten, mely új szabályozási kihívásokat vet fel. A hagyományosan elterjedt, előre definiált szabályokon alapuló vezérlési megoldások helyett előtérbe kerültek a viszszafejtést alkalmazó, optimalizálás alapú irányítási stratégiák, melyek egy egyszerűsített modell és kényszerek alkalmazásával minimalizálják az előírt célfüggvényt.

A téma motivációját számomra a szakirodalom alapján bemutatott lehetőségek és eredmények jelentették, melyek az épületgépészeti és szabályozástechnikai tudományterületek kombinációjából, az MPC alkalmazásával megoldást jelenthetnek az egyre komplexebb energetikai kihívások hatékony kezelésére.

Dolgozatomban egy egyzónás épület modell prediktív szabályozással történő hőmérséklet referenciakövetését mutatom be, fűtési időszakra vonatkozóan. A 2. fejezet célja összefoglalni az épületgépészeti rendszerek szabályozására létező és alkalmazott megoldásokat. Emellett ismertetem az MPC felépítését, tulajdonságait, a tervezés során figyelembe veendő megfontolásokat és tervezésének lépéseit, különös hangsúlyt fektetve a fizikai modell létrehozására, mely az optimalizálás alapját jelenti. Mindezt a vonatkozó szakirodalmi példák bemutatása mellett. A 3. fejezet a valós épület alapján létrehozott részletes dinamikai szimulációs modell felépítését mutatja be DesignBuilder programban. Ez alapján felépítettem egy diszkrét idejű állapottermodellt, melyre elvégeztem a részletes szimuláció alapján egy identifikációt, melynek megfelelő tartományon való működését is leteszteltem. A modellalapú kontrollert tervezése, a kvadratikus megoldóval és paramétereinek vizsgálatával a 4. fejezetben találhatóak. Az 5. fejezetben a Matlab programban létrehozott kontrollert alkalmaztam EnergyPlus környezetbe integrálva. Ismertetem a társszimuláció megvalósításának folyamatát és annak működését. Kiértékelésként a létrehozott MPC stratégiát hasonlítottam össze a DesignBuilder beépített vezérlőjével szemben, komfort és energiahatékonysági szempontok szerint. A 6. fejezet összegzi a következtetéseket és javaslatokat tartalmaz a jövőbeli munkához.

2. IRODALOMKUTATÁS

2.1. Épületgépészeti rendszerek szabályozási megoldásai, jellegzetességei

Az épületek és energetikai rendszerek üzemeltetésében az elmúlt évtized kutatásai során rendkívül elterjedt az aktív szabályozási technológiák kifejlesztéséről szóló szakirodalom. A modellalapú szabályozás lehetővé teszi az HVAC berendezések energiateljesítmény, komfort és fenntarthatóság szempontjából kedvezőbb működését, a jelenleg legelterjedtebben alkalmazott klasszikus megoldásokhoz képest. A következőkben összefoglalom a vezérlési és szabályozási stratégiákat, melyek besorolhatók klasszikus, hard, soft és hibrid kategóriákba, a felépítésüknek és komplexitásuknak alapján [4].

A klasszikus és egyben legelterjedtebb módszerek az ON/OFF és a PID szabályozási elvek. Legegyszerűbb alkalmazásként a szobahőmérséklet alapján, ON/OFF módon üzemelő rendszerek kerülnek szóba, ekkor egy referencia és a mért hőmérsékletérték különbsége szerint kapcsol ki- és be a gépészeti rendszer. Az egyszerűsége és költséghatékonyasága teszi igen népszerű alkalmazássá, mivel csak egy változó visszacsatolása szükséges, azonban az épület dinamikai viselkedését semmilyen formában nem képes figyelembe venni.

Manapság az egyik legnépszerűbb és komplexitásában már fejlettebb megoldást jelent az arányos-integráló-differenciál (PID) szabályozó az irányítástechnikai rendszerekben. Az előzőekhez hasonlóan, szintén egy bemeneti és kimeneti jel kezelésére alkalmas. A referencia és visszacsatolt érték közötti hiba jelenlegi értékére reagál az arányos tag, mely a DesignBuilder beépített szabályozójában is alkalmazásra kerül [5]. A hiba múltbeli változását és jelenlegi irányát figyelembe venni pedig az integráló és differenciál tagokkal lehetséges [6]. A nemlineáris gépészeti rendszerek kezelésére, mint például egy hőszivattyúval ellátott padlófűtéses rendszer, nehezen alkalmas. Emellett gyakori hangolást igényelnek a változó körülményekhez való adaptálás érdekében. Az épületszerkezetek lassú dinamikai viselkedésének köszönhetően alkalmazható hőmérséklet szabályozásra sima P vagy PI kontrollerek is, melyek képesek stabilan komfort határokon belül tartani a hőmérsékletet [7]. A tradicionális módszerek összességében nagyobb költséggel és hatékonyság szintjén jelentős limitációkkal alkalmazhatóak egy komplex probléma esetében.

Az úgynevezett hard kontroll technikák közé tartoznak a strukturált matematikai modelleken alapuló fejlett szabályozók, köztük az MPC is.

Az optimális, másnéven felügyeleti szabályozás célja a lehető legalacsonyabb bemeneti energiafelhasználás és üzemeltetési költség elérése a megfelelő komfort paraméterek biztosítása mellett. Mindez a teljes külső és belső változó körülmények, valamint a gépészeti rendszer folyamatos monitorozásával és nagyon pontos matematikai modell felépítésével valósítható meg. Alkalmazása leginkább statikus környezetben javasolt, ugyanis valós idejű, folyamatosan változó környezet adaptációjára nem alkalmas, így egy számos időjárás- és alkalmazásfüggő zavarásnak kitett épület üzemeltetésére sem a legmegfelelőbb.

A zavarok és bizonytalanságok kezelésére tervezett robusztus irányítástechnikai megoldások a külső változásokhoz képesek alkalmazkodni anélkül, hogy teljes rendszermodell pontosságot igényelnének. Alkalmazása előnyös a kiszámíthatatlan ingadozásokkal járó környezetekben, azonban drasztikus időjárás-változások esetén még nehézségekbe ütközhet.

Az adaptív szabályozók prediktív kontroll mellett, dinamikusan állítják be a rendszer paramétereit, hogy reagáljanak a nemlinearitásra és az időben változó körülményekre. A valós idejű adatokból tanulva az adaptív szabályozások sokoldalúbbak, de részletes rendszermodelleket és összetett terveket igényelnek, ami sok épületben korlátozhatja gyakorlati alkalmazhatóságukat. Az okosrendszerekkel való kompatibilitásuk kiemelkedően kedvező a klasszikus stratégiákkal szemben [8].

Az idővariáns és nemlineáris viselkedésű rendszereket a lineáris megoldások nem képesek hatékonyan kezelni, különösen egy széles tartományon működő berendezés esetében, mint például egy légtechnikai rendszer. Általános szabályozási elmélet a nemlineáris rendszerekre nem létezik, hanem különböző elven alapuló lehetőségek találhatók a szakirodalomban. Az állapot visszacsatolású kontroller egy adott munkapont körül végez linearizálást, melyre már alkalmazhatók a lineáris megoldások. Összeségében javítják a szabályozást az üzemi feltételek szélesebb tartományában, alkalmazásukat korlátozza összetettségük és a nagyon specifikus modellek szükségessége, ami kihívást jelent az integrációban.

A különösen összetett, nemlineáris, valamint irányítástechnika szempontjából több be- és kimeneti taggal rendelkező épületgépészeti rendszerek esetében egy, a rendszert kellő pontossággal leírni képes matematikai modell identifikálása igencsak nagy kihívás. Az intelligens (soft) szabályozási stratégiák nem alkalmaznak egyszerűsített modellt, cserébe nagy mennyiségű mérési adatra van szükség a rendszer viselkedésének fekete doboz alapú közelítésére. A mesterséges neurális hálók (ANN) egy összekapcsolt, emberi idegrendszerhez hasonló neuronhálózatot alkalmaznak, mely be- és kimeneti, valamint rejtett rétegek alapján van felosztva. A

folyamatos tanítás eredményeképp rendkívül jó szabályozási alkalmazhatósága van az épületgépészeti rendszerekben.

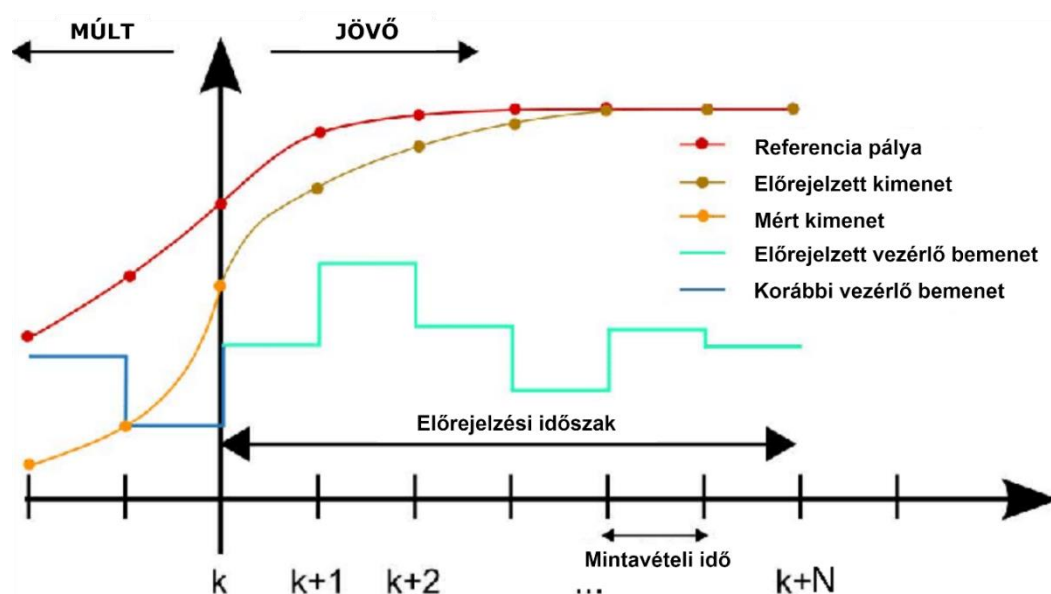
2.2. Modell prediktív kontroll

A modell prediktív kontroll (MPC) alkalmazható épületek HVAC berendezéseinek fejlett szabályozására, mely egy matematikai modell alapján képes előre jelezni az épület jövőbeli dinamikai viselkedését adott időintervallumra. Ennek köszönhetően képes optimális beavatkozásokat végrehajtani egy megfogalmazott célfüggvény minimalizálása mentén, szem előtt tartva a komfort és technológia energiahatékonysága alapján megfogalmazott kényszereket. A következőkben bemutatom az MPC működését részletesen kitérve annak előnyeire és nehézségeire. Megvizsgálom a lényeges hangolási paramétereit, melyek alapos tervezést és tesztelést igényelnek. Ezt követően kitekintek a mai épületekben való integrálási lehetőségekre, valamint az épületüzemeltetési rendszerek (BMS) és okoshálózatokkal való kapcsolatteremtési lehetőségekre.

Az épületszerkezet és benne található berendezések együttesen egy dinamikai rendszert alkotnak, melynek viselkedését, vagyis a dinamikus válaszát az azt ért külső és belső hatások alakítják. Ezek a hatások a rendszer bemeneti jelei, megkülönböztethetőek kontrollált és nem kontrollált csoportokra. Utóbbi tekinthető zavarásként, ilyenek a külső hőmérséklet, a szoláris hőterhelések, az épületgépészeti rendszer részét nem képező berendezések az épületben, stb. Egy megfelelő dinamikai modell képes ezen hatások leírására és az épület viselkedésének meghatározására. Ezt felhasználva a controller képes előrejelzéseket készíteni a rendszer lehetséges jövőbeli válaszára vonatkozóan a jövőbeni manipulált és zavarási bemeneti értékek függvényében [9]. A predikció alapján kiválasztható az az optimális kontrollált bemeneti jel szekvencia, amely legkedvezőbb módon elégíti ki az előre megfogalmazott követelményeket. A beavatkozási folyamat adott időpillanatban történik egy véges horizontú, nyílt hurkú szabályozási probléma megoldásaként. Az optimális bemeneti trajektória meghatározása ekkor egy numerikus optimalizálási probléma megoldásaként adódik, mely amellet, hogy egy megfogalmazott célfüggvényt minimalizál, betartja a bemeneti és kimeneti tagokra vonatkozó előírt kényszereket. A célfüggvényt tartalmazó elemeket a probléma célkitűzéseinek megfelelően kell felépíteni, vagyis, hogy milyen szempontok szerint kívánjuk a beavatkozást optimálissá tenni. A kényszerek is széles spektrumon előírhatók, ezen lehetőségeket a későbbiekben fejtem ki részletesen. Az MPC a véges idejű, úgynevezett predikciós horizontra előállított bemeneti adatsornak mindig az első elemét alkalmazza a rendszeren. A következő időlépésben a leolvasott értékek alapján újra elvégzi az optimalizálást az előzőekben leírtaknak megfelelően és betáplálja az első

értéket. Ennek következtében tekinthető az MPC egy mozgó horizontú (moving horizon) megoldásként, mely megkülönbözteti a többi, szabályozási folyamat elején egy nyílthurkú problémát megoldó stratégiákhoz képest.

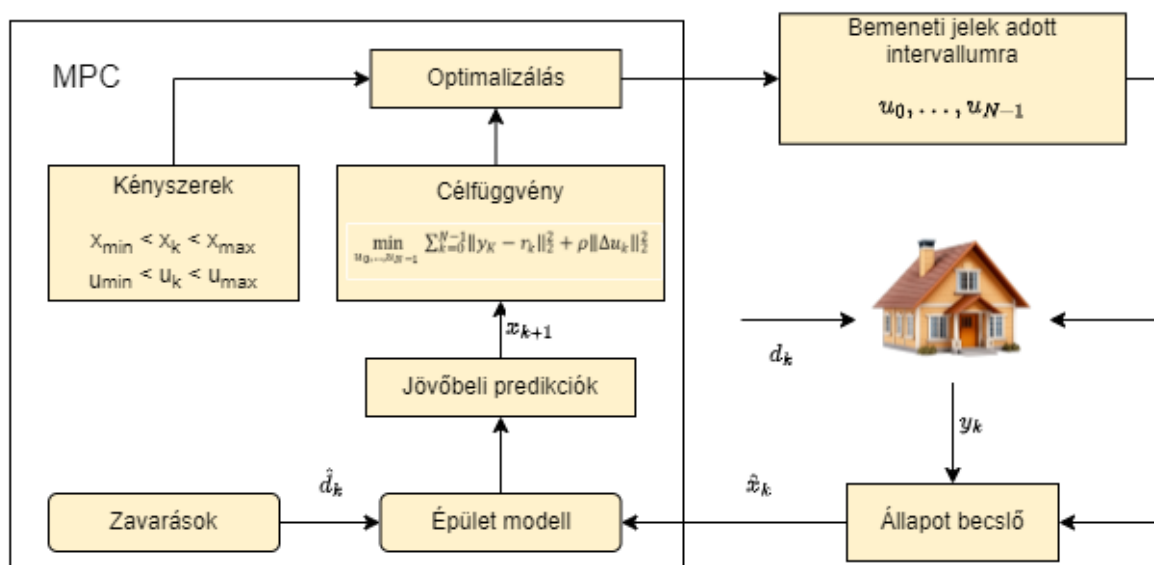
Az 1. ábra bemutatja a mozgó horizontú MPC optimalizálási folyamatát. A k időpillanat jelzi a folyamat aktuális mintavételi lépését, melyre a szabályozás végrehajtja az optimalizálást. A T_s mintavételi idő meghatározza a két időlépés között eltelt időszakot. Ennek megválasztása kritikus lehet a számítási igény és a modell pontossága szempontjából. Az N_p előrejelzési, vagy predikciós időszak azon T_s időlépések számát adja meg, melyre a predikciót, ezzel az optimalizálást végrehajtja a kontroller. Túlságosan kis hosszúságú horizont esetén kevés idő alatt szükséges a referencia érték elérése, mely kevésbé hatékony. A kellőnél nagyobb időszakra vonatkozó számítás pedig ugyancsak pontatlansághoz és nagy számítási kapacitásigényhez vezethet. Lehetséges egy N_c kontroll horizont megadása is, ez kevesebb időlépés alatt, kevesebb manipulált változóra való optimalizálással oldja meg a problémát, emellett a predikciós időszak nem változik. Ez szintén gyorsíthatja a számítási folyamatot.



1. ábra: MPC mozgó időhorizont

Egy valós házra történő MPC alkalmazás folyamatábrája látható a 2. ábrán. Az MPC algoritmus az épület matematikai modelljében figyelembe veszi a releváns zavarásokat és a változókat, melyek leírják az épület aktuális állapotát, ezek alapján pedig a predikciós időintervallumra megadja az épület viselkedését. Ezt követően a célfüggvény mentén, valamint a módosítani kívánt jellemzők kényszereit figyelembe véve kiszámítja az optimális bemeneti jelsort,

melyből a valós épület szabályozása történik. Az épületben felszerelt szenzorok alapján a kontroller megkapja az aktuális valós állapotok értékeit, melyből az épületmodell segítségével újra elvégezhető a predikció és az optimalizálás művelete.



2. ábra: MPC folyamatábra

A célfüggvény az épületirányítási feladat során meghatározott törekvések közötti egyensúlyt fejezi ki, az egyes tagok manuálisan történő súlyozásával. Ilyen probléma lehet többek között a komfort mérőszámok kielégítése és az energiahatékonyságra való törekvések közötti megfelelő arány meghatározása. A függvény minimalizálásakor egy nagyobb súlyfaktossal rendelkező tag jobban korlátozásra kerül, mint a többi. Ha a Fanger-féle PMV jellemző [10] adott értéken tartása sokkal fontosabb a fűtési kompresszor teljesítményfelvételénél, akkor egy komfort szempontból kielégítő, azonban energiateljesítményben megnövekedett végeredmény fog kialakulni. Az elektromos áram időszakos áraihoz igazítva olyan stratégia alakítható ki, amely az időjárási előrejelzéseket is figyelembevéve határozza meg a legmegfelelőbb működést [11]. A célfüggvényben szerepet kaphat a költség tag helyett vagy mellett egy kibocsátási faktor is [12], mely a folyamat során felhasznált károsanyag mértékét hivatott minimalizálni, amennyiben a felhasználó erre törekedne. Ezzel csökkenthető azon berendezések használata melyek kizárólag fosszilis energiahordozók által szolgáltatnak energiát az épület számára. E problémát megfordítva, a célfüggvényben szerepet kaphat a megújuló energiaforrás maximalizálásra való törekvés is. Ennek a negatív értékét alkalmazva, a kontroller ezt fogja előnyben részesíteni az optimalizálás során [13]. Hasonló megfontolások mentén optimalizálható egy napelemes, tárolóval rendelkező rendszer működtetése. A célfüggvényben megadható például az épület flexibilisen működő energiateljesítménye, több tároló esetén az összehangolt kapacitás beosztása

[14]. Megvalósítható akár több épületegység között összehangolt termelési és tárolási üzemeltetés, melyek helyi energiaközösségként működve képesek függetlenedni a hálózattól és nagy hatékonysággal üzemelni.

Belátható, hogy a bemutatott egyéb kontroll stratégiákhoz képest számos előnyt kínál az MPC alkalmazása az épületekben található rendszerek szabályozásában. A legkedvezőbb tulajdonságát a rendelkezésre álló jövőbeli zavarások figyelembevétele jelenti az optimalizálás során. A klasszikus megoldások csak a múltbeli és az aktuális tényezők ismeretében képesek beavatkozni. Például egy nagymértékű szoláris nyereség, vagy a zónában tartózkodók számának hirtelen változása jelentősen befolyásolja a rendszer viselkedését. Az ilyen típusú hatásokat lehetséges előre jelezni, ezáltal az MPC képes figyelembe venni őket, míg egy PID szabályozó erre nem alkalmas [15]. Továbbá az egyes rendszer jellemzőkre előírt kényszerek betartása, mint például egy alsó és felső határon belüli tartása is lehetséges a modellalapú szabályozással. Az egyre szélesebb körben alkalmazandó intelligens épületeknek egy fontos és praktikus integrálható elemét adhatja az MPC. Hierarchikus struktúrában kialakítva egy felsőbb szintről hatékonyan képes befolyásolni az alsóbb szintek működését, ahol külön kezeli a tartózkodási zónákat a gépháztól és egyéb energiatároló egységektől. Az MPC okoshálózatokban való integrálása minden szempontból lehetséges, ugyanis képes a dinamikus változó energiaárak kezelésére, képes a csúcsgyógyasztási időszakok eltolására, alkalmazásával lehetséges energia-termelési és -fogyasztási mennyiségek külső tényezőkhöz való igazítása [16, 17].

2.3. Egyszerűsített modellezési eljárások

Az MPC szabályozás megvalósítása során a legnagyobb kihívást jelentő rész összeállítani egy olyan matematikai modellt, amely egyszerűsítések és elhanyagolások mellett, egy jelentős mértékben redukált felépítéssel képes a vizsgálat tekintetéből fontos jellemzőit megfelelő pontossággal meghatározni az épületnek. A zóna hőmérsékletszabályozásakor a legfontosabb jellemző, vagyis a kontrollálni kívánt állapot maga a helyiségben található, hőtároló kapacitással rendelkező hőmérsékleti érték, emellett az erre legnagyobb hatással lévő más termikus elemek hőmérsékletei. Tökéletes létrehozása egy ilyen modellnek nem létezik, ezért csak törekedni lehet arra, hogy a legmegfelelőbb épületszerkezeti és -gépészeti egyégek, a lehető legjobb közelítéssel kerüljenek bele, ekkor identifikálható egy szabályozásra kompatibilis modell [18].

Alapvetően három modellezési paradigma létezik, melyek mentén különböző technikák és megfontolások alapján hozható létre a virtuális mása a valós épülettechnikai rendszernek.

Az úgynevezett white-box modellezés alapos fizikai ismeretét követeli meg az épületnek, hiszen ez egy nagy részletességű, fizikai törvények alapján létrehozott modell a dinamikai és energetikai viselkedés leírására. Szükséges a geometria, a szerkezeti anyagok és berendezések teljeskörű ismerete tervrajzok, katalógusok és helyszíni felmérések alapján, ennek következtében egy igencsak időigényes feladat, ráadásul manuális munkát igényel minden egyes új épületre. A hatalmas paramétersereg okán könnyen előfordulhat modellezési hiba, azonban egy valós mérési adatok alapján megfelelően kalibrált modell képes az értékek megbízható számítására. Számos szimulációs program elérhető, melyek mögött nagy mennyiségű matematikai egyenlet végzi a részletes számításokat, ilyenek az EnergyPlus és a TRNSYS szoftverek. Szabályozási feladatok tervezésére során kevésbé alkalmazható, mivel az identifikációs művelet nem triviális, azonban kontroll stratégiák ellenőrzésére, hibadetektálásra és fogyasztási előrejelzésre kiválóan alkalmas. Borja-Conde és munkatársai egy módszertan bemutatásán keresztül ismertetik miként lehetséges meglévő épületek hőtechnikai modelljének létrehozása TRNSYS programban anélkül, hogy ismert lenne minden építészeti adata az épületnek [19]. Ezt a hasonló szerkezetű épületszerkezeti elemek és zónák összevonásával érik el.

A gray-box modellezés lényegesen egyszerűsített fizikai feltételezéseken alapszik, lineáris matematikai képletek alkalmazásával. Emellett valós vagy részletes dinamikai modellből származó mérési adatok felhasználásával becsülhető a redukált mennyiségű paramétereinek pontos értéke. Az egyszerűsítések következtében nagy kihívást jelent a valós épület dinamikáját leírni képes modellt megfelelően hangolni, rendkívüli módon figyelni kell az identifikáció során, hogy az reprezentáns adatsorra épüljön, amely széles tartományt lefed a bemeneti jelek esetében. Ennek hiányában előfordulhat, hogy a modell számára ismeretlen külső zavarási értékekre nem ad helyes megoldást. Épületeknél a leggyakrabban alkalmazott technika az ellenállás-kapacitás (RC) elektromos kör analógiára létrehozott modellezés, ezt mutatom be a dolgozatban is. Ezen modellek a prediktív szabályozásban való alkalmazás mellett alkalmasak energiafogyasztási becslések készítésére, valamint az épület pontos energiafelhasználásnak meghatározására is. Bacher és Madsen tanulmányában a legmegfelelőbb RC modell felépítését vizsgálták és értékelték statisztikai, valamint fizikai szempontok szerint egy adott épületre [20]. A legegyszerűbb modellből kiindulva, fokozatosan növelve a komplexitást, egy olyan modellt hoztak létre, mely figyelembe veszi a napsugárzás és belső hőforrás tényezőket is, ezzel hatékonyan tükrözve az épület hődinamikai viselkedését.

A harmadik stratégia semmilyen fizikai előismeretét nem alkalmazza az épületnek, mindössze mérési adatok alapján, input-output értékekből generálja a black-box megközelítésű modellt. Előnyként említhető, hogy kevesebb munkát igényel az összeállítása, valamint új épületre

való kialakítása során már könnyebben és gyorsabban implementálható. Nehézséget jelent a megfelelő mennyiségű és minőségű mérési eredmény összegyűjtése a betanításhoz, valamint, hogy a paramétereknek nincs fizikai jelentésük, ennek következtében az épületüzemeltetők számára nem értelmezhetők.

A szakirodalomban számos vizsgálat elérhető mind az egyszerűsített modell, mind az MPC optimalizálási folyamatok elemzésére. Céлом a következőkben bemutatni, hogy mely lépések mentén lehetséges egy valós ház helyszíni felméréséből kiindulva eljutni a teljes épület fejlett szabályozástechnikai vizsgálatáig, társszimulációs környezetben. A módszertan segítségével tetszőleges épületre elvégezhető a vizsgálat, a megfelelő fizikai modellek és gépészeti tulajdonságok implementációjával, a feladat során létrehozott Matlab kódok és tapasztalatok alapján.

3. MODELL IDENTIFIKÁCIÓ

3.1. Épület bemutatása

A vizsgálat során bemutatott épület (3. ábra) Fóton található, az Élhető Jövő Park területén. A park számos megújuló energiatermelési lehetőséggel rendelkezik, többek között napelemes erőművek, szél erőművek és a vízerőmű is rendelkezésre áll a fenntarthatóbb technológiai megoldások vizsgálatára és fejlesztésére. Kiterjedt mérőrendszer segítségével rendkívül nagy adatmennyiség rögzítése lehetséges a park egyes rendszereinek üzemeltetése során.



3. ábra: A vizsgált épület Fóton

Az épület egy kétszintes bemutatóterem, melyben található egy kiállítótér, egy előadó, egy szerver szoba, illemhelyiségek és emeleti dolgozó helyiségek. Az emelet alapterülete körülbelül fele a földszintének, ugyanis a kiállítótér által egybe lett nyitva a két szint. Ebből kifolyólag a ház vizsgált blokkja a szimulációs modell szempontjából 1 termikus zónaként kezelhető, melynek alapterülete 155 m². Az épület további részeiben a kazánház, az akkumulátor telep és lovaknak kialakított boxok találhatók. Gépészetet tekintve levegő-víz hőszivattyús padlófűtéses rendszert alakítottak ki, melyet a park megújuló energiaforrásai látnak el, a hőszivattyú fűtési teljesítménye pedig 15 kW. A megfelelő működést egy 200 literes hidraulikai leválasztó biztosítja, emellett a termelt és el nem fogyasztott energia tárolására 2000 literes tároló áll rendelkezésre. A HMV ellátáshoz egy 200 literes Daikin melegvítartó tartozik, melynek hőszükségletét szintén a hőszivattyú látja el. A ház dél-keleti tájolású tetejére napelemeket helyeztek el.

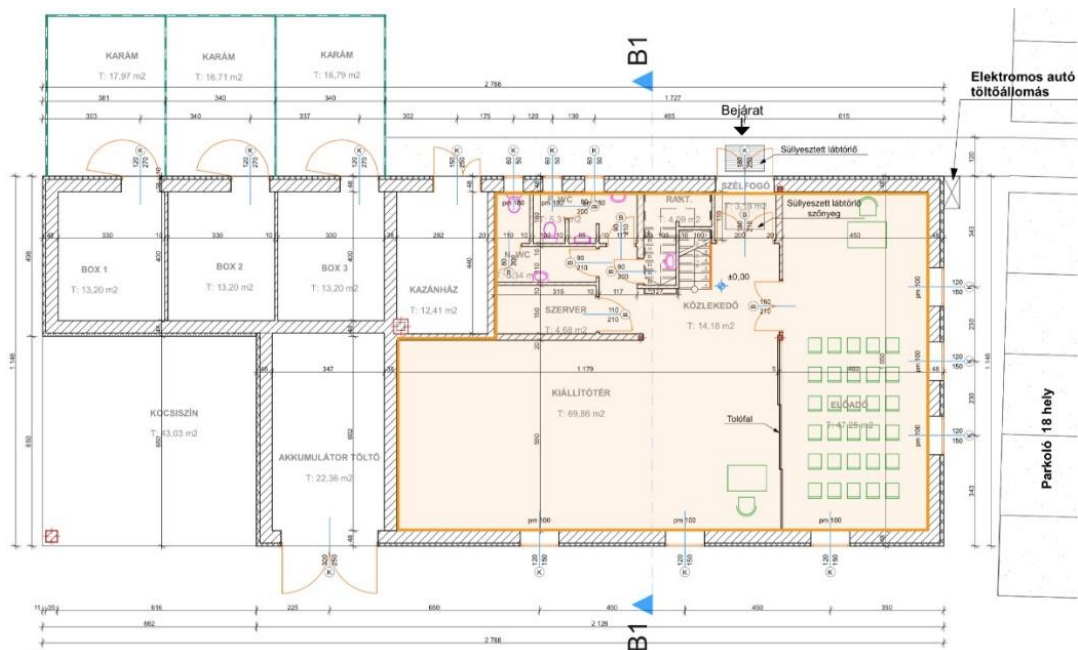
Rendelkezik emellett elektromos autótöltő állomással is, mely töltés mellett a rendszer tárolójaként is alkalmazható, ugyanis visszatáplálásra is van lehetőség.

3.2. Dinamikus szimuláció

Az épület részletes modellezésére a DesignBuilder programot használtam, melynek keretein belül lehetőség van egy olyan modell felépítésére és vizsgálatára, amellyel meghatározható annak viselkedése a külső környezeti tényezők hatására, figyelembe véve a belső felhasználási és üzemeltetési paramétereket. A szimulációs modell tartalmazza az épület geometriáját, definiáltam a szerkezeti elemeket, a megfelelő rétegrendek felvételével, a termikus belső zónával, a részletes gépészeti rendszerrel, valamint az épület használatának egy előre meghatározott menetrendjével. A grafikus környezet mögött az EnergyPlus számító szoftver végzi a szimulációk futtatását. Jelen modell létrehozása során elsősorban nem a valós paraméterek teljességét kielégítő részletesség volt a cél, hanem egy olyan szimuláció megvalósítása, amelyhez később identifikálható egy egyszerűsített termikus modell, ami magas szintű kontroll tervezését segíti elő.

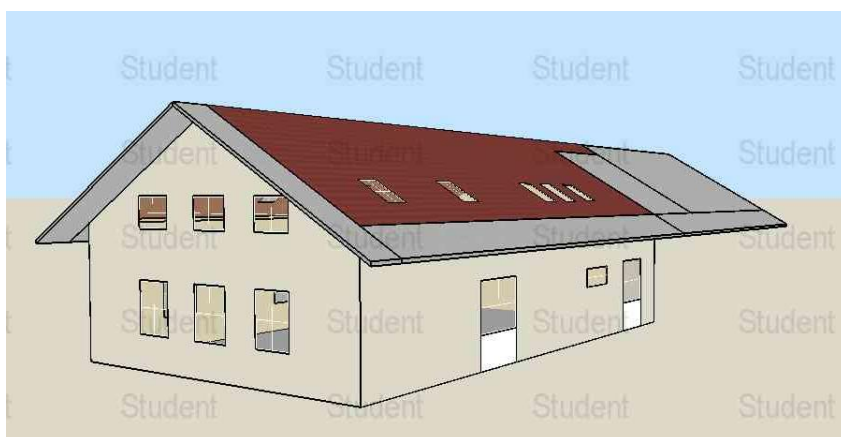
3.2.1. GEOMETRIA ÉS SZERKEZET DEFINIÁLÁSA

Az épület külső geometriájának modellezése során a 4. ábrán látható földszinti tervrajz naranccsárgával jelölt területét szerkesztettem meg, míg a további vertikális méreteket helyszíni felméréssel rögzítettem. A tartózkodási zóna legnagyobb belmagassága eléri a 7 métert. A programban a belső méreteket állítottam be, így a határoló szerkezet vastagsága minden új réteggel belülről kifelé növekszik. A tetőszerkezetet 30°-os dőlésszögű kivágással alakítottam ki. A belső határolófalak részt vesznek az épület hőtárolóképességének növelésében, ezért modellezésük indokolt. Mivel zónákra való felbontásra nincs szükség a belső térben, ezért olyan elválasztó falként hoztam létre, melyek nincsenek lezárva, így ezek szerkezetének megfelelő méretű definiálásával, valamint külön belső hőtároló tömegként való felvételével illesztettem a modellbe.



4. ábra: Az épület földszinti tervrajza

Következő lépést a tető meghosszabbításaként kialakított külső árnyékolók létrehozása jelentette, melyek a szimulációban a termikus zóna szempontjából transzmissziós és egyéb hőátadási folyamatokban nem vesznek részt, mindössze árnyékolási funkciót töltenek be. Ennek megfelelően szerkezetük meghatározása nem szükséges, emiatt egyszerű komponens blokként alakítottam ki. További külső árnyékolást jelentő objektum az épület környezetében nem található, valamint a rendelkezésre álló belső árnyékolók az ablakoknál nincsenek használatban. A fűtetlen terű kazánház és akkumulátor tároló szomszédosok a vizsgált zónával, így ezek a terek nem vesznek részt önállóan a szimulációban. Az 5. ábrán látható az elkészített geometria a programban.



5. ábra: Épület modell Design Builder programban

A továbbiakban bemutatom az épület különböző funkciójú szerkezeteihez felvett rétegrendek, melyek pontos meghatározására, a megfelelő dokumentumok hiányában nem állt mód.

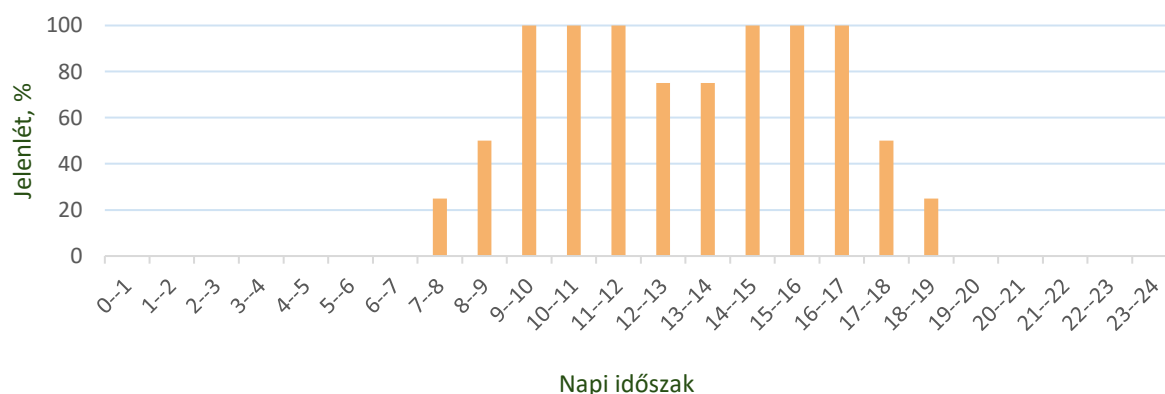
Ennek következtében helyszíni mérések és számolók alapján rögzítettem az adatokat. Egyéni rétegrenddel rendelkezik a talajjal érintkező padló, a dőlt tető, valamint a környezeti levegővel határos födém. A fűtetlen terekkel szomszédos falak azonos szerkezettel rendelkeznek a külső falakkal, a belső hőtároló tömeget jelentő fal pedig 30 cm-es egyrétegű öntött beton. A rétegrendek sorrendje belülről kifele értelmezendő az 1. táblázat szerint.

1. táblázat: Határoló szerkezetek rétegrendjei

Talajjal érintkező padló rétegrend		
Megnevezés	d [cm]	λ [W/mK]
Öntött beton	6	1.13
EPS hőszigetelés	15	0.035
Vasbeton	8	2.5
Tetőszerkezet rétegrend		
Megnevezés	d [cm]	λ [W/mK]
Rétegelt falemez	3,5	0.15
Kőzetgyapot	25	0.033
Agyagcserép tetőfedés	2,5	1
Külső fal rétegrend		
Megnevezés	d [cm]	λ [W/mK]
Belső gipsz vakolat	1,3	0.4
Tégla fal	30	0.84
EPS hőszigetelés	10	0.04
Külső cement vakolat	2	0.72

3.2.2. JELENLÉT, BELSŐ TERHELÉSEK ÉS GÉPÉSZET

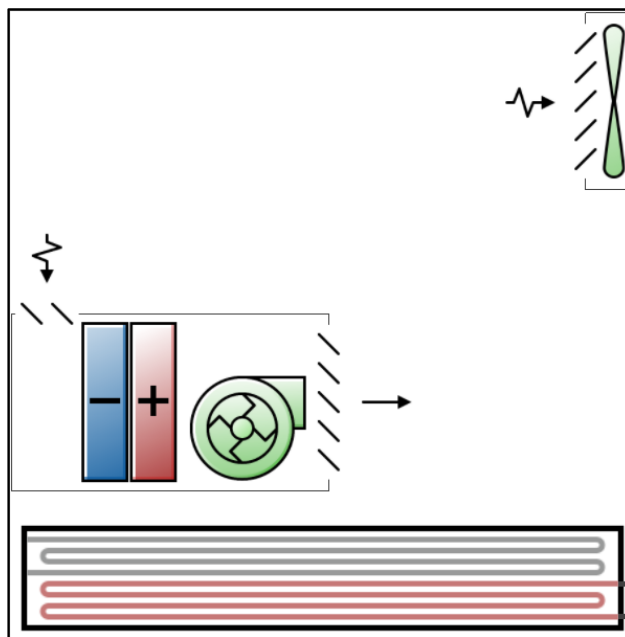
Az épületben tartózkodók fajlagos sűrűsége $0,11$ fő/m², amely 17 ember jelenlétét jelenti a maximális létszám esetén. Az erre vonatkozó jelenléti menetrend hétköznapi tartózkodást feltételez a 6. ábra diagramja szerint, melyen a 0% az üres épületet, 100% pedig a maximális létszámot jelenti egy hétköznapi bizonyos óráiban. Hétvégén az épületben nem tartózkodnak személyek.



6. ábra: Épületben tartózkodók jelenléti menetrendje

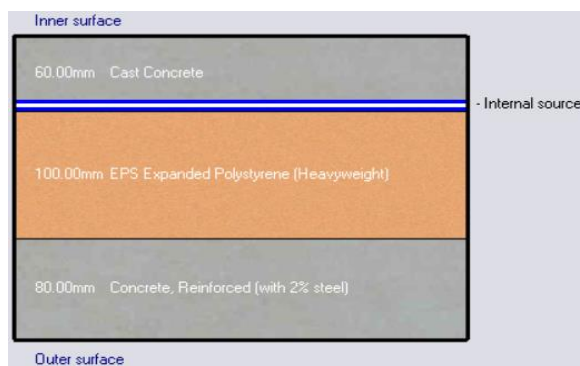
Világításból, valamint egyéb technológiából származó belső hőterhelést szintén a jelenléthez igazítva alakítottam ki 3 és 12 W/m² leadott energiasűrűséggel, az üres épület, valamint maximális létszám esetekre, helyszíni felmérés alapján. További hőnyereséggé jelentkezik az üveg felületeken keresztül bejutó szoláris energiamennyiség.

A már említett részletes gépészeti kialakítás tartalmazza a fűtési rendszert, hűtés és melegvízellátás vizsgálatára jelen tanulmányban nem kerül sor. Fűtési menetrendet a jelenléthez hasonlóan munkanapokra és hétvégére határoztam meg a téli időszakra vonatkozóan. Hétvégén 16 °C-ra állítottam a fűtés csökkentési értéket, míg hétköznap a nappali órákban a referencia hőmérséklet 21 °C, mely megfelel az MSZ EN 16798-1:2019 szabvány fűtési értékére előírt értéknek irodaépületben. Az esti és hajnali időszakokban szintén fűtés csökkentett állapotot alkalmaztam. A 7. ábrán látható a programban definiált, részletes gépészeti kialakítás. A levegő-víz hőszivattyú által ellátott vizes padlófűtési rendszer modellezése DesignBuilder-ben nem jelent kihívást, azonban az egyszerűsített modell felállításakor nemlineáris egyenletek bevezetését igényelné, mely terület nem része a lineáris MPC témakörnek. Ennek következtében egy elektromos sugárzó felületet építettem be, aminek a hőleadási teljesítménye megegyezik a beáplált villamos energiával. A maximális hőleadási teljesítményérték 15 kW. Az identifikációs folyamatba és a szabályozástervezésbe ez lineáris modellezéssel implementálható. Az MPC vizes rendszerre implementálását a jövőbeli célok között említem a dolgozat összefoglalásában. Légkezelési rendszer kialakítása nem szükséges az identifikáció megvalósításához, azonban a későbbi társszimulációs felület megkövetelte egy befúvási és egy elszívási pont létrehozását. Ezek a rendszerelemek tehát mindössze formai okokból szerepelnek a részletes HVAC felépítésben, üzemi menetrendjükre egész évben kikapcsolt állapotot definiáltam.



7. ábra: Részletes gépészeti felépítés Design Builder programban

A részletes modellben létrehozott elektromos padlófűtés elem alkalmazásához még szükséges az épületszerkezetben való elhelyezése is. Mindezt a határoló szerkezeti elemek rétegrendjénél lehetséges beállítani, ahol a megfelelő rétegek közé egy belső forrás felvétele szükséges, ami maga a fűtőcső. A 8. ábrán látható a talajjal határos szerkezet rétegrendje, ahol a belső öntött beton és a külső hőszigetelés közé helyeztem a padlófűtést.



8. ábra: Padlófűtés a rétegrendben

3.3. Állapottér modell létrehozása

Az épületek egytárolós modellezéséhez bevezetem az állapottér modellezés módszertanát, amely lineáris időinvariáns rendszerek (LTI) állapotaira felírható, elsőfokú differenciálegyenletek, mátrix alakban való kezelését teszi lehetővé. A rendszer állapota $x(t)$, a t_0 időpillanatban olyan információ, amelyből az $u(t)$, $t \geq t_0$ bemeneti jel ismeretében a rendszer válasza minden $t \geq t_0$ időpontra meghatározható. A rendszer válasza, annak állapotait és kimenő jeleit jelenti, a bemenőjel pedig lehet bármely rendszert befolyásoló külső zavarás vagy kontrollált tényező.

Ezek alapján az $x(t_1)$ állapot bármelyik jövőbeli pillanatban meghatározható az állapottér modell alkalmazásával, mindössze a kezdeti értékének, $x(t_0)$ állapotnak és a kettő időpont közötti bemeneti értékek ismeretében. Egy rendszer rendjét azon állapotok minimális száma jelenti, amellyel pontosan kielégíthetők az előzőekben megfogalmazott feltételek.

Diszkrét időtartományban hasonlóképpen megállapítható a $(k+1)$ -edik időlépés állapotaira, hogy azok meghatározhatók az aktuális (k) -edik állapotok és bemenő jelek értékeinek lineáris kombinációjából, mely felírható az $x(k) \in \mathbb{R}^n$ állapotok és $u(k) \in \mathbb{R}^m$ bemenő jelek oszlopvektorával (1).

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k), \quad (1)$$

Ahol $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times m}$ a rendszert leíró konstans mátrixok. A rendszer állapotaiból számítható a kimenőjel, $y(k) \in \mathbb{R}^p$ adott időpillanatra (2).

$$y(k) = Cx(k) \quad (2)$$

Ahol $C \in \mathbb{R}^{p \times n}$ a kettő közötti összefüggést leíró konstans mátrix. Ha a rendszer állapotai közvetlen mérhetőek és visszacsatolhatóak a zárt hurok mentén, abban az esetben a C mátrix egységmátrix is lehet.

Az állapottér modellezés alkalmazásával tehát prediktálható egy dinamikai rendszer jövőbeli állapotainak és kimeneteinek értéke, fizikai törvények alapján felépített matematikai modell szerint. Előnye, hogy egy komplex rendszert képes egyszerűsítések és elhanyagolások mentén egyszerű és könnyen kezelhető módon leírni, amely számos mérnöki kihívásra kielégítő pontosságot képes biztosítani. Numerikusan történő megoldása rendkívül hatékony, kis számítási kapacitással elvégezhető, amely szintén előnyt jelent a magas rendű, bonyolult rendszereket leíró modellek alkalmazásával szemben. Ennek következtében egy kiváló alapot nyújt modern szabályozástechnikai rendszerek tervezéséhez.

Cél tehát olyan differenciálegyenletek felírása az épületre vonatkozóan, amelyek diszkrét időben, algebrai egyenletekkel képesek a ház dinamikus viselkedésének pontos leírására. Ehhez az elektromosságban alkalmazott ellenállás-kapacitás (RC) analógia kerül alkalmazásra, amelyben a kapacitás valamilyen energiatárolásra, az ellenállás pedig energia disszipációra utal. Mechanikai rendszerekben egy tehetetlenségi tömeggel rendelkező test kinetikai energiát, egy rugó pedig potenciális energiát képes tárolni, a csillapító elem pedig elnyeli azt. A rugó megfeleltethető az elektromos kör indukciós tekercsének. A rendszer változói között megkülönböztethetők intenzív, valamint extenzív állapotváltozók. Előbbi a rendszer két pontja között meghatározható különbséget jelenti, mérésére párhuzamos kapcsolással van lehetőség.

Utóbbi egy rendszeren keresztül haladó mennyiség, mérésére soros beépítés alkalmazandó. A rendszer teljesítménye ezen intenzív és extenzív változók szorzataként adódik, elektromosságban áram és feszültség, mechanikai rendszereknél erő és sebesség, áramlásban térfogat-áram és nyomás változók szerint.

Épületszerkezetek esetében az energia hő formájában tárolható és közvetíthető. A kapacitási elem (C) ez esetben a termikus hőtehetetlenségi tömeg, az ellenállás (R) pedig a termikus ellenállás, két közeg között fellépő hőátadás során. Ezen elemek kapcsolatot teremtenek a hőtani változók, a hőmérséklet, mint intenzív és hőáram, mint extenzív változók között. A hőtani kapacitás nagysága megadja, hogy a hőmérséklet (T , °C) időbeni (t , s) változása mekkora hőáramot ($\dot{Q}$, W) eredményez (3).

$$\dot{Q}_i = c_p \cdot \rho \cdot \delta \cdot A = C_i \cdot \frac{dT_i}{dt}, \quad (3)$$

Ahol i az épület egyes önálló hőtárolási képességgel rendelkező szerkezeteire vonatkozó index. A hőtani kapacitás az anyag fajlagos hőjéből (c_p , J/kg-K), sűrűségéből (ρ , kg/m³), vastagságából (δ , m) és felületének nagyságából (A , m²) tevődik össze.

A termikus ellenállás megadja, hogy két közeg közötti hőmérsékletkülönbség hatására mekkora hőáram alakul ki. Megkülönböztethető kondukciós, másnéven vezetékes, valamint konvektív és sugárzásos hőátadási fajta.

Vezetékes hőátadás egy szilárd vagy nyugalomban lévő folyékony, vagy légnemű halmazállapotú rendszerben alakul ki (4).

$$\dot{Q}_{kd} = \frac{kA}{\delta} \Delta T = \frac{1}{R_{kd}} \Delta T \quad (4)$$

Amelyben a termikus ellenállás a réteg vastagságából, felületének nagyságából és a hővezetési ellenállásból (k , W/m-K) adódik.

Konvektív módon felület és fluidom/gáz közötti hőátadás alakulhat ki, amely a fluidom vagy gáz részecskéinek tovább áramlásából ered (5).

$$\dot{Q}_{kv} = \alpha A \Delta T = \frac{1}{R_{kv}} \Delta T \quad (5)$$

amelyben a felület nagysága mellett szerepel a felület hőátadási tényezője (α , W/(m²K)).

A sugárzással történő hőátadást a zóna hőmérsékletének becslésekor elhanyagoltam, figyelembevétele esetén a (6) egyenlettel modellezhető lineáris alakban.

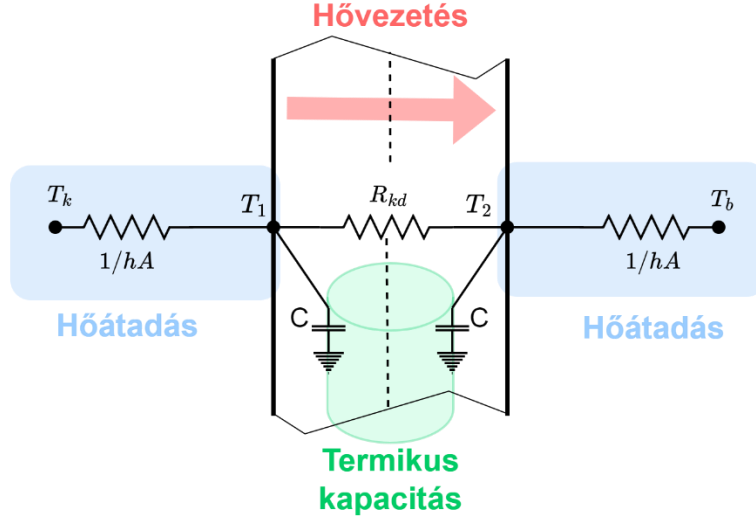
$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \cdot h_r \cdot A \cdot \Delta T = \frac{1}{R_{rad}} \Delta T \quad (6)$$

A termikus sugárzási ellenállás a felület emissziós képessége (ε), sugárzási hőátadási tényezője (h_r , $W/(m^2K)$) és felülete alapján számítható.

A gray-box modellezés során előzetes fizikai ismeretek felhasználásával felírhatók azok az elsőrendű, sztochasztikus differenciálegyenletek a rendszer csomópontjaira, amelyek leírják az épület dinamikus viselkedését. A fizikai paraméterek száma és felvételének módja függ a modellezés során alkalmazott egyszerűsítésektől, melyek a vizsgálat során a következők [21]:

- A hőtároló tömeggel rendelkező határoló és belső falszerkezeteket sima, egyrétegű falként interpretáltam, homogén anyagszerkezettel.
- A hőátadás minden esetben egydimenziós, tehát oldalirányú hőmérsékletkülönbségek nincsenek.
- A zóna levegő hőmérséklete ugyancsak tökéletesen kevert állapotú, minden pontjában azonos paraméterekkel rendelkezik.
- További csoportosítási, valamint egyszerűsítési lehetőség, hogy az azonos szerkezetű és szomszédos környezetű homlokzati felületeket egy külső falként kezeltem.
- Felépítésükből kifolyólag a tetőszerkezet, ablakok és ajtók nem rendelkeznek termikus hőtárolási képességgel, ezek mindössze termikus ellenállást jelentenek a modellben.

A vizsgálat során 5 állapotot vettem fel, melyek önálló hőtároló egységei az épületnek és ezek jelentik az RC modell csomópontjait. Ezek az hőmérséklet állapotok a zóna levegője, a padlófelület, a belső határolófalak, valamint a külső határoló szerkezetek belső és külső felületeire vonatkoznak. Utóbbit a szerkezeten belüli hővezetési dinamika leírása miatt bontottam ketté, ezzel egy pontosabb viselkedés közelítését lehetővé téve. Ebből kifolyólag, a külső falra felírható egyenletek 3 ellenállásból (egy hővezetés, két hőátadás a felületeken) és két kapacitás elemből állnak, ez az úgynevezett 3R2C modellezése egy falnak, melyet a 9. ábrán illusztráltam.



9. ábra: Falon történő hőátadás 3R2C modellel általános esetre
modellel általános esetre

A vizsgált modell két külső határoló szerkezet állapotára felírhatók a (7)-(8) differenciálegyenletek.

$$C_{e1} \cdot \frac{dT_{e1}}{dt} = \frac{1}{R_{ea}} (T_a - T_{e1}) + \frac{1}{R_{e1} + R_{e2}} (T_{e2} - T_{e1}) + \dot{Q}_{irr} \quad (7)$$

$$C_{e2} \cdot \frac{dT_{e2}}{dt} = \frac{1}{R_{ie}} (T_z - T_{e2}) + \frac{1}{R_{e1} + R_{e2}} (T_{e1} - T_{e2}) \quad (8)$$

A képletekben szereplő e1 és e2 indexek a külső, valamint belső felületre vonatkoznak, T_a a környezeti hőmérséklet, T_z a zóna hőmérséklet. A felületi hőátadási tényezőket a külső és belső felületre az R_{ea} és R_{ie} tagokban határoztam meg, a megfelelő rétegrendek figyelembevételével. A ház falára eső szoláris hőnyereséget ($\dot{Q}_{irr}$) bemeneti jelként a külső felületi állapot kapja. Analóg módon definiálhatóak az épületen belüli határolófalakra (m index), valamint a talajjal érintkező padlóra (f index) a (9)-(10) összefüggések:

$$C_m \cdot \frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{R_{im}} (T_z - T_m) \quad (9)$$

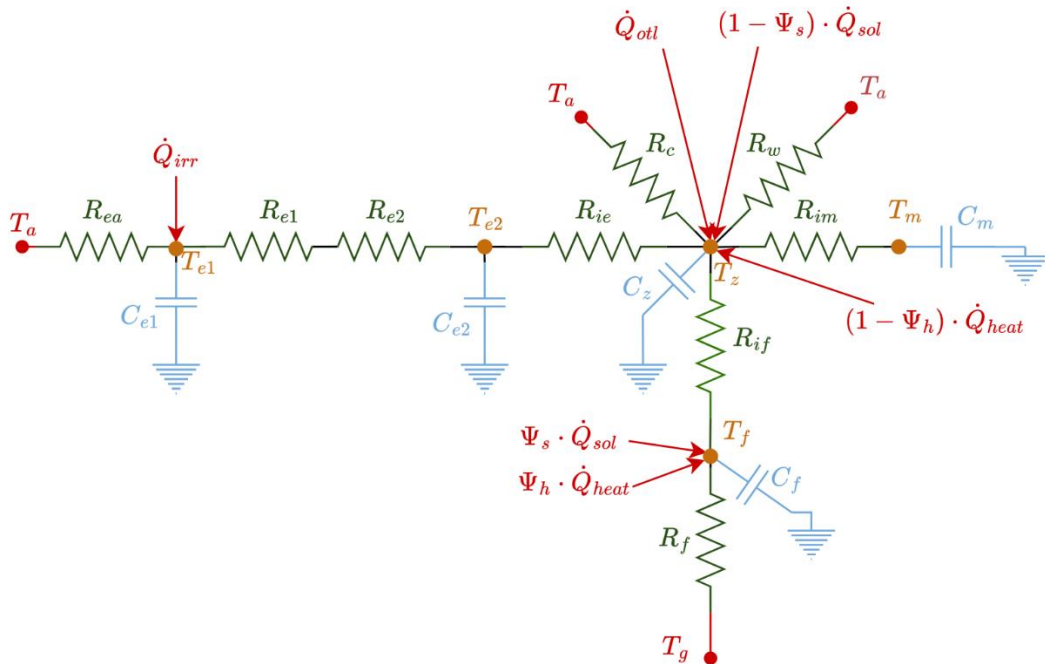
$$C_f \cdot \frac{dT_f}{dt} = \frac{1}{R_{if}} (T_z - T_f) + \frac{1}{R_f} (T_g - T_f) + \dot{Q}_{heat} \cdot \psi_h + \dot{Q}_{sol} \cdot \psi_s \quad (10)$$

A felületi hőátadási tényezők a belső levegővel az R_{im} és R_{if} tagok, míg a padló hővezetési ellenállása a talajjal szembeni vezetési hőátadás során R_f . A padlófűtés által betáplált hő ($\dot{Q}_{heat}$) egy része közvetlenül a padló hőmérsékletét növekedését eredményezi, aminek mértékét a ψ_h arányosító tényező jelöli. Hasonló módon, az üveg felületeken bejutó szoláris nyereség ($\dot{Q}_{sol}$) padlóra eső hányadát jelöli a ψ_s tényező.

A zóna hőmérsékletének modellezése az elsőszámú cél jelen vizsgálat során, ennek megfelelően az erre eső hatások figyelembevétele kritikus. Felírható a (11) differenciálegyenlet.

$$C_z \cdot \frac{dT_z}{dt} = \frac{1}{R_{if}} (T_f - T_z) + \frac{1}{R_{ie}} (T_{e2} - T_z) + \frac{1}{R_{im}} (T_m - T_z) + \frac{R_c + R_w}{R_c \cdot R_w} (T_a - T_z) + \dot{Q}_{otl} + (1 - \psi_h) \cdot \dot{Q}_{heat} + \dot{Q}_{sol} \cdot (1 - \psi_s) - \psi_s) \quad (11)$$

Az összefüggésben szerepel az ablakok (R_w) és a tetőszerkezet (R_c) ellenállása a környezeti levegő felé. A belső hőnyereségek ($\dot{Q}_{otl}$) az emberek tartózkodásából, a világításból és egyéb technológiai eszközök által kibocsátott hőáramból kombinálhatóak össze egy bemeneti jelként. A teljes modell vizuális szemléletesére a 10. ábra szolgál, amely egy elektromos RC körrel analóg módon mutatja be a zónahőmérséklet időbeli meghatározásához szükséges további állapotok, paraméterek és inputok szerepét. Barna színnel az állapotokat, zölddel a termikus ellenállásokat, pirossal pedig a környezeti hőmérsékleteket, valamint a hőnyereségeket illusztráltam.



10. ábra: Az épület RC modelljének felépítése

Célszerű összefoglalásként felsorolni a modell elemeit annak érdekében, hogy a részletes dinamikus szimuláció által elvégzett identifikáció során átlátható képet kapjunk a számítás menetéről.

A modell állapotai az épület egyes hőtároló képességgel rendelkező szerkezeteinek hőmérséklete Celsiusban, melyek időbeli változását az előzőekben bemutatott differenciálegyenletek írják le:

- T_{e1} – Külső fal külső felülete
- T_{e2} – Külső fal belső felülete
- T_m – Épületen belüli falak
- T_f – Talajjal érintkező padló
- T_z – Termikus zóna levegője

Állapot vektor: $x = [T_{e1} \ T_{e2} \ T_m \ T_f \ T_z]^T$

A modell bemeneti jele a környező hőmérséklet és a zóna hőmérsékletét befolyásoló hőnyereség értékeket tartalmazza:

- T_a – Környezeti hőmérséklet [$^{\circ}\text{C}$]
- T_g – Talaj hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$]
- $\dot{Q}_{irr}$ – Födém külső felületére érkező szoláris energia [W]
- $\dot{Q}_{otl}$ – Belső hőterhelések („occupancy-technology-lightning”) [W]
- $\dot{Q}_{heat}$ – Padló fűtés [W]
- $\dot{Q}_{sol}$ – Épületbe jutó szoláris energia ablakokon keresztül [W]

Bemeneti vektor: $u = [T_a \ T_g \ \dot{Q}_{irr} \ \dot{Q}_{otl} \ \dot{Q}_{heat} \ \dot{Q}_{sol}]^T$

A paraméterek kezdeti becslése az épület szerkezeti anyagának tulajdonságai alapján határozható meg és ezekből állítható össze az állapot és bemenőjel vektorokhoz tartozó konstans mátrixok, az A és B mátrix. A paraméterek felírása vektoriális alakban:

$$\Theta = [R_{e2} \ R_{e1} \ R_{ea} \ R_{ie} \ R_{if} \ R_f \ R_{im} \ R_w \ R_c \ C_{e1} \ C_{e2} \ C_f \ C_m \ C_z \ \psi_s \ \psi_h]$$

Az RC modell identifikációját Matlab és Simulink végeztem el, melyekhez az alábbi kódokat hoztam létre:

- Az egyik függvény elvégzi a kezdeti paraméterek értékeinek számítását, melyeket előzetesen a Design Builder modell alapján állítottam össze, az említett egyszerűsítési megfontolások szerint.
- Egy másik függvény létrehozza az állapottér modellekben szereplő együttható A és B mátrixokat.
- A paraméterek hangolási folyamatához szükséges egy inicializáló kód, mely meghívja az előző függvényeket és elvégzi a kezdeti számításokat.
- Végül a paraméterbecslést végrehajtó kód, amelyben iteratív módon hangoltam a kezdeti paraméter értékeket.

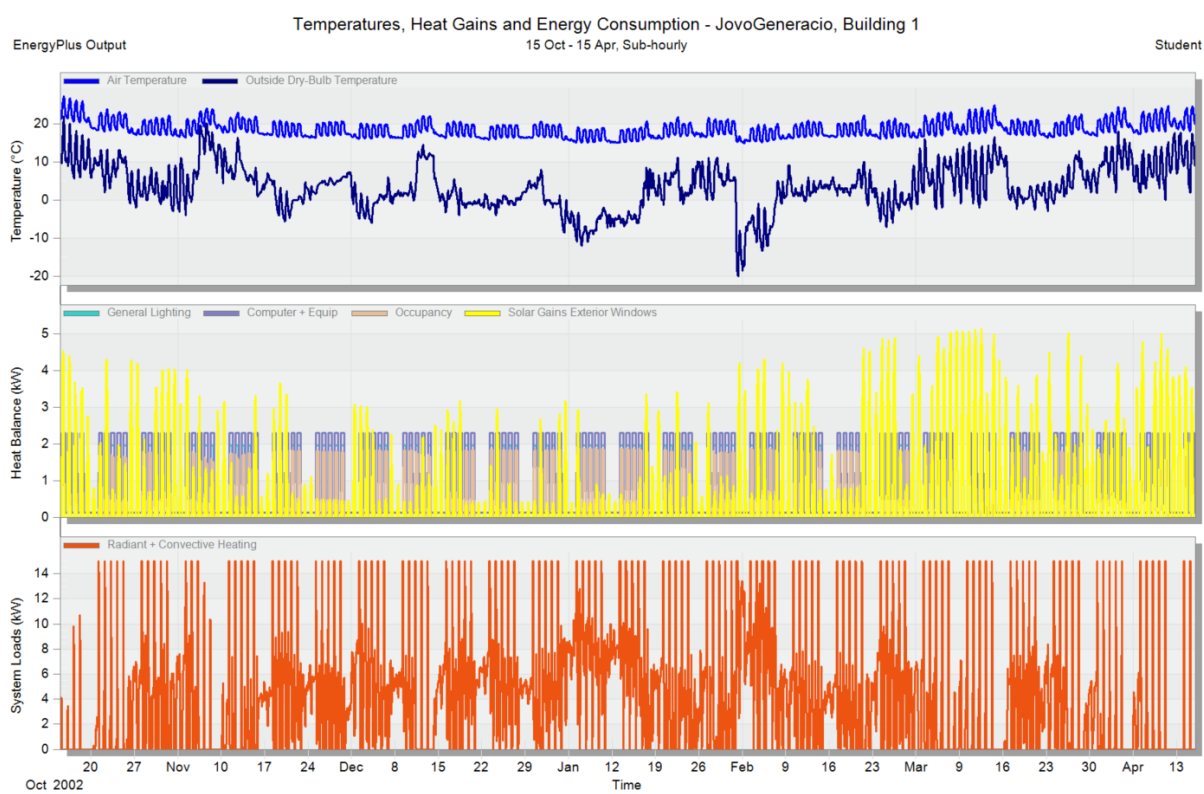
- Az iterációs művelet alatt a módosított paraméterekkel történő szimulációkat Simulink programban futtattam adott időtartományra, melyen belül egy beépített S-Function végzi a diszkrétizált állapotter modell léptetését.

A vizsgálat során a választott időlépés 15 perc, ezzel az időközzel exportáltam a dinamikus szimuláció adatai is.

3.4. Gray-box modell identifikáció

3.4.1. DESIGNBUILDER SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK

A Design Builder programban egy teljes fűtési idényre végeztem el a szimulációt, mely október 15-től április 15-ig tart, óránként 4 mintavételezési idővel. A fal hőmérséklet értékek átlagolását Excel programban végeztem, melyhez szükséges volt az egyes falszerkezetek külső és belső csomópontjaira vonatkozó felületi hőmérsékletértékek exportálása. A szimuláció eredményeinek összefoglalója a 11. ábrán látható, felül a hőmérséklet, középen a belső hőnyereség értékekkel, alul pedig az elektromos padlófűtés által leadott hőmennyiség szerepel az idő függvényében.

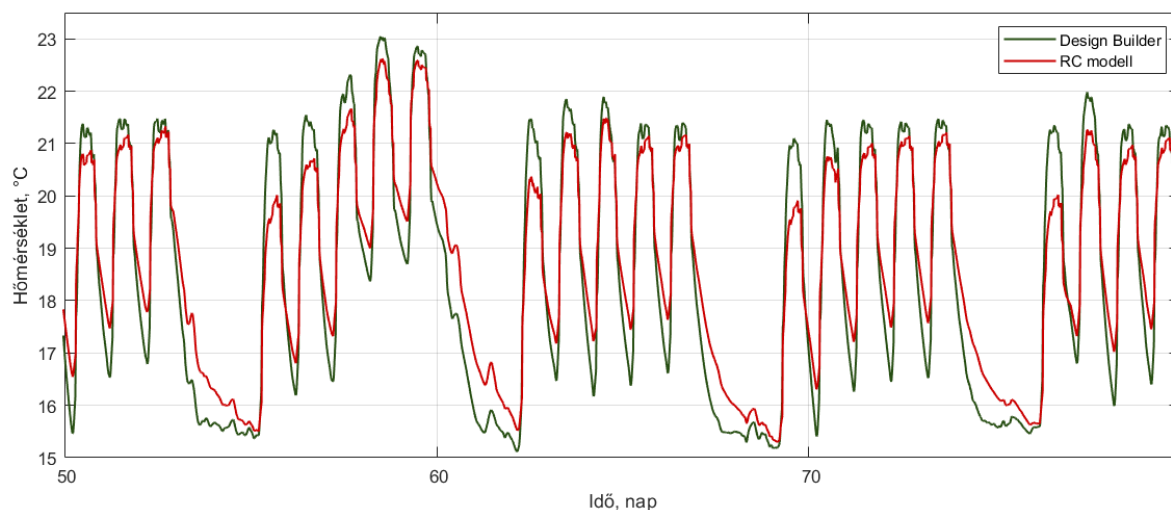


11. ábra: Design Builder szimulációs eredmények

Az identifikációhoz szükséges exportálni az egyes állapotokhoz tartozó értéket minden időlépésre a teljes szimulációs tartományra. Ezek jelentik majd a referenciát az RC modell számára, valamint a kezdeti értékeket biztosítják az első időlépésben. Emellett az összes korábbiakban bemutatott bemenőjelet is exportáltam, így már minden adott az RC modell lefuttatására.

Az úgynevezett tréning időszakot a fűtési periódus első 70%-ára, vagyis az első 128 napra adtam meg. Erre az időintervallumra történik a paraméterek hangolása. Az azt következő időben pedig a már módosított paraméterekkel teszteltem a modell pontosságát, vagyis addig ismeretlen input adatokkal vizsgálható az RC modell alkalmazhatósága.

A 12. ábrán látható a DesignBuilder és az egyszerűsített modell szimulációs eredményeinek összevetése a zónahőmérséklet lefutását összehasonlítva, a kezdeti becsült paraméterek alkalmazásával. A praktikusabb vizuális megjelenés érdekében a 183 napot bemutató ábra helyett, csak 30 napot jelenítettem meg a tréning időszak közepéből kiragadva.



12. ábra: Zóna hőmérséklet lefutása részletes és kezdeti egyszerű modellel

A két diagram között jellegre tapasztalható hasonlóság, azonban a 1-2 °C-os eltérések túlságosan nagy mértékűek egy pontos szabályozó tervezéséhez. A becslés pontosságát az átlagos négyzetes hiba (Mean Squared Error, MSE) meghatározásával lehet számszerűsíteni (12), mely megadja a prediktált állapot és a „valós”, jelen vizsgálatban a DesignBuilder szimuláció értékei között fennálló hiba négyzetének átlagát a teljes időtartományra. A számlálóban y_{pred} az egyszerűsített, y_{ref} pedig a DesignBuilder értékeit tartalmazza minden időlépésre, vektoriális alakban. A $\|$ jelölés a hiba 2-es norma vektorát jelöli, míg a nevezőben a tréning időszakbeli időlépések száma szerepel.

$$MSE = \frac{\|y_{pred} - y_{ref}\|^2}{n_{train}} \quad (12)$$

A kezdeti RC modell zónahőmérsékletre vonatkozó MSE értéke 0,4595. A paraméterek megfelelő hangolásával ennek csökkentése a cél a továbbiakban.

3.4.2. PARAMÉTER KALIBRÁCIÓ

Adott bemeneti értékek és kezdeti feltételek mellett a továbbiakban célunk, hogy minél pontosabb hőmérséklet lefutást adjon az RC modell. Ennek érdekében a felvett paraméterek értékeit kell oly módon módosítani, hogy az képes legyen pontos eredmények meghatározására, más input és kiindulási értékek mellett is.

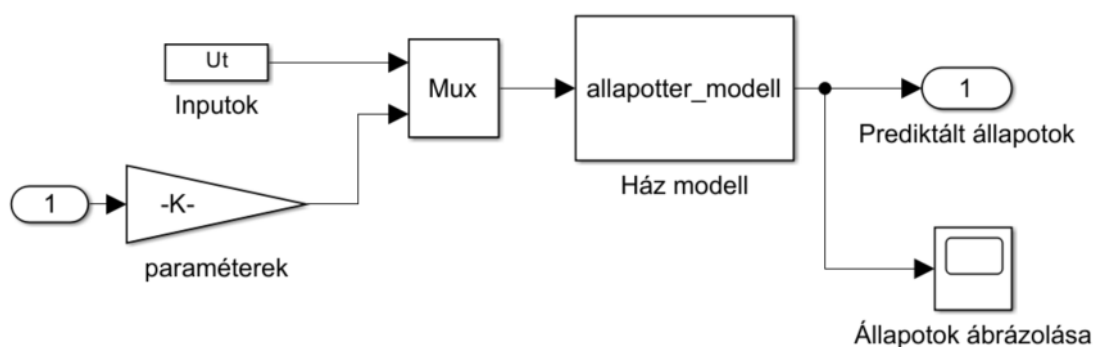
A lineáris optimalizálásra számos algoritmus létezik, melyek iteratív módon keresik egy paraméterektől lineárisan függő függvény értékének minimumát. A cél meghatározni a legjobb paraméter kombinációt, amely megvalósítható és kielégíti az általunk definiált kényszereket. A Matlab program egyik legrugalmasabb optimalizáló függvénye az *fmincon*, amely képes lineáris és nemlineáris, többváltozós problémák megoldására [22]. Az optimalizáló algoritmus a következő alakban hívható meg a programban:

$$fmincon(@function, p_0, lb, ub, options)$$

Ahol:

- p_0 : A kezdeti paraméter vektor, a függvény inputja
- lb : Paraméter értékek alsó határa
- ub : Paraméter értékek felső határa
- $options$: Az optimalizálás beállításai, melyek rögzíti az iterációs lépések maximális számát, valamint a konvergencia feltételeit

A szintén input tagként inicializált függvény (*@function*) a Simulink modellt indítja megadott időtartományra, diszkrét időben. A 13. ábrán szemléltetett modell a korábban említett Matlab kódok meghívásával hozza létre az állapotter modell, aktuális paramétereit szerinti alakját és futtatja azt minden iteráció alatt.

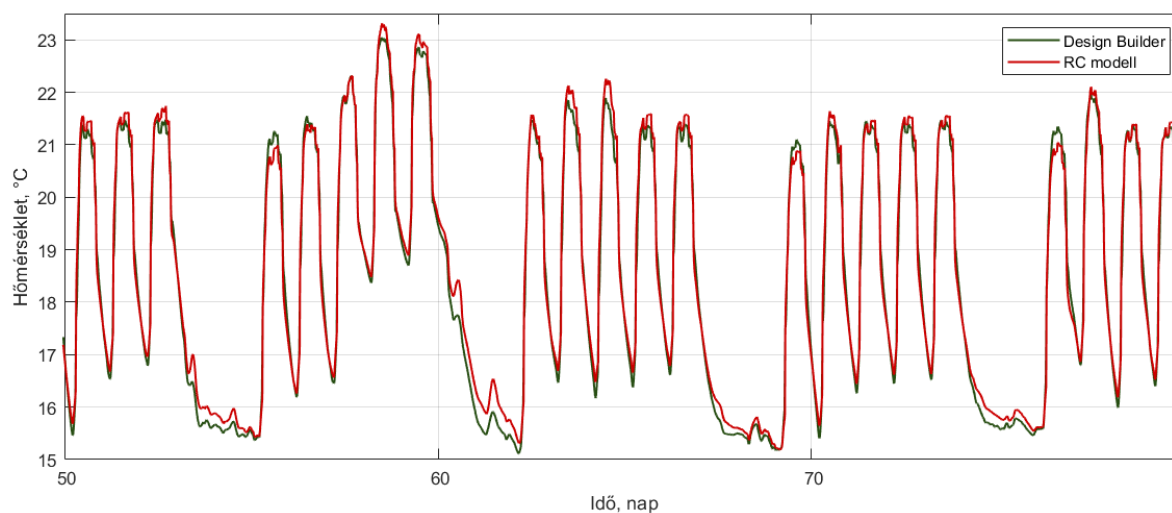


13. ábra: A szimuláció során alkalmazott Simulink modell

Az Simulink felépítésben szereplő U a rendszer bemeneti vektora, a paraméterek háromszög blokk pedig a Θ vektor. Ezek az állapotter modell inputjai. A bal oldalon található 1-es jelzésű blokk a Simulink modell bemenőjeleként adható meg, az optimalizálás során ezen keresztül módosulnak az R és C paraméterek értékei az egyes iterációs lépések között. A különböző nagyságrendjük miatt azonban szükséges őket skálázni, emiatt a bemeneti jel kiindulási állapotban 16 db egyesből álló vektor, melyet Simulink-en belül szorzunk fel a valós értékekkel.

A paraméter hangolás során csökkenteni kívánt MSE érték nem csupán a zóna hőmérsékletet veszi figyelembe, hanem a további négy állapot hibáját is tartalmazza, különböző mértékű súlyozással. Ezzel elkerülve azt a lehetséges esetet, amely során a tréning intervallumban a zóna hőmérséklet jó négyzetes hibát produkál, mellette viszont valamelyik állapot teljesen más viselkedést mutat a referencia modell dinamikájához képest. Ezáltal egy fals identifikáció kevésbé veszélyezteti a modell helyességét.

Több mint 500 iteratív módon történő szimulációt követően az optimalizáló által módosított paraméterek már egy jobb közelítéssel képesek a valósnak vélt dinamikát modellezni. A szimulációk számának nagyságát a jelentős számú paraméter sereg teszi szükségessé, melyek egyszerre képesek részletességet és bizonytalanságot is okozni a modellben. A 14. ábrán látható a zóna hőmérséklet lefutásának összehasonlítása a frissített RC paraméterekkel.

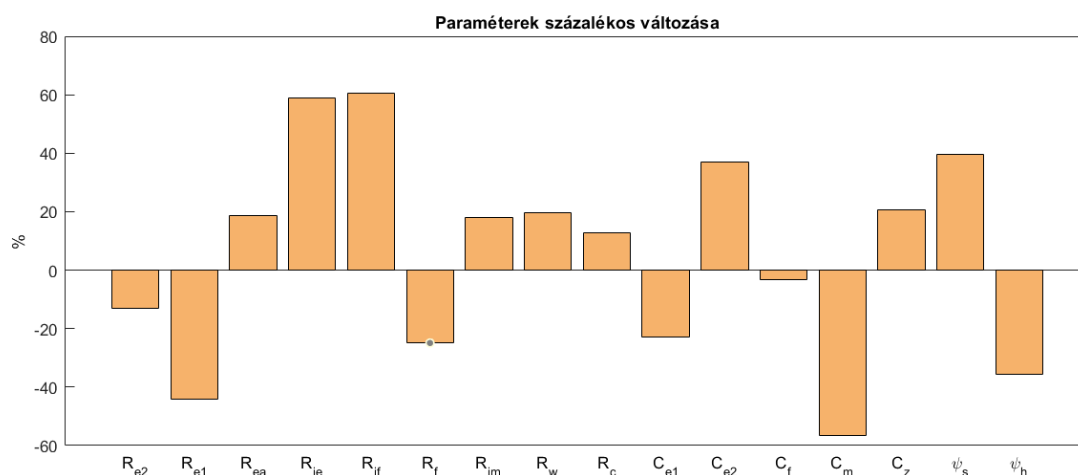


14. ábra: Zóna hőmérséklet lefutása részletes és hangolt egyszerű modellel

A két adatsor MSE értéke 0,0762, mely jelentős javulást sugall a kiindulási modellhez képest. A diagramon is látható, hogy az adatsorok közötti különbség csökkent, mely a tréning időszak alapján már egy megfelelő pontosságú predikciós modellt képes biztosítani a szabályozó számára. A melléklet tartalmazza a paraméterek kezdeti, valamint identifikáció utáni módosult

értékeit. Szintén a mellékletben található 25-28. diagramok bemutatják a további 4 állapot alakulását a tréning időszak során a hangolt paraméterekkel.

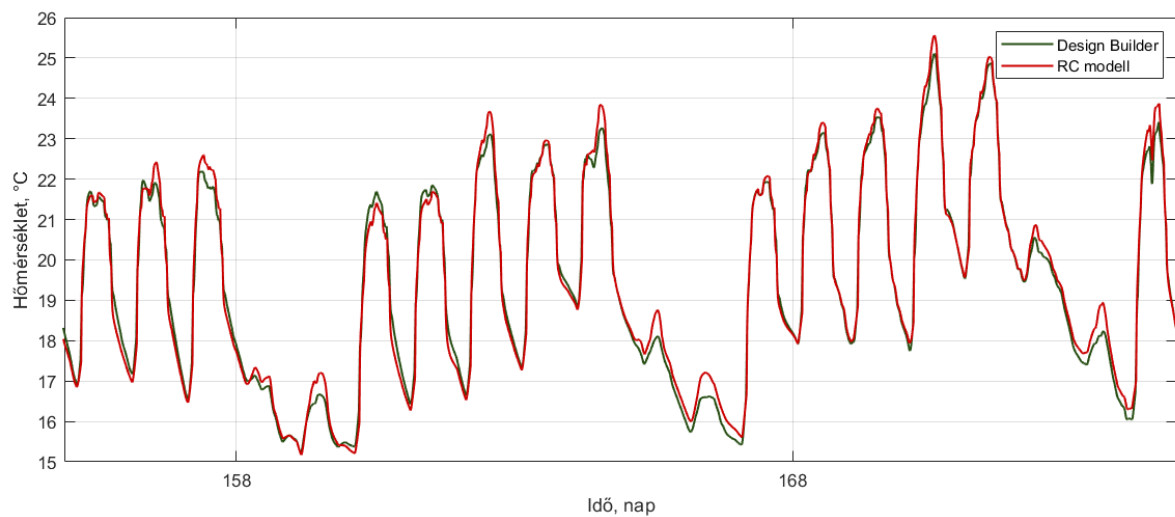
A paraméterek frissített értékeit a kezdetihez képest a 15. ábra szemlélteti, mely a százalékos változásokat jelöli. Ezek alapján megállapítható, hogy a kedvező MSE érték eléréséhez a modell összes paramétere a kiindulási értékéhez képest nem módosult 60%-nál nagyobb mértékben, azonban jónéhány termikus ellenállás és kapacitási elem értékét kellett igencsak nagymértékben módosítani.



15. ábra: Paraméterek százalékos változása a paraméter becslés során

3.4.3. GRAY-BOX MODELL TESZTELÉS

A kéthetes periódus első 70%-ára identifikált RC modell képes kell legyen olyan körülmények, vagyis bemeneti értékek mellett is megbízható eredményeket produkálni, melyek a tréning időszakban nem vettek részt az identifikációs adatsorban. Ezáltal megállapítható, hogy a modell alkalmas-e az adott épület dinamikai viselkedésének leírására egy szabályozási séma megtervezése során, vagyis sikerült-e a megfelelő számú állapot és termikus ellenállás tagokkal, jól kalibrált rendszert előállítani. A 16. ábrán szerepel a zónahőmérséklet tesztelési időszakból kiragadott, 20 napra vonatkozó lefutása a két modellre. Megfigyelhető, hogy az egyszerűsített modell végig megfelelő pontossággal illeszkedik a referencia hőmérséklet lefutásra. Az MSE mutató a teljes tesztelési időszakra 0,1163.



16. ábra: Tesztelési eredmény a hangolt RC modellel

A tesztelést követően megállapítható, hogy sikerült egy MSE értékben kedvező eredményt produkálni, a modell számára ismeretlen bemeneti adatsorra is. Ezzel egy modellalapú szabályozási stratégia tervezhető a felhasználásával, melyet a következőkben mutatok be.

4. MODELL PREDIKTÍV KONTROLLER FELÉPÍTÉSE

Ebben a fejezetben bemutatom az MPC tervezésének folyamatát. A szabályozás során véges időintervallumra történik az optimalizálás egy mozgó időhorizonton, minden időlépésben. Ez azt jelenti, hogy az algoritmus minden egyes mintavételezési lépésnél a rendszert leíró modellt, az aktuális mért értékek és az előre jelzett zavarások alapján meghatározza az épület viselkedését a következő időszakra. Ennek mentén az algoritmus megoldja az optimalizálási problémát a manipulált változóra egy előre definiált költségfüggvény segítségével. Az így előállított bemeneti jelsorozat első tagját alkalmazzuk az aktuális lépésben, majd folyamat ezt követően minden időlépésben megismétlődik. A fejezetben kifejtem miként építhető fel a predikciós modell az identifikált paraméterek alapján, amivel tetszőleges időszakra meghatározható az épület viselkedése. Ezt alkalmazva definiálható az optimalizálási probléma, mely egy kvadratikus függvényt minimalizál a bemeneti szekvencia optimális értékeinek beállításával. Ahhoz, hogy a valós rendszer teljesítmény határain belül kerüljön megoldásra a probléma, szükséges bizonyos kényszerek előírása a teljes predikciós tartományra, mely korlátozza az alsó és felső határt a fűtési hőleadásnak a tartózkodási zónában. Ennek levezetését is ismertetem. A feladat során két megoldót teszteltem, melyekből az első alkalmazza az előzőekben leírtakat, a második pedig az identifikációs folyamatban alkalmazott függvény által, adott határokon belül törekszik az optimális bemeneti adatsor meghatározására. Végül a megfelelő mintavételezési idő és predikciós horizont értékét vizsgáltam pontosság és számítási kapacitásigény szempontokból.

4.1. Predikció felépítése

A modell identifikáció során elvégeztem a (7)-(11) egyenletekben szereplő konstans paraméterek kalibrációját, ezáltal pontosan közelíthető az épület dinamikai viselkedése. Az egyenleteket mátrix alakba rendezve előállítható az (13) állapotér egyenlet, ami tartalmazza a konstans együttható mátrixokat, az állapotok és a bementi értékek vektorát. Utóbbi tagjait érdemes ketté bontani manipulált változók és zavarások csoportokra, előkészítve az optimalizálási struktúra felépítésére.

$$x_{k+1} = A \cdot x_k + B_d \cdot d_k + B_u \cdot u_k \quad (13)$$

Az egyenletben szereplő B_d és B_u a szétválasztott d zavarások és u kontrollált input változó mátrixai.

Felírható a következő, $k+2$ időlépésre is a (14) összefüggés szerint.

$$x_{k+2} = A \cdot x_{k+1} + B_d \cdot d_{k+1} + B_u \cdot u_{k+1} \quad (14)$$

Megfigyelhető, hogy az egyenlet tartalmazza az x_{k+1} állapotvektort, melyet korábban felírtunk a kiindulási értékekből. Ezt behelyettesítve felírható a (15) képlet.

$$\begin{aligned} x_{k+2} &= A \cdot [A \cdot x_k + B_d \cdot d_k + B_u \cdot u_k] + B_d \cdot d_{k+1} + B_u \cdot u_{k+1} \\ &= A^2 \cdot x_k + A \cdot B_d \cdot d_k + B_d \cdot d_{k+1} + A \cdot B_u \cdot u_k + B_u \cdot u_{k+1} \end{aligned} \quad (15)$$

Ebben már csak a kezdeti állapotok és a bemeneti értékek szerepelnek.

Bevezetem a teljes predikciós horizontra az állapot, input és zavarás vektorokat:

$$X_k = \begin{bmatrix} x_{k+1} \\ x_{k+2} \\ \vdots \\ x_{k+N_p} \end{bmatrix} \quad U_k = \begin{bmatrix} u_k \\ u_{k+1} \\ \vdots \\ u_{k+N_p-1} \end{bmatrix} \quad D_k = \begin{bmatrix} d_k \\ d_{k+1} \\ \vdots \\ d_{k+N_p-1} \end{bmatrix}$$

Célunk a jövőbeli állapotok felírása a kezdeti értékek és jövőbeli bemeneti értékek ismeretében (16).

$$X_k = M \cdot x_k + G_u \cdot U_k + G_d \cdot D_k \quad (16)$$

Amelyben a mátrixok:

$$M = \begin{bmatrix} A \\ A^2 \\ \vdots \\ A^{k+N_p} \end{bmatrix} \quad G_u = \begin{bmatrix} B_u & 0 & \dots & 0 \\ AB_u & B_u & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ A^{k+N_p-1}B_u & A^{k+N_p-2}B_u & \dots & B_u \end{bmatrix},$$

Emellett G_d azonos felépítéssel definiálható, mint G_u , mindössze B_u helyett B_d szerepel. Ezzel már lehetséges a kívánt állapotok számítása, amennyiben ismertek a kezdeti értékek, a zavarások minden időpillanatban, valamint a bemeneti értékek szintén minden időlépésre. A bemeneti jelsorozat változtatásával manipulálni tudjuk a jövőben bármely állapot értékének változását. A felírással a célfüggvényben eliminálható az állapot vektorok használata.

Ez a felírási metódus ugyanazt hajtja végre, mint a Simulink-ben található diszkrét idejű állapotter modell (Discrete-State-Space) blokk, mely a konstans együttható mátrixok és kezdeti értékek ismeretében számítja az állapotok értékeit a szimulációs időszakra. Így egyszerű módon ellenőrizhető a predikciós modell, mely azonos bemeneti értékekre megegyező állapot lefutást eredményez a Simulink számítással. Megjegyzésként az is elmondható, hogy gyorsabb is a kalkulációs ideje egy hosszabb időszakra való futtatás alkalmával.

4.2. Optimalizálási probléma

A véges időhorizonra történő optimalizálás tehát egy felépített predikciós modellt alkalmazva számítja ki az optimális bemeneti vektort. Ezt megvalósítani egy célfüggvény definiálásával lehetséges, amely tartalmazza a szabályozás során elvárt célértékek megtartását, valamint törekszik a minimális energiafelhasználásra. A feladat során a tartózkodási zóna hőmérséklet értékének referenciakövetését, valamint az elektromos padlófűtés minél kisebb mértékű fogyasztási ingadozását tűztem ki célul az MPC alkalmazásával. Ennek megfelelően (17) összefüggés alapján írható fel a célfüggvény a predikciós időhorizonra.

$$J = \frac{1}{2} \left[(Y - Y_{ref})^T \cdot \hat{Q} \cdot (Y - Y_{ref}) + U^T \cdot \hat{R} \cdot U \right] \quad (17)$$

Az összefüggésben a teljes horizonra vonatkozó súlytagok, a $\hat{Q}$ és $\hat{R}$ meghatározzák, hogy az optimalizálás során mekkora hangsúly kerüljön a referenciakövetés pontosságára, a másik oldalon pedig mennyire fontos a kiegyenlített hőtermelői üzem, vagyis a hőforrás milyen mértékű teljesítményingadozásával valósuljon meg a fűtés. Ezen paraméterek megfelelő megválasztása tapasztalati úton történik, melyet a későbbiekben részletezek. Az Y_{ref} vektor minden időlépésre előírja a referenciahőmérsékletet a tartózkodási zónára. Az Y_k kimeneti vektor az X_k állapot vektorból képezhető (18).

$$Y_k = \hat{C} \cdot X_k \quad (18)$$

A $\hat{C}$ a teljes predikciós időszakra vonatkozik és $C = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$ vektorból képezhető. Ezzel az öt hőmérséklet állapot közül csak a levegő hőmérsékletet vezetem ki, mint output, amire a referenciát is előírtam.

A célfüggvény állapotra és kontrollra irányuló felírása a (17) egyenlet szerint nem teljesen megfelelő. Állandósult állapotban (amikor a zavarások nem változnak) a tartózkodási zóna hőmérsékletértéke megegyezik a referenciaértékkel, ez azonban egy téli napon a kontroll input, vagyis az elektromos padlófűtés egy nem nulla értéken tartásával lehetséges csak. A szabályozó számára az utóbbi minimalizálása is cél, tehát annak csökkentését fogja végrehajtani, ami a referenciakövetési hiba növekedését eredményezi. A fenti felírás alapján tehát ellentmondás áll elő, vagyis az állandósult állapot nem tartható. A súlytagok azt határozzák meg, hogy mekkora "gyorsasággal" érje el a rendszer a kitűzött állandósult állapotot, amikor a referencia hiba, valamint a kontroll inputra vonatkozó tag is nulla értéket vehet fel. Ehhez az U vektor helyett a (19) képlet szerinti, inkrementális növekedési tag bevezetése szükséges, mint kontroll input.

$$\Delta u_{k+1} = u_{k+1} - u_k \quad (19)$$

Látható, hogy a következő abszolút bemeneti értékből kivonja az aktuális időlépésben bevitt tagot. Kifejezve az aktuális bemeneti értéket (20):

$$u_{k+1} = u_k + \Delta u_{k+1} \quad (20)$$

Az optimalizálás immáron az inkrementális növekedésre írható fel, amely állandósult állapotban nulla értéket vesz fel, amikor a referencia hiba is nulla.

Ezek alapján az új célfüggvény felírható (21) az imént definiált inkrementális taggal.

$$J = \frac{1}{2} \left[(Y - Y_{ref})^T \cdot \hat{Q} \cdot (Y - Y_{ref}) + \Delta U^T \cdot \hat{R} \cdot \Delta U \right] \quad (21)$$

Az összefüggésben eliminálni kell az Y tagot, hiszen a függvény értékét a ΔU bemeneti vektorral kívánjuk minimalizálni. Ennek érdekében az (13) egyenlettel analitikus módon, egy bemeneti tag állapottal kiegészítve a rendszert, a $k+1$ időpillanatra felírható a (22) összefüggés.

$$\tilde{x}_{k+1} = \tilde{A} \cdot \tilde{x}_k + \tilde{B}_d \cdot d_k + \tilde{B}_u \cdot \Delta u_{k+1} \quad (22)$$

Ebben:

$$\tilde{x}_k = \begin{bmatrix} x_k \\ u_k \end{bmatrix} \quad \tilde{A} = \begin{bmatrix} A & B_u \\ 0 & I \end{bmatrix} \quad \tilde{B}_d = \begin{bmatrix} B_d \\ 0 \end{bmatrix} \quad \tilde{B}_u = \begin{bmatrix} B_u \\ I \end{bmatrix}$$

Következő lépésként pedig a teljes horizontra vonatkozó kiegészített állapot és inkrementális bemeneti tagok:

$$\tilde{X}_k = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{k+1} \\ \tilde{x}_{k+2} \\ \vdots \\ \tilde{x}_{k+N_p} \end{bmatrix} \quad \Delta U_k = \begin{bmatrix} \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \\ \vdots \\ \Delta u_{k+N_p} \end{bmatrix}$$

A kimeneti jel vektora a kiegészített felépítésű állapotokból írhat fel (23).

$$Y_k = \hat{\tilde{C}} \cdot \tilde{X}_k \quad (23)$$

Ahol $\hat{\tilde{C}}$ a teljes predikciós időszakra vonatkozik és $\tilde{C} = [C \ 0]$ vektorból képezhető.

A predikciós állapot vektorra vonatkozó képlet is módosul a kiegészítésnek köszönhetően (24).

$$\tilde{X}_k = \tilde{M} \cdot \tilde{x}_k + \tilde{G}_u \cdot \Delta U_k + \tilde{G}_d \cdot D_k \quad (24)$$

A hullámos tagok felépítése megegyezik a korábbiakban felírt tagokéval, mindössze a konstans együttható mátrixok szintén a hullámos tagra módosulnak bennük.

Immáron a célfüggvényben kiejthető az Y kimeneti vektor tag, ezáltal a számunkra ismert kiindulási értékekből és zavarásokból áll az egyenlet, valamint az inkrementális input növekedési jelsorozatból, mellyel optimalizálni kívánjuk a rendszer viselkedését a predikciós horizonton.

4.3. Kvadratikus megoldó alkalmazása

Az épületről felépített lineáris rendszer négyzetes alakban felírt célfüggvényére egy megfelelő kvadratikus megoldó szükséges. A Matlab-ban található *quadprog* [23] beépített algoritmus megfelelő a négyzetes problémák kezelésére a (25) alakban minimalizálja a költségfüggvényt.

$$\min_{\Delta U} \frac{1}{2} \Delta U^T \cdot H \cdot \Delta U + f^T \cdot \Delta U \quad (25)$$

Az előző részben kifejtett összefüggések alkalmazásával előállítható a négyzetes inkrementális bemeneti tag H mátrixa, valamint a lineáris tagokra vonatkozó f vektor. Ennek végeredményét mutatják a (26)-(27) képletek.

$$H = \tilde{G}_u^T \cdot \hat{\tilde{C}}^T \cdot \hat{Q} \cdot \hat{\tilde{C}} \cdot \tilde{G}_u + \hat{R} \quad (26)$$

$$f = \tilde{G}_u^T \cdot \hat{\tilde{C}}^T \cdot \hat{Q} \cdot \left[\hat{\tilde{C}} \cdot (\tilde{M} \cdot \tilde{x}_k + \tilde{G}_d \cdot D_k) - Y_{ref} \right] \quad (27)$$

A Matlab programban a következő alakban kell meghívni a megoldó algoritmust:

$$\Delta U_{optim} = quadprog(H, f, A, b, A_{eq}, b_{eq}, lb, ub, x0, options)$$

Az első két tagot már előállítottuk, emellett definiálható egyenlőségi és egyenlőtlenségi kényszerek, valamint alsó- és felső határ az optimalizálási paraméterre, vagyis ΔU -ra. A probléma megoldása során az elektromos padlófűtés alsó és felső teljesítmény határát kell korlátozni nulla, vagyis kikapcsolt állapot és egy maximális hőleadási értékre, melyet a valós házban található hőszivattyú teljesítménykapacitása szerint határoztam meg 15 kW-ban. Az lb és ub tagokban csak az inkrementális növekedésre írható elő egy működési tartomány, ennek következtében az A és b egyenlőtlenségi mátrix és vektor definiálásával lehetséges a hőleadásra kényszerítést bevenni közvetett módon (28).

$$A \cdot \Delta U \leq b \quad (28)$$

A kényszer minden időlépésre előír az inkrementális bemeneti jelnek egy határt, amivel az előre meghatározott minimum és maximum hőleadási értéken belül marad a hőleadás mértéke. Ehhez csak a predikciós horizont kiindulás (k időpillanat) fűtési teljesítményértékének ismerete szükséges, onnantól felépíthető a teljes időszakra a ΔU függvényében. Példaként ismertetem egy 2 lépéses időhorizontra a kényszerek elemeinek felépítését a (29),(30) összefüggésekkel.

$$u_{min} \leq u_{k+2} = u_k + \Delta u_{k+1} + \Delta u_{k+2} \leq u_{max} \quad (29)$$

$$u_{min} - u_k \leq \Delta u_{k+1} + \Delta u_{k+2} \leq u_{max} - u_k \quad (30)$$

Mátrix alakban felírva:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 1 & 1 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta u_{k+1} \\ \Delta u_{k+2} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} u_{\max} - u_k \\ u_{\min} - u_k \\ u_{\max} - u_k \\ u_{\min} - u_k \end{bmatrix} \quad (31)$$

A teljes predikciós horizontra a bemutatotthoz analóg módon épül fel az egyenlőtlenségi kényszer, az N_p predikciós lépések számának megfelelő nagyságú méretben.

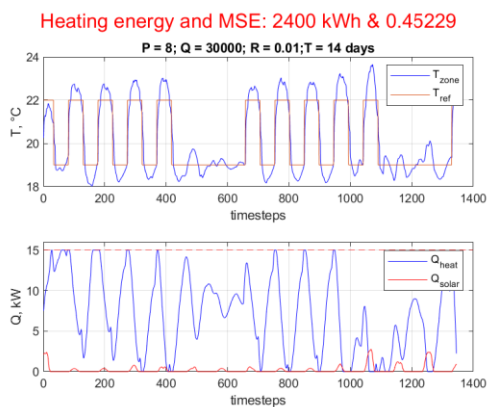
Az algoritmus *options* elemében lehetséges a megoldó megválasztása, valamint a konvergencia kritériumok megadása. A feladathoz az *interior-point-convex* algoritmust választottam, mely kifejezetten konvex kvadratikus programozási problémák (QP) megoldására terveztek. Iteratív módon optimalizálja a célfüggvényt, miközben egy sor feltételt is figyelembe vesz. Megfelelően felépített mátrixok esetében garantálja a globális optimum megtalálását, emellett rendkívül jól működik nagy méretű, sűrű QP problémákra alkalmazva, ahol a változók és a kényszerek száma is nagy. Esetünkben 12-24 órás predikciós időszakok is előfordulnak, melyek százas nagyságrendű mátrixokat igényelnek, tehát fontos a robosztus és relatív gyors megoldó választása [24].

4.4. Predikciós horizont és súlytagok megválasztása

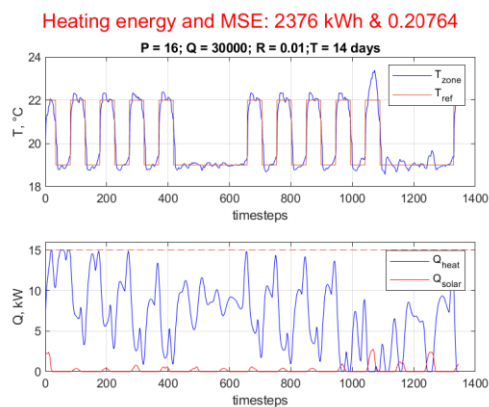
A predikciós modell és az optimalizálandó bemeneti vektor készen áll a kontrollerben, ezen kívül meg kell határozni az ideális predikciós időszakot, mely kellően hosszú a jövőbeli környezeti és belső körülmények figyelembevételére, és emellett a számítási igénye sem túlságosan nagy mértékű. Megvizsgálom emellett a Q és R súlytagok megfelelő arányát, mely kifejezi a referenciakövetés pontosságát, valamint a bemeneti tag változtathatóságának mértékét.

A vizsgálati szimulációs sorozatot Matlab programban végeztem el egy 14 napos időszakra. Ekkor a korábbiakban bemutatott predikciós optimalizálás minden egyes időlépésben megtörténik, ahol az optimális bemeneti jelsorozat első tagját, vagyis az első inkrementális növekedés tagot a padlófűtés teljesítményében, hozzáadom az előző időlépés bemeneti értékéhez. A predikciós és a "valós" modell vizsgálat során megegyezik. Az előírt referenciahőmérséklet hétköznapiakon 7-19 óráig 22 °C-ot, míg az esti órákban és hétvégén 19 °C-ot ír elő. Az elektromos energiafogyasztás mennyiségét a szimulációs időre összesítve kWh-ban mértem, a referenciakövetés pontosságát pedig a korábban alkalmazott MSE négyzetes eltérés mutató alapján értékeltem.

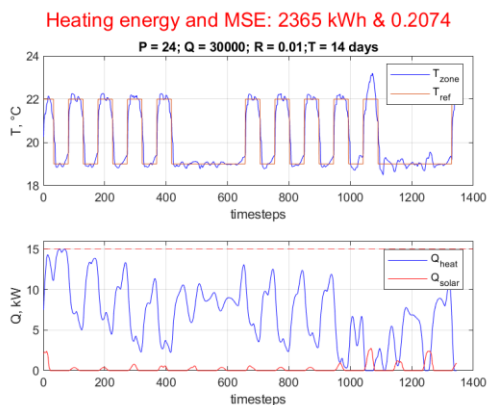
A 17. ábrán az N_p predikciós időlépések számának hatását mutatom be, rögzített Q és R értékek mellett (a mintavételezési idő 15 perc).



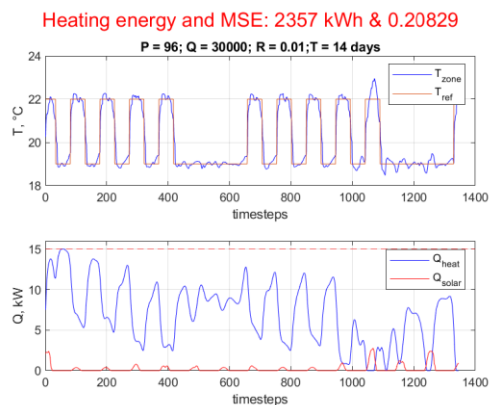
a)



b)



c)

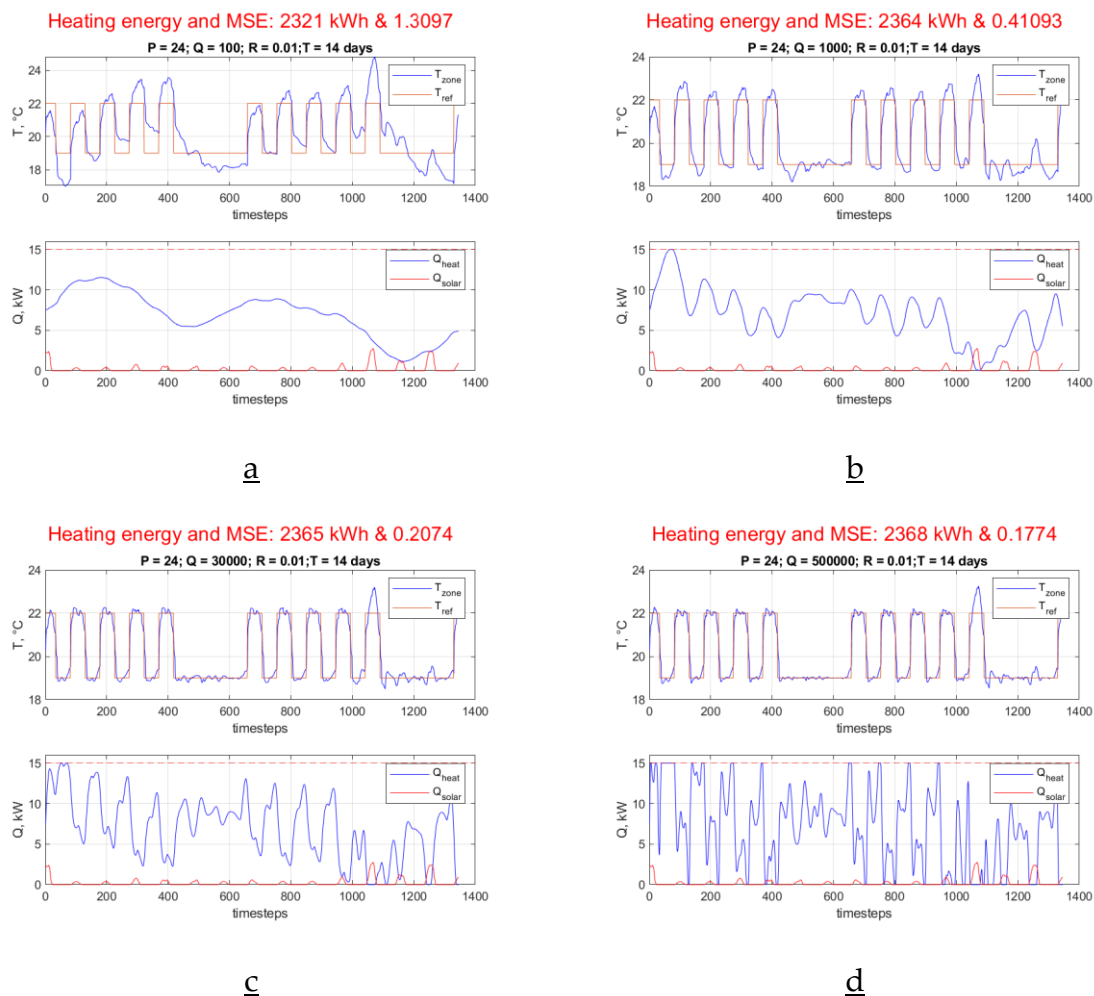


d)

17. ábra: Predikciós horizont értékének hatása Matlab programban

Az ábrák felső részén a referencia- és a szobahőmérséklet alakulása látható, az alsó részén pedig a rendszerrel közölt fűtési energiát, valamint a szoláris nyereségeket ábrázoltam. Az $N_p = 8$, vagyis kétórás előrejelzéssel működő kontrollor szemmel láthatóan nem képes sem a felső, sem az alsó referenciaérték tartására. A b) ábrán már 4 órás előrejelzést alkalmaztam, ekkor lényegesen pontosabb szabályozás valósul meg, amely Az MSE értékben is megmutatkozik. Emellett az energiafogyasztási mennyiség is kedvezőbben alakult. Az alsó ábrákon 6 és 24 órás predikciót alkalmazó szabályozás eredményei láthatók. A hosszabb előrejelzés elsődleges hatása a teljesítménycsúcsok csökkentése, hasonló pontosságú referenciakövetés mellett. Megállapítható tehát, hogy a 4 órás előrejelzés már elegendő a szabályozó számára, hogy kellő pontossággal tudjon reagálni a zavarások által keltett változásokra, ezáltal magas minőségű referenciakövetést megvalósítva. A predikciós horizont növelése a számító algoritmus robusztuságának köszönhetően nem jár lényeges számítási idő növekedéssel, és csökkenthető a teljesítménycsúcsok nagyságának mértéke.

A súlytagok megfelelő arányának vizsgálata hasonló módon történt, mint az előzőekben bemutatott predikciós időszak esetében. A 18. ábrán rögzített N_p és R értékek mellett figyelhető meg a Q súlyozási mátrix különböző értékeinek hatása az MPC kontrollerben:



18. ábra: Súlytagok arányának hatása Matlab programban

Az R érték 0,01-on való tartása mellett látható az egyre növekvő értékű Q melletti szabályozás eredménye. A nagy nagyságrendbeli eltérés a célfüggvényben szereplő tagok közötti eltérés miatt adódik. Amíg a referenciakövetés tized nagyságrendű hibával dolgozik, addig a fűtési hőleadás százás és ezres nagyságrendű inkrementális lépéseket alkalmaz. Az a) ábrán feltűnően nagyobb hangsúlyt kap a kontroller leszállóváza, ami egy rendkívül pontatlan hőmérséklet lefutást eredményez. A következő három ábrán növelve a Q értékét, egyre pontosabb a hőmérséklet kívánt értéken tartása, amely az MSE mutató csökkenésében is megmutatkozik. Ez természetesen a mérleg másik oldalán magasabb és sűrűbb energiacsúcsokat jelent, ami valós hőforrás teljesítmény ingadozását igényli, mellyel szintén számolni kell. A vizsgálatról készült táblázatok a mellékletben találhatók, melyben az értékelési mutatók szerepelnek az összes vizsgálati paraméter kombinációra vonatkoztatva.

4.5. *Fmincon* függvény korlátai az optimalizáláskor

A kvadratikus probléma felírását megelőzően próbát tettem az MPC megvalósítására az identifikáció során is alkalmazott *fmincon* algoritmus alkalmazásával Matlab programban. A megoldó meghívásának menetét részleteztem a 3.4.2 fejezetben. Alkalmazása során egy megválasztott előrejelzési horizontra prediktálható a rendszer viselkedése, ezáltal optimalizálható a bemeneti jelsorozat optimális szekvenciája.

Az algoritmus legnagyobb hiányossága, hogy nem ismert számára a rendszer dinamikája. Míg a kvadratikus megoldó esetében a teljes rendszert leíró együttható mátrixok alapján kell a megfelelő formát megadni, addig az *fmincon* csupán egy külső függvényt hív meg és annak a számított értékét igyekszik minimalizálni a bemeneti vektor módosításával. Ily módon a megoldó számára az egész rendszer egy fekete doboznak tekinthető, melynek értéke a referenciakövetés négyzetes hibája.

Emellett rendkívül lassan kezeli a nagy paraméter sereget, ami egy hosszabb predikciós horizont esetében nagy hátrányt jelent. A gyorsabb számítás érdekében csökkenteni lehet az optimalizálási paraméterek számát adott horizonton, például négy időlépés összevonásával, azonban ennek a hatása megjelenik a pontatlan referenciakövetésben.

A kvadratikus algoritmus behangolása során tapasztalati úton meghatároztuk a szabályozás szempontjából kedvező súlytagok beállítását. Jelen megoldó tárgyalásakor ez nem mondható el, hiszen a teljes optimalizálást a belső algoritmus végzi, annak csak a megoldóját lehetséges megválasztani, valamint a konvergencia kritériumokat megszabni.

Összességében tehát megállapítható, hogy az *fmincon* nem alkalmas egy épület MPC szabályozás tervezésére az említett okoknak köszönhetően. Az identifikációs folyamatra, amikor egy kezdeti becsült paraméter sorozat hangolása volt szükséges, arra kiváló megoldás ennek a megoldónak az alkalmazása.

5. TÁRSSZIMULÁCIÓ

A Matlab programban létrehozott MPC kontrollert a behangolását követően készen áll az EnergyPlus szimulációs környezetben való integrációra. Programozás alapú, külső szabályozó megvalósítása az EnergyPlus számító szoftverben nem egy triviális feladat, ugyanis a beépített lehetőségek által igencsak limitált eszközök állnak rendelkezésre, fejlettebb kontrollerek tesztelése ily módon nem kivitelezhető. A fejezetben bemutatom a társszimuláció megvalósításához alkalmazott felületet, mellyel a szimuláció során a modellalapú kontrollert alkalmazható és tesztelhető. A vizsgálat a fűtési időszakra terjed ki és az épületben található elektromos padlófűtést szabályozom. Az MPC hatékonyságát különböző scenáriókon keresztül mutatom be a korábban is alkalmazott mérőszámok alapján. Kiértékelésként a Design Builder beépített szabályozójával hasonlítom össze, melynek működési elvét szintén részletezem.

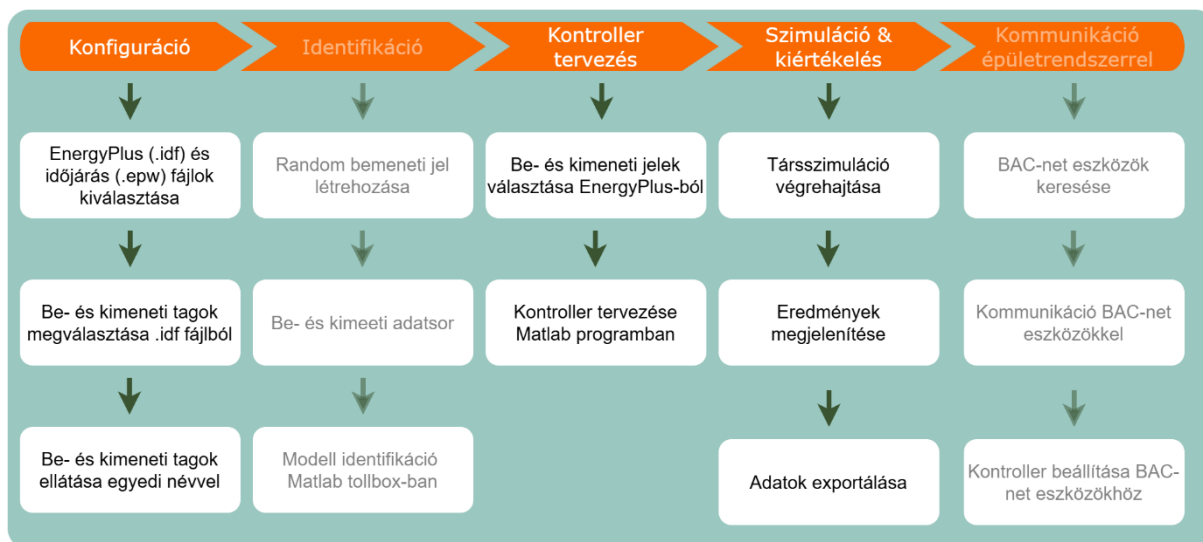
5.1. *EnergyPlus & Matlab*

A feladat során rendelkezésre álló programok meghatározták egy olyan eszköz utáni kutatást, ami kihasználja az EnergyPlus nagy precizitású épületszimulációs lehetőségeit és a Matlab által kínált fejlett kontrollert tervezési adottságokat. Az elérhető opciók száma erre a feladatra alacsonynak mondható, a legtöbb megoldás pedig segédprogramokat is alkalmaz az összekötésre. A választásom az MLE+ társszimulációt megvalósító eszközre esett, melyet a pennsylvaniai egyetemen fejlesztettek 2012-ben, emellett további frissítések és dokumentációk érkeztek 2016-ig a GitHub felületükre [25]. A program kifejezetten épületenergetikai és HVAC rendszerek optimalizálására és szabályozására irányuló kutatások célját segíti elő. A platform által megvalósítható, hogy a szoftverek szimulációi szinkronban fussanak, így a valósághű viselkedés és a dinamikus szabályozás kombinálható.

A program által támogatott Matlab, valamint EnergyPlus verziókról hiányos az elérhető dokumentáció [26], ezért a konfigurációs munka 1 héten keresztül tartott. A Matlab 2014-től megújult grafikus felhasználói felülettel (GUI) rendelkezik, mely nem kompatibilis az MLE+ által alkalmazott Simulink blokként előhívott kezelő pannellel. Ennek következtében a Matlab 2013b verzió telepítésére volt szükség, a megfelelő toolbox-ok csatolásával. Az EnergyPlus aktuálisan legújabb verziójához képest (24.2.0) a tizeneggyel korábbi (9.1.0) bizonyult megfelelőnek a feladat megoldására. Az MLE+ program grafikus felülete tehát jelen munka készítésekor elavultnak mondható, azonban az új Matlab felületre való áttérés nem jelentene nagymértékű befektetett munkát a készítőknél, mindössze az erre vonatkozó kódokat szükséges módosítani.

Ezáltal egy modernebb eszközt lehetne alkotni, amely jelenlegi formájában is rendkívül praktikus és hasznos program az épületgépészeti és szabályozástechnikai területeken.

A programban elvégezhető lépéseket a 19. ábra szemlélteti:



19. ábra: MLE+ kezelőfelület

Az első oldalon a vizsgálati konfiguráció adható meg, itt kell a DesignBuilder programból exportált idf, valamint az időjárás fájlokat meghívni. A program modell identifikációs feladat elvégzésére is alkalmas betáplált adatok alapján, azonban ezt nem alkalmaztam. A kontroll tervezési felületen lehetséges az idf fájlban található azon ki- és bemeneti jellemzők kiválasztása, melyekre szükségünk van a vizsgálat során, valamint ezek egyéni névvel elláthatók. A modell idf fájljában manuálisan vihető be a külsőleg manipulálni kívánt bemeneti jellemző, mely jelen esetben a fűtési alapjel aktuátora, amivel közvetett módon lehetséges az elektromos padlófűtés által bevitt hőteljesítmény megadása.

Ez tehát kiválasztható a kontroller számára az MLE+ felületén, amennyiben megtalálható az épület modellt tartalmazó idf fájlban is. Szintén itt található a szabályozást elvégző Matlab fájl meghívásának a lehetősége. Negyedik lépésként már az előző oldalakon megfelelően előkészített szimuláció indítható és az eredmények megjeleníthetők, exportálhatók. Az utolsó kezelőoldal valós épület vezérlőivel való kapcsolatteremtésre ad lehetőséget, ezt tehát nem alkalmaztam.

A szimuláció során az EnergyPlus és Matlab közötti interakció minden mintavételezési időben, vagyis 15 percenként megtörténik. Ekkor az EnergyPlus számítás megáll és az aktuális értékeit, melyek a kontroller számára relevánsak, megkapja az inicializált Matlab függvény. Ezek jelentik a korábbi fejezetekben bemutatott predikciós optimalizálás kiindulási értékeit,

vagyis az egyszerűsített modell állapotainak kezdeti értékeit. Innen az MPC algoritmus, az ismert zavarások figyelembevételével kiszámítja a predikciós horizontra az optimális bemeneti jelsorozatot. A sorozat első eleméből képezhető az EnergyPlus számára küldött bemeneti jel, amely alapján folytatódik a szimuláció a következő mintavételezési időpillanatig. A számított fűtési teljesítményleadás az előző lépés hőleadásából és az optimalizálás szerint meghatározott inkrementális növekedés összegéből adódik.

Az MPC által számított szükséges fűtési hőmennyiség közvetlenül nem, hanem a fűtési hőmérséklet alapjel bevitelével közvetett módon adható meg, mely az aktuális szobahőmérséklet-hez képest határozza meg a fűtés mértékét az EnergyPlus szimulációban. A kettő közötti lineáris összefüggés az elektromos sugárzó felületű objektum dokumentációjában található [27]. Eszerint szükséges egy olyan Δt hőmérsékleti tartomány definiálása, amelyben a padlófűtési rendszer a hőbevitelt változtatja nulla és a maximális teljesítmény között, mégpedig a fűtési hőmérséklet alapjel módosításával az aktuális szobahőmérséklethez igazítva, a definiált tartományon belül. Például egy 20°C fűtési alapjel és $\Delta t = 2^\circ\text{C}$ esetében, ha a tartózkodási zóna hőmérséklete 19°C vagy annál hűvösebb, akkor maximális a fűtési teljesítmény, 21°C és annál melegebb hőmérsékletnél pedig kikapcsol a fűtés. A két fokos tartományban, $19\text{--}21^\circ\text{C}$ -ig pedig lineárisan változik a bevitt hőmennyiség, ebből kifolyólag alapjellel megegyező hőmérsékleten pedig a maximális fele lesz a hőteljesítmény. Ezek alapján felírható a fűtési alapjel (T_{set}) (32) összefüggése az aktuális szobahőmérséklet (T_{act}), a Δt és az MPC által meghatározott, a rendszerbe bevinni kívánt hőmennyiség (Q_{heat}) alapján:

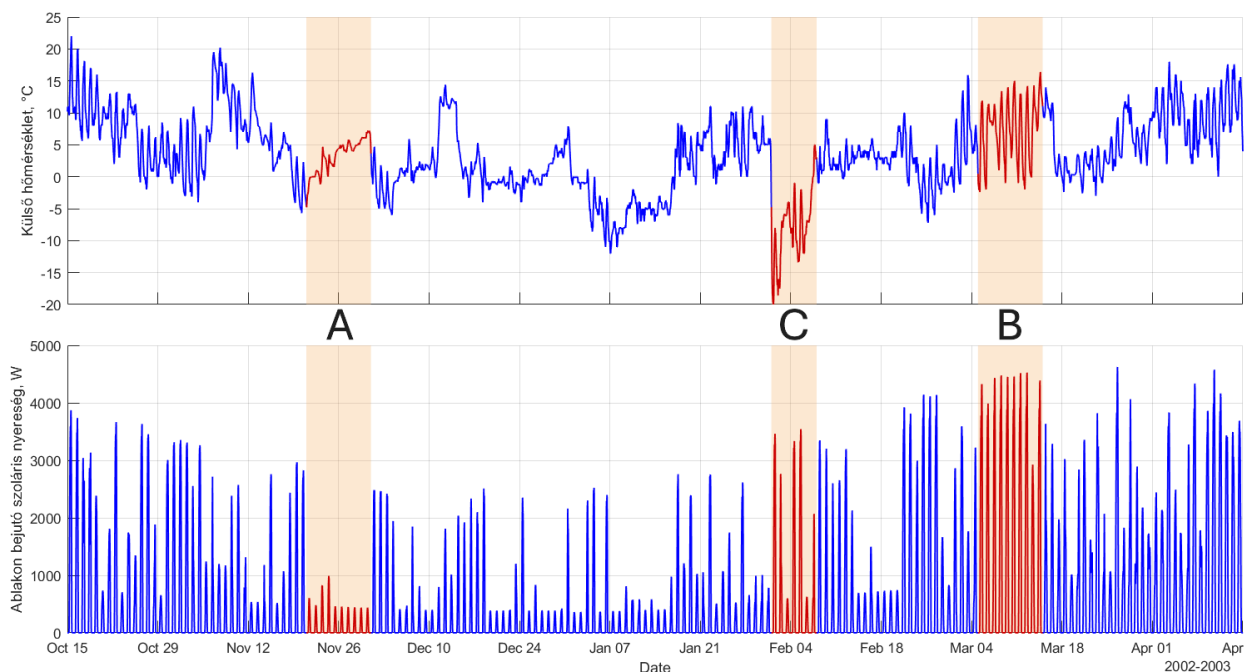
$$T_{set} = \left(\frac{Q_{heat}}{Q_{max}} - 1 \right) \cdot \Delta t + T_{act} + \frac{\Delta t}{2} \quad (32)$$

Az előírt referenciahőmérséklet alapján tehát az MPC meghatározza a megfelelő hőleadási mennyiséget a következő szimulációs lépésre, melyet a fenti összefüggéssel lehetséges az EnergyPlus programban implementálni.

A EnergyPlus beépített szabályozója a definiált referenciahőmérsékletet adja meg fűtési hőmérséklet alapjelként, melyből az aktuális szobahőmérséklet alapján, szintén az (32) képlet felhasználásával kifejezhető a padlófűtés hőleadása. Ezzel a stratégiával hasonlítom össze az MPC működését a továbbiakban.

5.2. Társszimulációs vizsgálat és eredmények

A következőkben az MLE+ felületen megvalósított társszimuláción keresztül mutatom be az MPC működését az épület fűtési szabályozásában. A vizsgálat a fűtési szezon 3 különböző időjárási jellemző alapján megkülönböztetett időszakára terjed ki, melyet az 20. ábrán feltüntetett külső hőmérséklet és az épület ablakain bejutó szoláris nyereség alapján határoztam meg. A három időszakot A, B és C betűvel láttam el és megkülönböztetett színnel emeltem ki a diagramon.



20. ábra: Vizsgálati időszakok megválasztása

- Az „A”-val jelzett 10 napos periódus november 21-30-ig tart és egy felhősebb időszakot fed le, mivel a szoláris nyereség az alsó diagramon jó láthatóan minimális értékű. A külső hőmérséklet ekkor átlagosnak mondható.
- A „B” jelű 10 nap az előzővel ellentétben rendkívül napos időszakot jellemez, hiszen a szoláris nyereség ekkor az egész fűtési időszakból kiemelkedő mértékű. Ez a vizsgálati idő március 5-14-ig tart.
- A „C” feliratú sávban megfigyelhető egy extrém hideg külső hőmérsékleti alakulás, mely február 1-7-ig áll fenn, erre is vizsgálom az MPC működését.

Mindhárom vizsgálat során hétköznap 7-19 óráig 22 °C, az esti órákban és hétvégén pedig 19 °C-os zónahőmérsékletet írtam elő referenciaként. Mivel a zavarási adatsor, vagyis az időjárási és az épületen belüli menetredek alapján létrehozott hatások megegyeznek az identifikációs adatsorral, ezért ebben a fejezetben ezt nem részletezem. Az MPC számára ezek a za-

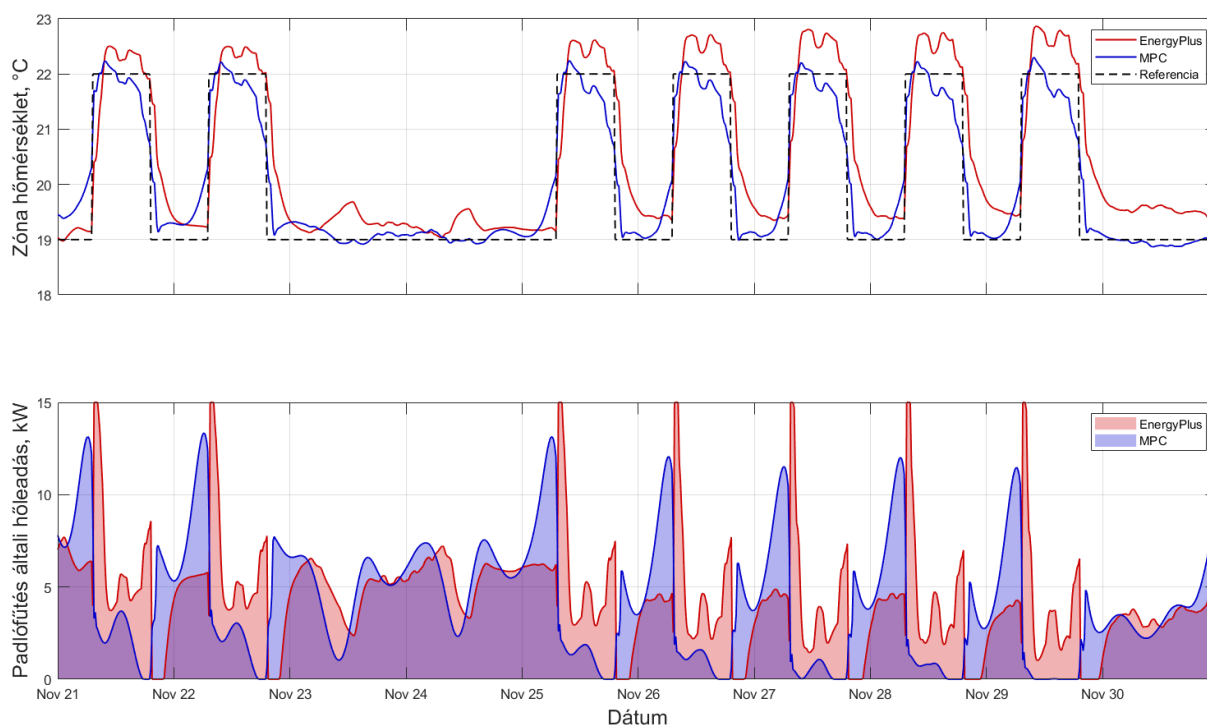
varási értékek rendelkezésre állnak a szabályozás folyamán. Mivel az egyszerűsített modellben alkalmazott állapotok és bemeneti értékek, vagyis a zavarások és a kontrollált jellemző száma kicsi, ezért az MPC által használt zavarási adatok nem fedik le az EnergyPlus modellt érő hatásokat, hiszen csak a legjelentősebbeket vettem figyelembe a predikciós modell felépítése során. Az MPC predikciós horizontja 48 lépés, vagyis 12 óras előrejelzést biztosít a vizsgálat alatt. A súlytagok értékei: $Q = 5 \cdot 10^4$ és $R = 0.01$. Egy 10 napos társszimuláció futtatási ideje kevesebb, mint egy perc, így számítási kapacitási probléma adódott.

A kiértékelést az energiafelhasználás, a referenciaértéktől való átlagos négyzetes eltérés (MSE), valamint az irodaépületre előírt komfort határokat átlépő időszakok hossza alapján végzem, összehasonlítva ezzel a két szabályozási stratégiát. Utóbbi természetesen azokra az órákra vonatkozik, amikor emberek is tartózkodnak az épületben, vagyis a 22 °C-os, hétköznapi referencia időszakokra. Az MSZ EN 16798-1:2019 [28] szabvány I. kategóriás irodaépületre 22°C-os kívánt belső hőmérsékletre $\pm 1^\circ\text{C}$ -t enged, ezt veszem figyelembe a kiértékelés alatt is.

„A” vizsgálat:

A novemberi vizsgálat tehát egy felhősebb időszakot fed le. Az MPC kontrollere referencia-hőmérsékletét a 22 °C-hoz képest, tapasztalati úton egy pozitív irányú 0,7 °C-os növekménnyel érdemes megadni, a kívánt hőmérséklet érték elérése érdekében. Ez az „offset” leginkább a nyílt-hurkú szabályozási megoldás miatt adódhat, ami az MPC optimalizálása során történik. Egy zárt-hurkú, állapotvisszacsatolást alkalmazó prediktív szabályozási felépítés jobban képes kezelni ezt a problémát. Ennek vizsgálata tehát a jövőbeli célok közé sorolható.

Az 21. ábrán látható a szimulációs eredmény az MPC és a beépített controllerre vonatkozóan, felül a hőmérséklet referenciakövetést, alul pedig a padlófűtés általi hőleadást feltüntetve.

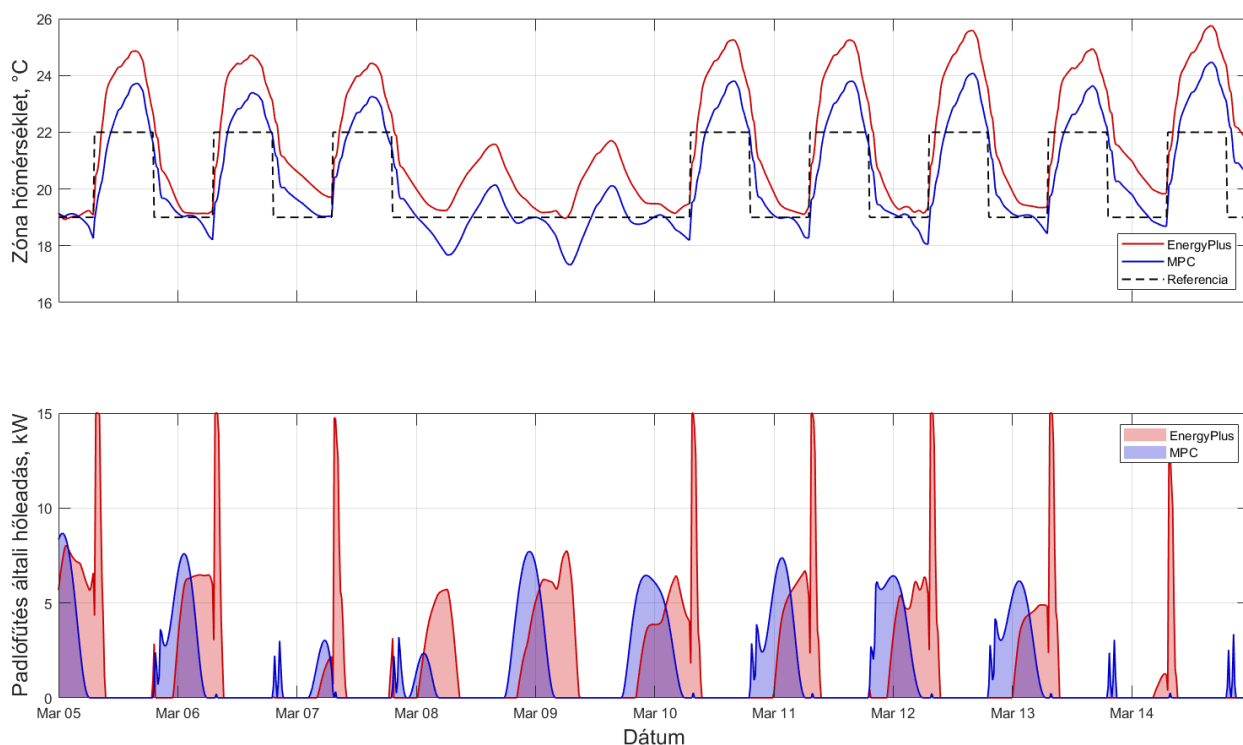


21. ábra: „A” vizsgálati periódus referenciakövetési és energiafogyasztási eredményei

Megfigyelhető, hogy míg a beépített controller a referenciaérték ugrásakor kezd el reagálni a bemeneti jellel, addig az MPC már a fűtés csökkentés időszakában megkezdte a hőbevitel növelését. Ennek következtében egy megfelelően hangolt MPC jelentős mértékben képes a csúcspotyogasztási értékek csökkentésére, a teljes időszak alatt mindössze egyszer éri el a maximális teljesítménykapacitást. Emellett, a predikciónak köszönhetően a modellalapú controller jobban képes az épületbe érkező hőnyereségek hasznosítására, ezáltal könnyebben elkerülhető a túlfűtés, mely extra energiafelhasználással jár. A fűtés csökkentett időszak során az MPC pontosabban képes a 19 °C-on való tartásra is, szemben a beépített szabályozóval, ezzel elősegítve az alacsonyabb energiafelhasználást.

„B” vizsgálat:

A márciusi vizsgálati napokra időjárási szempontból nagy napsugárzás jellemző, ezáltal jelentős mértékű hőnyereség éri az épületet. Ennek szabályozási eredményét mutatja be a két controllerre az 22. ábra:

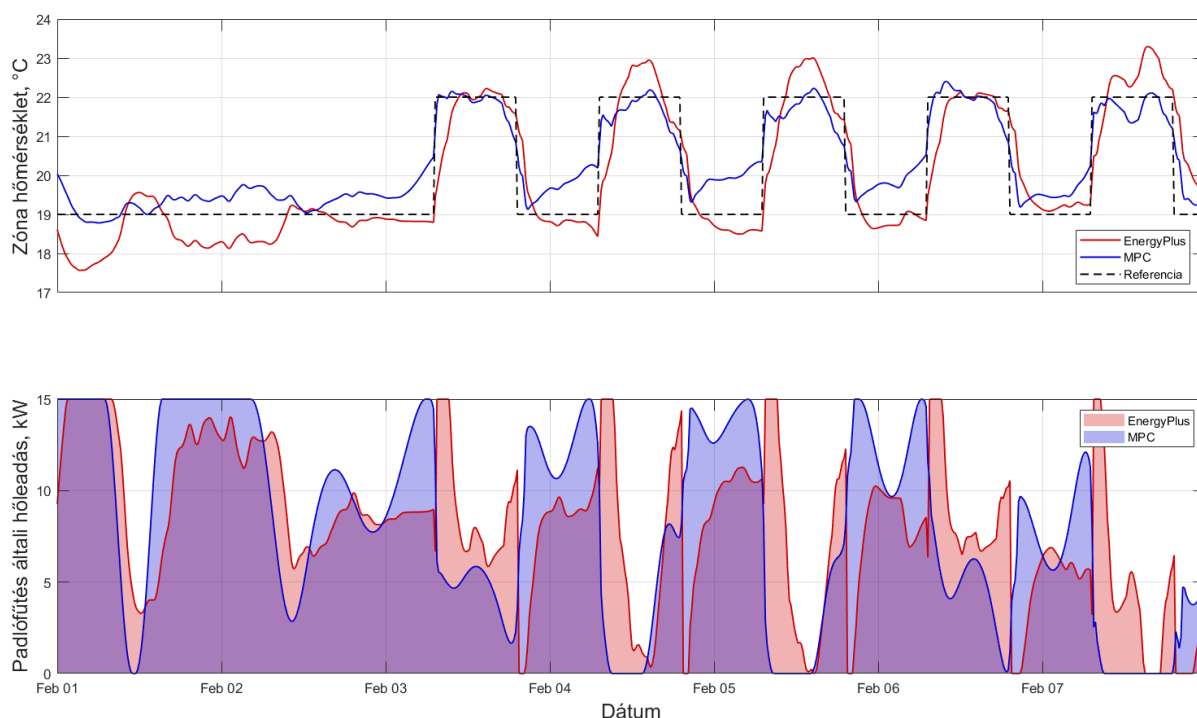


22. ábra: „B” vizsgálati periódus referenciakövetési és energiafogyasztási eredményei

A diagramok szerint ezekben a napokban kevésbé pontos a hőmérséklet szabályozás a nagy amplitúdójú oszcillációnak köszönhetően a szoláris nyereség zavarási értékben. Legjobban szembetűnő különbség a két fűtési karakterisztika között ismét a csúcsfogyasztási értékekben mutatkozik, ugyanis az MPC maximális hőleadása az időszak során csak a fele a beépített szabályozóénak, amely mindegyik hétköznap eléri a rendszer maximális értékét. Emellett az MPC alkalmazásával jobban elkerülhető az épület túlfűtése, az optimalizálásnak köszönhetően a hétköznapi órákban ez körülbelül 1°C-kal kisebb mértékben jelentkezik.

„C” vizsgálat:

Február első hét napjában a külső hőmérséklet tartósan negatív tartományban van, az első napokban -20 °C környékét is eléri. Az ezekre a napokra elvégzett vizsgálatot mutatja be a 23. ábra, az előzőkhez hasonló felépítésben.



23. ábra: „C” vizsgálati periódus referenciakövetési és energiafogyasztási eredményei

Ekkor jelentős mértékű fűtési energiát alkalmaz mindkét kontrollor, azonban gyakran eltérő időszakokban. Az MPC energiafelhasználása szinte megegyezik a beépített kontrollor által használt energiamennyiséggel, azonban az MPC a hétköznapi órákban pontosabb szabályozást is képes ezáltal megvalósítani, amikor emberek tartózkodnak az épületben és a teljes időszak folyamán pontosabb a referenciakövetés is.

A diagramokon bemutatott eredményeket a 2. táblázat foglalja össze számszerűsített értékekkel, kiegészítve a teljes fűtési szezonra vonatkozó mutatókkal:

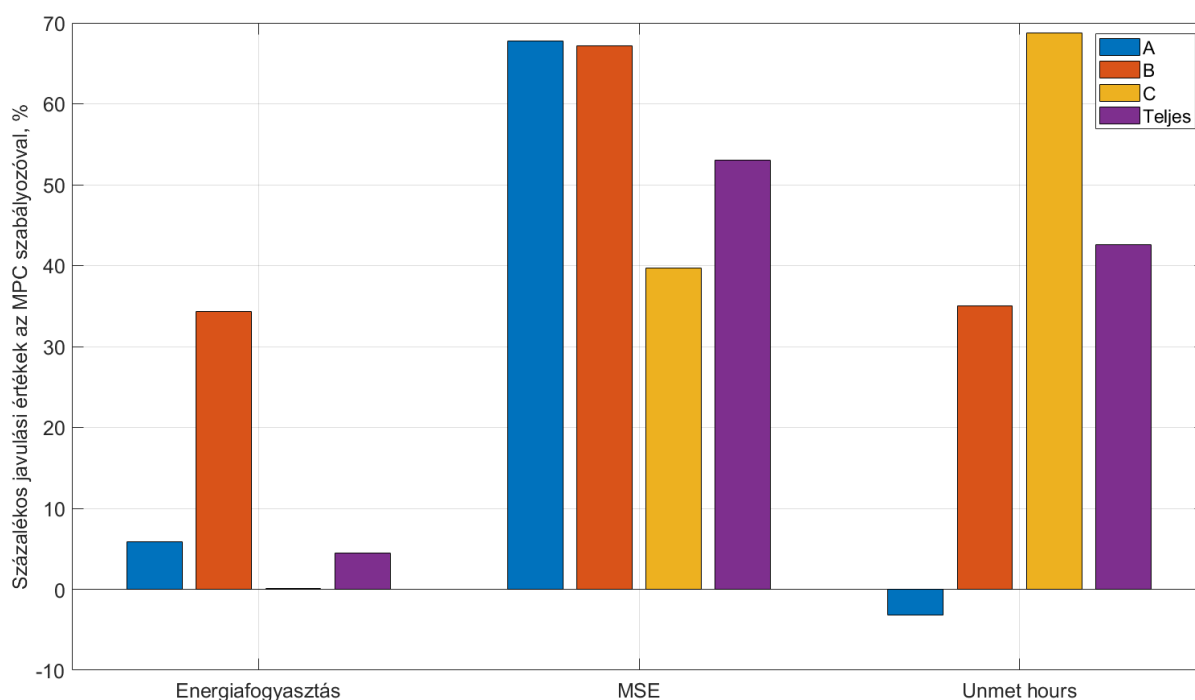
2. táblázat: A scenáriók kiértékelése

Eset	Kontrollor	Energiafelhasználás, kWh	MSE	"Unmet hours", óra	"Unmet hours"/tartózkodási idő, %
A – 10 nap	E+	1075	0.59	7.75	9.2
	MPC	1012	0.19	8	9.5
B – 10 nap	E+	498	3.56	82.75	86.2
	MPC	327	1.17	53.75	56
C – 7 nap	E+	1362	0.63	12	20
	MPC	1361	0.38	3.75	6.25
Teljes	E+	17876	1.338	585	37.5
	MPC	17076	0.629	336	21.5

Eszerint a felhős időszakban jobb referenciakövetés érhető el csökkentett energiafelhasználás mellett az MPC alkalmazásával, a hőkomfort szempontjából kielégítetlen órák száma pedig nagyjából megegyezik a 10 nap folyamán. A legnagyobb mértékű különbség a két stratégia

között a márciusi napokon adódik, intenzív napsütéses időjárási viszonyok mellett, ekkor az energiafogyasztás szinte a kétharmadára, az MSE érték pedig harmadára csökkenthető az MPC szabályozással a beépítetthez képest. Az épületben tartózkodó emberek a 10 nap folyamán 29 órával többet vannak kellemes hőmérsékleti komfort környezetben a szabvány szerint MPC stratégiával, mely az idő 86%-a helyett, az idő 56%-át jelenti a komfort határon kívül. A fűtési időszak leghidegebb hét napja során azonos energiafogyasztási mértékkel pontosabb referenciakövetést és harmadannyi elégedetlen hőmérsékleti komfort órát képes eredményezni az MPC. A teljes fűtési időszak 183 napjára vonatkozó eredmények alapján 4,5%-os energiamegtakarítás adódik MPC szabályozással, mely éves szinten körülbelül 50 ezer Ft megtakarítást jelent az üzemeltető számára. Mindemellett az épületben tartózkodók számára a teljes szezonban az idő 37%-a helyett, mindössze az idő 22%-ában nem teljesíti a hőmérsékletszabályozás a szigorú előírást. A referenciakövetési MSE érték kétszer kedvezőbb a félév folyamán.

Az MPC tehát a teljes szezonban kedvezőbb értékeket hozott, mint a beépített szabályozó. A százalékos javulási értékeket az egyes időszakokra 24. ábra szemlélteti.



24. ábra: MPC általi százalékos javulási értékek a négy időszakra

A néhány napos scenáriók mindegyike kiemelkedő javulást mutat legalább egy kategóriában, míg a teljes szezonra vonatkozó értékek sem kiugró, sem a legalacsonyabb eredményt nem hozzák. További fejlesztési szempont lehet jelen vizsgálati esetekre az MPC beállítási értékeinek változtatása egy adaptív kontrollor formájában, mely adott időjárási körülményhez legmegfelelőbb módon képes alkalmazkodni a fűtési szezon folyamán. Emellett az említett offset-mentes MPC alkalmazásával növelhető a szabályozó pontossága.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Dolgozatomban bemutattam a modell prediktív kontroller (MPC) felépítését és társszimulációs környezetben teszteltem annak működését. Ehhez a valós épület részletes dinamikai modelljét DesignBuilder programban hoztam létre, ahol elektromos padlófűtés által manipulálható a tartózkodási zóna hőmérséklete. Az egyszerűsített modellt fizikai törvények alapján felírt matematikai modellek, állapottér alakba való rendezésével alkottam meg, mely tartalmazza a rendszer állapotait, valamint a rendszert érő zavarások és fűtési hőnyereség tagokat. Az ezek közötti kapcsolatot leíró mátrixok a rendszer paramétereiből épülnek fel, melyek kalibrálása a DesignBuilder szimuláció adatsora alapján történt. Ezáltal egy megfelelően hangolt egyszerűsített modell állt elő, melyet számára ismeretlen környezetben is teszteltem. Ezt követően felépítettem a predikciós modellt, valamint definiáltam az optimalizálás által alkalmazott célfüggvényt, amelyben a referenciakövetési és az inkrementális bemeneti jel értékeit súlyoztam a feladat céljának megfelelően, továbbá kényszereket adtam meg a bemenőjel alsó és felső határára.

A Matlab programban megfelelően beállított modellalapú kontroller tesztelését EnergyPlus környezetben valósítottam meg, összevetve a szimulációs program beépített szabályozójával. Az MLE+ által elvégzett társszimulációs vizsgálat három különböző időjárási tulajdonságú időszakra terjedt ki, valamint a teljes fűtési szezonra is értékeltem. Utóbbi esetén 4,5 %-kal csökkenthető a fűtés általi energiafogyasztás, emellett 50 %-kal pontosabb referenciakövetés érhető el az MPC szabályozással. A vizsgálat során megállapítottam, hogy az MPC alkalmazásával jelentős mértékű fogyasztási csúcslevágások érhetők el.

A továbbiakban megvizsgálom az offset-mentes MPC kialakításának, valamint az adaptív kontroller lehetőségeit, melyekkel további javulás érhető el a fogyasztási és komfort mutatókban. Ezt követően a hőszivattyú által ellátott vizes padlófűtés integrációja következik, mely nemlineáris modellezési eljárást igényel. Az MPC hatékony eszköz a komplex problémák megoldására, így a vizsgált rendszert napelemekkel és energiatárolóval kiegészítve számos lehetőség nyílik a rendszer bővítésére, mely részeit optimálisan képes összehangolni egy prediktív kontroller. Ennek vizsgálata egy doktori kutatási téma alapját is adhatja, mely kiterjeszthető energiaközösségek megfelelő üzemeltetésére is, ezzel aktív megoldást vizsgálva a terhelésszillesztési problémákra.

7. IRODALOMJEGYZÉK

- [1] *AZ EURÓPAI PARLAMENT ÉS A TANÁCS (EU) 2024/1275 IRÁNYELVE.* 2024.
- [2] Drgoňa, J., et al., *All you need to know about model predictive control for buildings.* Annual Reviews in Control, 2020. **50**: p. 190-232.
- [3] Cataldo, A., *Model predictive control in manufacturing plants.* 2016.
- [4] Afram, A. and F. Janabi-Sharifi, *Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC).* Building and Environment, 2014. **72**: p. 343-355.
- [5] Ltd, D.S. *Radiant Surface - Electric.* 2024; Available from: <https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/Content/RadiantSurfaceElectric.htm>.
- [6] Csoknyai Tamás, S.Z., Nagy Balázs, Horváth Miklós, András-Tövissi Balázs, Barna Edit, Goda Róbert, Osztoluczky Miklós, Severnyák Krisztina, Szagri Dóra, Szánthó Zoltán, Zöld András, *Alkalmazott épületenergetika.* 2024. 549.
- [7] Behrooz, F., et al. *Review of Control Techniques for HVAC Systems—Nonlinearity Approaches Based on Fuzzy Cognitive Maps.* Energies, 2018. **11**, DOI: 10.3390/en11030495.
- [8] Gholamzadehmir, M., et al., *Adaptive-predictive control strategy for HVAC systems in smart buildings – A review.* Sustainable Cities and Society, 2020. **63**: p. 102480.
- [9] Serale, G., et al. *Model Predictive Control (MPC) for Enhancing Building and HVAC System Energy Efficiency: Problem Formulation, Applications and Opportunities.* Energies, 2018. **11**, DOI: 10.3390/en11030631.
- [10] Fanger, P.O., *Assessment of mans thermal comfort in practice.* British Journal of Industrial Medicine, 1973. **30**(4): p. 313.
- [11] Verrax, P., *Model Predictive Control Applied to Ground Source Heat Pumps, in TRITA-EECS-EX.* 2018. p. 49.
- [12] Vogler-Finck, P.J.C., R. Wisniewski, and P. Popovski, *Reducing the carbon footprint of house heating through model predictive control – A simulation study in Danish conditions.* Sustainable Cities and Society, 2018. **42**: p. 558-573.
- [13] Vandermeulen, A., et al., *Flexibility offered by residential floor heating in a smart grid context: the role of heat pumps and renewable energy sources in optimization towards different objectives.* 2017.
- [14] Cupeiro Figueroa, I., D. Picard, and L. Helsen, *Short-term modeling of hybrid geothermal systems for Model Predictive Control.* Energy and Buildings, 2020. **215**: p. 109884.

- [15] Killian, M. and M. Kozek, *Ten questions concerning model predictive control for energy efficient buildings*. Building and Environment, 2016. **105**: p. 403-412.
- [16] Miletić, M., A. Schirrer, and M. Kozek. *Load management in smart grids with utilization of load-shifting potential in building climate control*. in *2015 International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST)*. 2015.
- [17] Zong, Y., et al., *Model Predictive Control for Smart Buildings to Provide the Demand Side Flexibility in the Multi-Carrier Energy Context: Current Status, Pros and Cons, Feasibility and Barriers*. Energy Procedia, 2019. **158**: p. 3026-3031.
- [18] Li, X. and J. Wen, *Review of building energy modeling for control and operation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **37**: p. 517-537.
- [19] Borja-Conde, J.A., et al., *Thermal modeling of existing buildings in high-fidelity simulators: A novel, practical methodology*. Energy and Buildings, 2023. **292**: p. 113127.
- [20] Bacher, P. and H. Madsen, *Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings*. Energy and Buildings, 2011. **43**(7): p. 1511-1522.
- [21] Behl, D.M. *Principles of Modeling for Cyber-Physical Systems* 2020 2020/06/27 [cited 2024.11.10]; Available from: https://linklab-uva.github.io/modeling_cps/schedule.html.
- [22] MathWorks. *fmincon - Constrained Nonlinear Optimization*. 2024 2024/11/10; Available from: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/fmincon.html>.
- [23] MathWorks. *quadprog: Quadratic Programming Solver*. 2024 2024/11/10; Available from: <https://www.mathworks.com/help/optim/ug/quadprog.html>.
- [24] MathWorks. *Solve Custom MPC Quadratic Programming Problem and Generate Code*. 2024 2024/11/10; Available from: <https://www.mathworks.com/help/mpc/ug/solve-custom-mpc-quadratic-programming-problem-and-generate-code.html>.
- [25] Bernal, W. *mlep: MATLAB-EnergyPlus Co-Simulation Toolbox*. 2024 2024/11/10; Available from: <https://github.com/willybernal/mlep>.
- [26] Bernal, W., et al., *MLE+: A tool for integrated design and deployment of energy efficient building controls*. 2012. 123-130.
- [27] DesignBuilder, S., *Radiant Surface Electric Heating*. 2024.
- [28] MSZ CR EN 16798-1:2019. 2019, Budapest: Magyar Szabványügyi Testület.

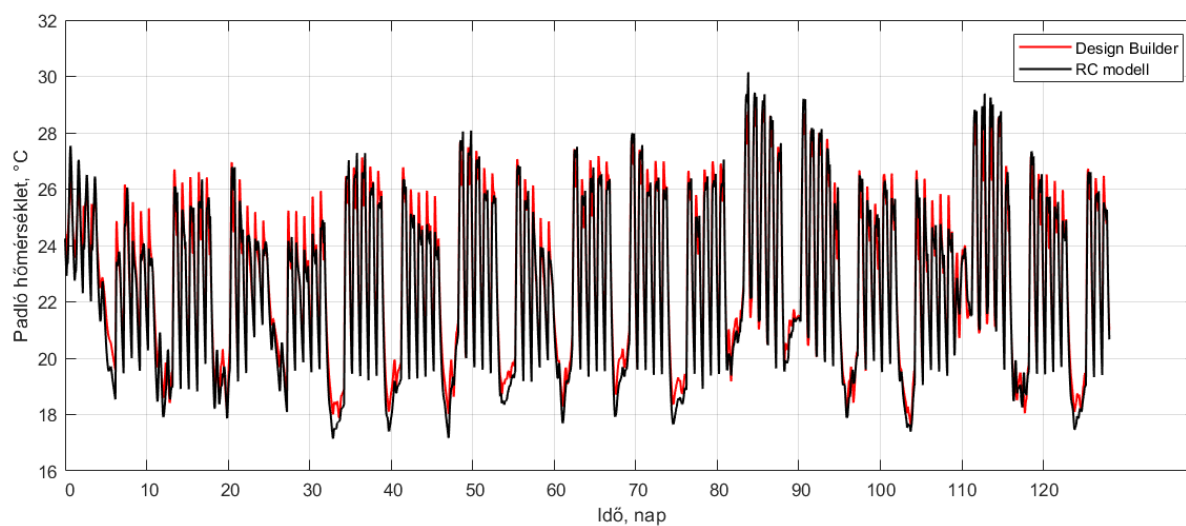
MELLÉKLETEK

- Kezdeti és hangolt paraméter értékek táblázatos összefoglalója:

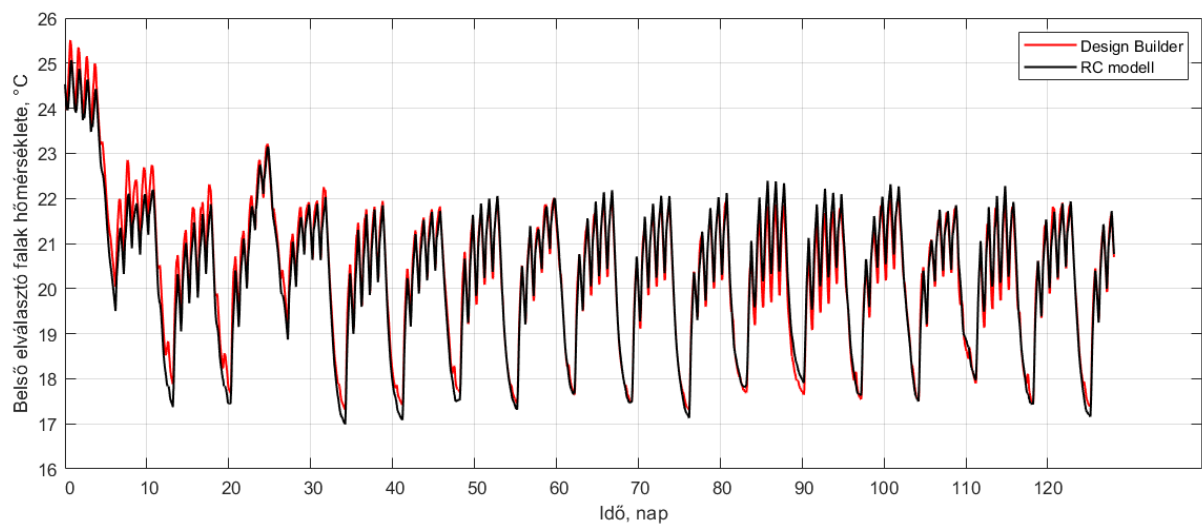
3. táblázat: Kezdeti és hangolt rendszer paraméterek értékei

Név	Kezdeti	Optimalizált
R_{e2}	0.001620	0.001410
R_{e1}	0.01571	0.008798
R_{ea}	0.0004159	0.0004933
R_{ie}	0.0006931	0.001101
R_{if}	0.001579	0.002535
R_f	0.01859	0.01395
R_{im}	0.005556	0.006555
R_w	0.008931	0.01067
R_c	0.005714	0.006447
C_{e1}	39336851	30370663
C_{e2}	101233660	138636008
C_f	11113200	10742706
C_m	24694800	10721535
C_z	1081009	1304069
Ψ_s	0.4	0.5581
Ψ_h	0.65	0.4184

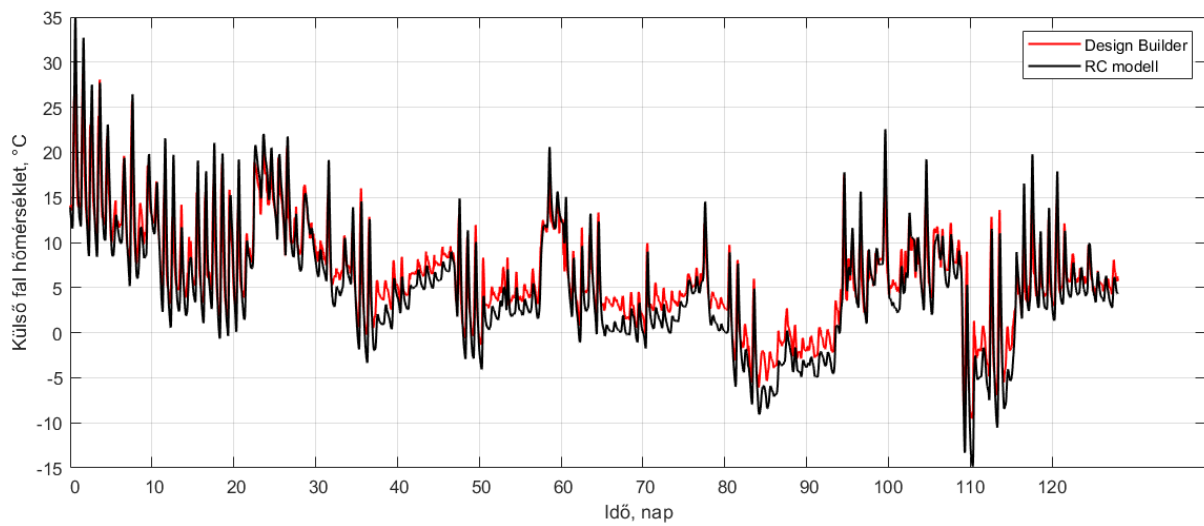
- A további 4 állapot összehasonlítása a két modellre a tréning időszakra:



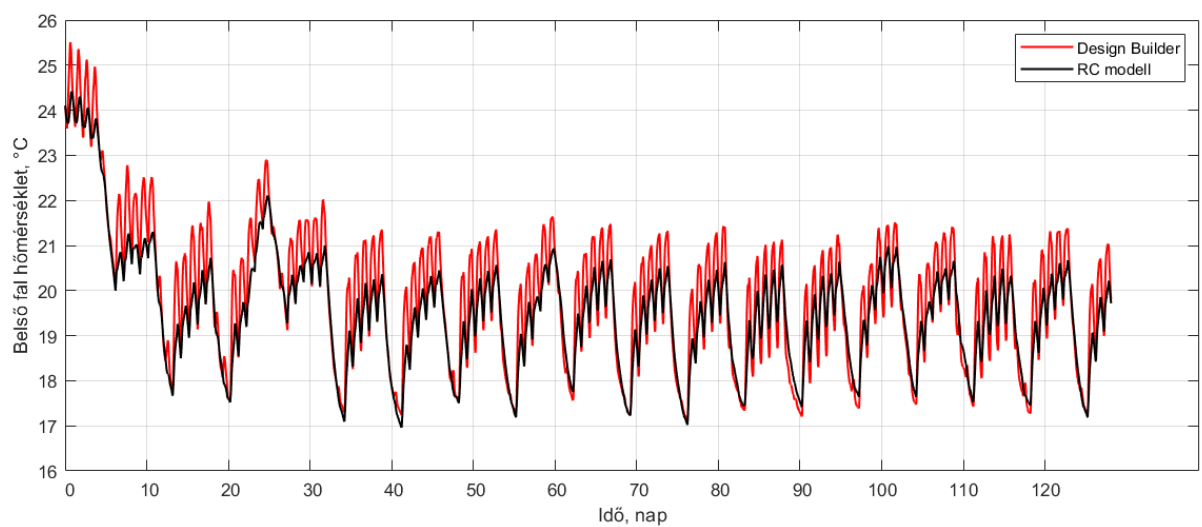
25. ábra: Padló hőmérséklet



26. ábra: Belső hőtároló tömeg hőmérséklete



27. ábra: Környezettel határos fal külső felülete



28. ábra: Környezettel határos fal belső felülete

- Az energiafelhasználás és MSE értékek változása:

4. táblázat: Energiafelhasználás értékei [kW] különböző P és Q értékek mellett

R=0.01	Q									
P	10	100	1000	2000	5000	10000	15000	30000	100000	500000
8	4143	3035	2335	2327	2357	2366	2388	2400	2391	2386
16	3240	2436	2358	2364	2384	2380	2378	2376	2376	2377
24	2826	2321	2364	2371	2368	2366	2365	2365	2367	2368
48	2433	2348	2352	2353	2355	2356	2356	2357	2358	2359
96	2328	2335	2349	2352	2355	2356	2356	2357	2357	2358
144	2319	2332	2349	2352	2356	2356	2356	2356	2357	2358
192	2311	2333	2349	2352	2355	2355	2356	2356	2357	2357

5. táblázat: MSE eredmények különböző P és Q értékek mellett

R=0.01	Q									
P	10	100	1000	2000	5000	10000	15000	30000	100000	500000
8	59.89	13.26	1.62	1.01	0.63	0.62	0.67	0.45	0.27	0.23
16	16.74	1.92	0.59	0.5	0.39	0.26	0.23	0.2	0.19	0.18
24	6.27	1.31	0.41	0.32	0.24	0.22	0.21	0.21	0.19	0.18
48	1.59	0.47	0.28	0.27	0.24	0.22	0.22	0.21	0.19	0.17
96	0.76	0.41	0.3	0.27	0.24	0.22	0.22	0.21	0.19	0.18
144	0.6	0.43	0.3	0.27	0.22	0.22	0.22	0.21	0.19	0.18
192	0.61	0.42	0.3	0.27	0.24	0.22	0.22	0.21	0.19	0.18