



MAGYAR AGRÁR- ÉS
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

LAKÓÉPÜLETEK FAJLAGOS FŰTÉSI ENERGIAIGÉNYÉNEK VALÓS ÉS
SZIMULÁCIÓS MODELLEZÉSE

Doktori (PhD) értekezés

Páger Szabolcs

Gödöllő
2024

**A doktori iskola
megnevezése:**

Műszaki Tudományi Doktori Iskola

tudományága:

Agrárműszaki Tudományok

vezetője:

Prof. Dr. Kalácska Gábor
egyetemi tanár, DSc
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Műszaki intézet

Témavezető:

Dr. Géczi Gábor
habilitált egyetemi docens, PhD
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Környezettudományi Intézet

Társ-témavezető:

Dr. Földi László József
egyetemi docens, PhD
Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Műszaki Intézet

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető(k) jóváhagyása

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK	5
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	10
1.1. A téma időszerűsége és jelentősége.....	10
1.2. Célkítűzések.....	11
2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS	13
2.1. Lakóépületek fűtési energiaigénye	13
2.1.1 Határoló szerkezetek hőátbocsátási tényezője	13
2.1.2 A fajlagos hővesztésetényező	14
2.1.3 Fűtési energiaigényre vonatkozó számítások.....	14
2.2. A fűtési hőfokhíd.....	14
2.3. Lakóépületek termikus időállandója.....	20
2.4. Energetikai követelmények és azok változása Magyarországon.....	22
2.5. Épületenergetikai számítások választható módszerei energetikai tanúsítás során	24
2.6. Lakóépület fűtési energiaigényének modellezése és szimulációja.....	25
2.6.1 Blokkorientált modellezés	25
2.6.2 Lakóépületek fűtési energiafelhasználásával kapcsolatos modellezés szoftverei....	26
2.6.3 Hőátadás modellezése épületekben.....	28
2.6.3.1. White-box modell	28
2.6.3.2. Black-box modell.....	29
2.6.3.3. Gray-box modell	29
2.7. Differenciálegyenletek numerikus megoldási módszerei.....	31
2.7.1 Egyszerű iterációs módszerek -Euler módszer	31
2.7.2 Módosított Euler-módszer (középponti-módszer)	32
2.7.3 Másod- és magasabb rendű módszerek.....	33
2.7.4 Butcher táblázatok	33
2.7.5 További módszerek.....	34
2.7.6 Magasabb rendű egyenletekre alkalmazható módszerek	34
2.8. A modellezés során alkalmazott numerikus módszer.....	35
2.9. Szabályozástechnika.....	35
2.10. A szakirodalomi áttekintés összefoglaló értékelése	40
3. ANYAG ÉS MÓDSZER.....	41
3.1. Alkalmazott mérőeszközök, és mérési adatsorok.....	41
3.2. A fűtési energiaigényt meghatározó módszer	44
3.3. Kisminta modell épületek.....	45
3.3.1 A hőtároló tömeg változtatása a kisminta modellekben	49

3.3.2 Kisminta blokkorientált szimulációs modell	49
3.3.3 A kisminta modellek identifikálása	52
3.4. A valós épületek	53
3.4.1 B2 – Identifikációs – épület	53
3.4.2 Egyszerűsített modell.....	57
3.4.3 Validációs épületek.....	60
3.5. Az éves fűtési hőfokhíd meghatározása MATLAB/Simulink környezetben	62
3.6. Ismétlődő feladatok automatizálása MATLAB/Simulink környezetben	62
4. EREDMÉNYEK és azok megbeszélése.....	63
4.1. Kisminta modellek eredményei	63
4.2. Valós épület mérési és részletes modell által szimulált eredmények	72
4.3. B1-B5 épületek paraméterérzékenységi vizsgálat.....	73
4.4. B1-B5 épületek eredményei	74
4.5. Külső határoló szerkezet U érték változtatásának hatása	77
4.6. Hőkapacitás befolyásoló hatása állandó és változó alapjel mellett	80
4.7. Belső hőmérséklet alapjel 1 °C-os változtatásának hatása	82
4.8. Fajlagos fűtési energiaigény meghatározásra alkalmazott közelítő összefüggés	84
4.9. Új tudományos eredmények	87
5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	92
6. ÖSSZEFOGLALÁS	95
7. SUMMARY	97
8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS	99
9. MELLÉKLETEK	100
M1. Irodalomjegyzék.....	100
M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk.....	107
M3. Kisminta modell.....	108
M4. Valós (B2) épület	125
M5. B1-B5 valós épületek	126
M6. Fűtési hőfokhíd és lokáció	138

JELÖLÉSJEGYZÉK

Alkalmazott jelölések

A	<i>Felület</i>	$[m^2]$
a, b, c, d, e, f	<i>Paraméterek a közelítő egyenletben</i>	$[-]$
A, B, C	<i>Kisminta modellek betűjele</i>	$[-]$
A_b	<i>Hasznos belső bruttó alapterület</i>	$[m^2]$
$A_{ceiling}$	<i>Födém felülete</i>	$[m^2]$
A_{dw}	<i>Nyílászárók felülete</i>	$[m^2]$
A_{floor}	<i>Padlófűtés felülete</i>	$[m^2]$
A_{fur}	<i>Hőtároló tömeg felülete</i>	$[m^2]$
A_N	<i>Nettó alapterület</i>	$[m^2]$
A_{roof}	<i>Tető felülete</i>	$[m^2]$
A_{wall}	<i>Fal felülete</i>	$[m^2]$
A/V	<i>Épület külső felület és a belső térfogatának aránya</i>	$[m^2/m^3]$
$B1-B5$	<i>Valós épületek betűjele és sorszáma</i>	$[-]$
C	<i>Hőkapacitás</i>	$[J/K]$
C_T	<i>Összesített hőkapacitás</i>	$[J/K]$
c	<i>Szerkezet fajhője</i>	$[J/kgK]$
c_{air}	<i>Levegő fajhője</i>	$[J/kgK]$
$c_{ceiling}$	<i>Födém fajhője</i>	$[J/kgK]$
c_{floor}	<i>Padló fajhője</i>	$[J/kgK]$
c_{fur}	<i>Berendezés átlagos fajhője</i>	$[J/kgK]$
c_l	<i>Fajhő l-edik réteg</i>	$[J/kgK]$
c_{wall}	<i>Fal fajhője</i>	$[J/kgK]$
c_{water}	<i>Víz fajhő</i>	$[J/kgK]$
d	<i>Vastagság</i>	$[m]$
d_j	<i>Rétegvastagság j-edik réteg</i>	$[m]$
FI	<i>Vonalmenti hőátbocsátási tényező a falak és az aljzat között</i>	$[W/m]$
$G_{20/12}$	<i>Fűtési hőfokhíd</i>	$[nap\ ^\circ C/a]$
H	<i>Az éves fűtési hőfokhíd ezredrésze</i>	$[khK/a]$
$H_{20/12}$	<i>Fűtési hőfokhíd ezredrésze órában kifejezve</i>	
	<i>20 °C belső-, 12 °C fűtési határhőmérséklet esetén</i>	$[khK/a]$
$H_{tr,adj}$	<i>Transzmissziós hőveszteség-tényező</i>	$[Wm^2/K]$
$H_{ve,adj}$	<i>Szellőzési hőveszteség-tényező</i>	$[Wm^2/K]$
HY	<i>Hiszterézis</i>	$[^\circ C]$
k	<i>Kitöltési tényező</i>	$[%]$

Jelölésjegyzék

k_1	Követelményszint/1920	[-]
k_2	Követelményszint/1965-1979	[-]
k_3	Követelményszint/1979-1986	[-]
k_4	Követelményszint/1986-2006	[-]
k_5	Követelményszint/2006-2014	[-]
k_6	Követelményszint/2015-2023	[-]
k_7	Követelményszint/2023-tól	[-]
k_{air_wall}	Hőátszármaztatási tényező levegő - fal	[W/m ² K]
$k_{ceiling}$	Hőátszármaztatási tényező födém	[W/m ² K]
k_{dw_atm}	Hőátszármaztatási tényező nyílászárók – környezet	[W/m ² K]
k_{floor_air}	Hőátszármaztatási tényező levegő - padló	[W/m ² K]
k_{floor_ground}	Hőátszármaztatási tényező padló – föld	[W/m ² K]
k_{fur}	Hőátszármaztatási tényező hőtároló tömegek	[W/m ² K]
k_l	Hőátszármaztatási tényezője l-edik réteg	[W/m ² K]
k_{wall_atm}	Hőátszármaztatási tényező környezet - fal	[W/m ² K]
k_{wall_air}	Hőátszármaztatási tényező fal - levegő	[W/m ² K]
L	Szellőző levegő mennyisége	[m ³]
l	Csatlakozási élek hossza vagy terület	[m]
L_{wall}	Fal hossza	[m]
m	Iránytényező	[-]
m_{air}	Levegő tömeg	[kg]
$m_{ceiling}$	Födém tömege	[kg]
m_{floor}	Padló tömege	[kg]
m_{fur}	Berendezések tömege	[kg]
m_{wall}	Fal tömege	[kg]
m_{water_fh}	Padlófűtés vizének tömege	[kg]
m_{water_rh}	Radiátoros fűtés vizének tömege	[kg]
n	Légcsere	[1/h]
n_{fhouse}	Filtrációs tényező	[1/h]
p	Fűtési rendszer tervezési tényezője	[-]
P_{fh}	Padlófűtés teljesítménye	[W]
P_h	Fűtés teljesítménye	[W]
P_{rh}	Radiátoros fűtés teljesítménye	[W]
q	Fajlagos hővesztéstényező	[W/m ³ K]
q_b	Belső fajlagos hőtermelés	[W/m ²]
$Q_{belső\ hőnyereség}$	Belső hőnyereség	[W]

Jelölésjegyzék

q_f	Fűtés fajlagos éves nettó hőenergia igény	[kWh/m ² a]
Q_F	Fűtés nettó éves hőenergia igény	[kWh/m ² a]
$Q_{fűtési/hűtési\ h\ddot{o}ig\acute{e}ny}$	Fűtési/hűtési hőigény esetében fűtési hőigény	[W]
$Q_{l\acute{e}gcsere}$	Légcsere hővesztesége	[W]
q_m	Fajlagos hőveszteség-tényező	[W/m ³ K]
$Q_{napsug\acute{a}rzás}$	Napsugárzásból származó hőnyereség	[W]
Q_{rad}	Napsugárzás	[W/m ²]
$Q_{rétegrendi\ transzm.}$	Transzmissziós hőveszteség a határolószerkezeteken keresztül	[W]
Q_{sd}	Direkt sugárzási hőnyereség vagy hőterhelés	[W]
Q_{sid}	Indirekt sugárzási hőnyereség	[W]
$Q_{vonalmenti}$	Vonalmenti hőátbocsátás	[W]
R^2	Determinációs együttható	[-]
r_a	Levegő hőátadási ellenállása	[m ² K/W]
R_j	Hőátadási ellenállás j-edik réteg	[m ² K/W]
R_{se}	Külső hőátadási ellenállás	[m ² K/W]
r_{si}	Belső felület hőátadási ellenállása	[m ² K/W]
R_{si}	Belső hőátadási ellenállás	[m ² K/W]
r_{so}	Külső felület hőátadási ellenállása	[m ² K/W]
R_t	Összesített hőátadási ellenállás	[m ² K/W]
R_T	Eredő hővezetési ellenállás	[m ² K/W]
$slip$	Alapjel időprogram eltolása	[h]
SS_{res}	Maradék négyzetösszeg	[-]
SS_{tot}	Teljes négyzetösszeg	[-]
T	Idő	[h]
t	Idő	[s]
T_{SP}	Hőmérséklet alapjel	[°C]
T_{SP_H}	Hőmérséklet alapjel felső érték	[°C]
T_{SP_L}	Hőmérséklet alapjel alsó érték	[°C]
T_i	Belső levegő hőmérséklet	[°C]
T_{air}	Levegő hőmérséklete	[°C]
T_{atm}	Környezeti hőmérséklet	[°C]
T_e	Külső hőmérséklet	[°C]
T_{floor}	Padló hőmérséklet	[°C]
T_{fur}	Hőtároló tömeg hőmérséklet	[°C]
T_{ground}	Talaj hőmérséklet	[°C]
t_{max}	Mérés teljes időtartama	[s]

Jelölésjegyzék

T_{measured}	Mért hőmérséklet	[°C]
$T_{\text{simulated}}$	Szimulált hőmérséklet	[°C]
T_{wall}	Fal hőmérséklet	[°C]
U	Hőátbocsátási tényező	[W/m²K]
U_i	Hőátbocsátási tényező i -edik réteg	[W/m²K]
U_R	Eredő hőátbocsátási tényező	[W/m²K]
V	Épület térfogat	[m³]
V_{house}	Ház légtérfogata	[m³]
Z	Fűtési időny hossza	[nap/a]
Z_F	Fűtési időny hosszának ezredrésze	[kh/a]
x_l	Rétegvastagság x -edik réteg	[m]
$\bar{x}$	Átlag érték	[-]
$\hat{y}$	Előre jelzett érték	[-]
<i>Görög betűk</i>		
α_e	Konvektív hőátadási tényező a külső felületen	[W/m²K]
α_i	Konvektív hőátadási tényező a belső felületen	[W/m²K]
Δ_{SEC}	Fajlagos fűtési energiaimegtakarítás	[kWh/m² a]
$\Delta_{\text{SEC}\%}$	Százalékos fajlagos fűtési energiaimegtakarítás	[%]
σ	Szakaszos üzem hatását kifejező korrekciós tényező	[-]
η_{Irad}	Napsugárzás hasznosulási hatásfoka	[-]
χ	Korrekciós tényező	[-]
λ	Hővezetési tényező	[W/mK]
λ_j	j -edik réteg tervezési hővezetési tényezője	[W/mK]
ρ	Sűrűség	[kg/m³]
ρ_{air}	Levegő sűrűsége	[kg/m³]
ρ_l	Sűrűség l -edik réteg	[kg/m³]
ψ	Vonalmenti hőátbocsátási tényező	[W/mK]
τ	Időállandó	[h]
<i>Rövidítések</i>		
CDD	Cooling Degree Days - Hűtési hőfokhíd	[nap°C/a]
HDD	Heating Degree Days - Fűtési hőfokhíd	[nap°C/a]
MPC	Modell Predictiv Control	[-]
P	Arányos szabályzó	[-]
PI	Arányos integráló szabályozó	[-]
PID	Arányos integráló deriváló szabályozó	[-]

Jelölésjegyzék

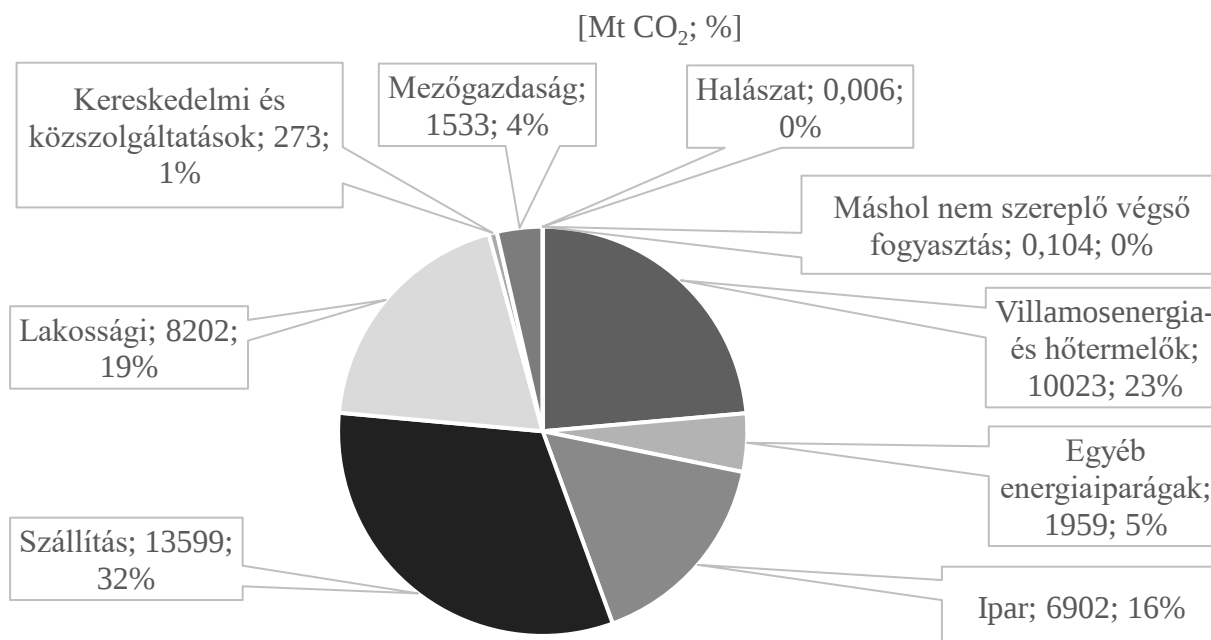
<i>SD</i>	<i>Szórás (standard deviation)</i>	<i>[-]</i>
<i>SEC</i>	<i>Fajlagos fűtési energiaigény</i>	<i>[kWh/m² a]</i>
<i>TTC</i>	<i>Thermal Time Constant - Időállandó</i>	<i>[h]</i>

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Doktori disszertációmban modell- és valós lakóépületekben méréseket végzek el, a mérések alapján értékelem ki és készítem el a fizikai alapú matematikai modelleket. Ezen modellek validálása után a modellterben további vizsgálatokat és szimulációkat futtatok. Melyek célja az épületek termikus időállandója és várható energiafogyasztása közötti összefüggések megállapítása lesz. A vizsgálataimat az állandó és változó alapjelű szabályozási mód hatásának, valamint az alapjel hőmérsékletcsökkentés hatásának vizsgálatát is el fogom végezni. Vizsgálni fogom, hogy milyen közelítő megoldással lehet meghatározni a várható fajlagos fűtési energiaigényt más helyszínen lévő épületek esetében. A vizsgálataimat kisminta modellekre és valós épületekre is el fogom végezni.

1.1. A téma időszerűsége és jelentősége

Európában az energiafelhasználás 40%-át az épületek fűtési és hűtési energiaigénye teszi ki (D'Agostino, et al., 2017). Magyarországi viszonylatban, hasonlóan az Európai Unió többi tagországához a CO₂ kibocsátásból a lakossági energiafelhasználás 19%-ot tesz ki, mely az 1.1. ábrán (International Energy Agency, 2023) látható. Az energiafelhasználás és ezáltal a szén-dioxid kibocsátás csökkentésének kiemelt területe mely az épületek energiaigényének minimalizálásával érhető el. Az érvényes nemzetközi és hazai szabályozásnak is célkitűzése, hogy az épületek energiafelhasználását csökkenteni szükséges ezáltal a globális energiafelhasználás és károsanyag kibocsátás is mérséklődik. A rendeletekben és direktívákban folyamatosan szigorodó követelmények jelennek meg a határoló szerkezetekre vonatkozóan (7/2006 TNM Rendelet, 2006), (9/2023 ÉKM Rendelet, 2023). Ezek a rendeletek azonban nem térnek ki az épület hőtároló tömegének és hőkapacitásának befolyására, a várható fűtési energiaigény földrajzi elhelyezkedés szerinti meghatározására, valamint a fűtésszabályozás optimalizációjára.



1.1. ábra A legnagyobb CO₂ kibocsátó végfelhasználások Magyarországon 2021-ben (International Energy Agency, 2023)

Az épületek esetében egymással ellentétes célokat kell teljesítenünk. Egyidejűleg jelentkezik az energiafelhasználás csökkentésének és a komfort növelésének igénye. Az épületek határoló szerkezeteiben, tájolásában, árnyékolásában, valamint korszerű gépészeti rendszerek kialakításában rejlő megtakarítási lehetőségeket többnyire már kihasználtuk. Tervezési fázisban

lehetőségünk van arra, hogy megfelelően kiválasztott építőanyagokkal az adott épülethez optimális hőtároló tömeget és megfelelő hőszigetelést hozzunk létre. Új és meglévő épületek esetében is megtakarításhoz vezet az állandó alapjelű fűtés helyett a lakók komfortigényeivel összeegyeztetett szabályozási mód.

Az épületeink korszerű tervezésével és felújításával csökkenthető azok energiaigénye. A megfelelően megválasztott építőanyagok és hőszigetelés alkalmazása, nyílászárók korszerűsítése, szoláris nyereségek hasznosítása is ezek közé tartozik. Ezen felül még további lehetőségek is rendelkezésre állnak az energiafelhasználás csökkentésére. Ezek jellemzően a nagyobb hatékonysággal üzemelő hőtermelő berendezések és megújuló energiák hasznosítása. A kontrollált hővisszanyeréssel biztosított frisslevegős szellőzés, mely csökkenti a felesleges filtrációs veszteségeket. A fogyasztói szokások megváltoztatása is hatékony eleme az energiapazarlás csökkentésének (Kalmár, 2009). A világítás korszerűsítése, a jelenlét csak a szükséges világítás használata, vagy akár az alacsonyabb belső hőmérséklet tartása fűtési időben is jelentős megtakarítással kecsegtet. Mindamellet az éjszakai alacsonyabb hőmérséklet a jobb minőségű alváshoz is javasolt. A modern vagy korszerűsített épületekben megjelenik az épületautomatizálás is, mely pontosabb és komfortosabb üzemeltetést képes biztosítani alacsonyabb fogyasztás mellett, mindamellet az épületeinkről is folyamatos adatokat biztosít. Ez nemcsak a költségek elszámolásában, de az optimalizálásban üzemeltetésben is hasznosítható információkat biztosít.

Ahhoz, hogy az épületek viselkedését jobban megértsük, a matematikai modellezés és szimuláció nyújt korszerű eszközt. Ezekkel a módszerekkel lehetővé válik az épületeink optimalizálása jelentősebb költség és hosszantartó kísérletek és mérések végzése nélkül (Harish & Kumar, 2016). Kipróbálható és összevethető egyes szerkezeti elemek helyének méretének, vagy anyagának módosítása, optimalizálhatóak vele a különböző szabályozási módok is. A számítógépes modellek segítségével különböző forgatókönyvek és paraméterek tesztelhetők, más földrajzi elhelyezkedés esetén is elvégezhetőek a szimulációk.

Mind a nemzetközi mind a hazai szakirodalom is részletesen foglalkozik az épületek energetikai modellezésével. Napjainkban egyre nagyobb hangsúlyt kap a szimuláció és modellezés, rendkívül aktuális és fejlődő kutatási ágazat, ezeket a területeket is bemutatom a szakirodalmi áttekintés részben.

1.2. Célkitűzések

A kutatási feladat célkitűzése a lakóépületek fajlagos fűtési energiaigényének meghatározása szimulációval. Lakóépületek esetében áttekintve a szakirodalmat a cél egy olyan fizikai alapú matematikai modell kidolgozása, ami alkalmazható a lakóépületben zajló energetikai folyamatok leírására. A modell alkalmazható legyen más fűtési hőfokhidak és más belső hőmérséklet esetében is, valamint kellően rugalmas legyen, ami a vizsgálati terület és szempontok könnyű bővíthetőségét eredményezi. Cél egy egyszerűsített modell megalkotása, ami kellően pontos és gyors szimulációra alkalmas.

Az elméleti modell elkészítése és a szimulációk futtatása mellett a kutatás célja a modell működésének gyakorlati ellenőrző mérése is. Kisminta modellek és valós épületekben történő mérésekkel alátámasztva. A vizsgálatok során paraméterérzékenységi vizsgálatot végzek. Megvizsgálom a hőmérséklet-, a hőtároló tömeg-, a falszerkezetek hőátbocsátási tényezőinek hatásait a fajlagos fűtési energiaigényre.

A kutatás során olyan blokkorientált modell és szimulációs módszer fejlesztése a cél, ami könnyen kiterjeszthető és bővíthető más alkalmazási területekre is, ezzel növelve a blokkorientált modell gyakorlati alkalmazhatóságát.

A modellalkotás során előtérbe helyeztem, hogy a különböző földrajzi elhelyezkedés és időjárási adatok figyelembevételével több épület modellezése és szimulációja is elvégezhető legyen, ezáltal általánosítható megoldások legyenek meghatározhatóak a fűtési energiaigény csökkentésére.

Adat alapú döntéstámogatás fejlett adatelemzési technikák alkalmazása az energiafelhasználás optimalizálására, azonosítva azokat a tényezőket, amelyek a legnagyobb hatással vannak a fűtési energiafelhasználásra.

Pontosabb, és egyszerűsített közelítő egyenlet megalkotása a mérési és szimulációs adatok alapján öt valós épülettel igazolva, amelyek segítenek a mérnököknek és döntéshozóknak a lakóépületek energiahatékony tervezésében, felújításában üzemeltetésében és optimalizálásában.

Kiterjesztett valós környezeti vizsgálatok: Az eddigieknél szélesebb körű valós környezeti mérések és azok integrálása a modellezési folyamatokba, hogy a szimulációs modellek pontosabbak és megbízhatóbbak legyenek.

2. SZAKIRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1. Lakóépületek fűtési energiaigénye

A lakóépületek fűtési energiaigényének meghatározása kiemelten fontos terület, hiszen cél az energiahatékonyság növelése, a költségek csökkentése és a környezeti káros hatások minimalizálása a kívánt komfortszint megőrzése mellett. Az épületek jelentős részét teszik ki az összesített energiafogyasztásnak, így az energiaigény csökkentése hozzájárul a fenntarthatósági célok eléréséhez, segíti a szén-dioxid-kibocsátás csökkentését, valamint biztosítja az épület használóinak komfortjának és életminőségének növelését. A következő szakaszban a legfontosabb alap összefüggések kerülnek bemutatásra.

2.1.1 Határoló szerkezetek hőátbocsátási tényezője

A hőátbocsátási tényező az egységnyi felületen egy másodperc alatt egy fokos hőmérséklet különbség hatására távozó energiamennyiség.

Az átlagos hőátbocsátási tényező számításakor választható részletes módszer az (MSZ EN ISO 10211, 2017) szerinti modellezéssel. Vagy egyszerűsített módszerrel: amennyiben az épület szerkezeti elemeit úgy tekintjük, mint amelyek n darab, a hőáram irányára merőlegesen elhelyezkedő, d_j vastagságú és λ_j hővezetési tényezővel rendelkező homogén rétegből állnak, és feltételezzük, hogy állandósult állapotú egydimenziós hőátvitel valósul meg, akkor az eredő hőátbocsátási tényező kiszámítása a (2.1) formulával fejezhető ki:

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum_{j=1}^{j=n} \frac{d_j}{\lambda_j} + \frac{1}{\alpha_e}} \quad (2.1)$$

Ahol α_i a belső, α_e a külső felületen a konvektív hőátadási tényező, jelölésekor a szakirodalomban előfordul h_e és h_j formában is.

Az eredő hővezetési ellenállás a hőáramlásra merőlegesen elhelyezkedő n darab homogén réteg esetén:

$$R_T = R_{si} + \sum_{j=1}^{j=n} R_j + R_{se} \quad (2.2)$$

Amennyiben az egyszerűsített számítási módszert alkalmazzuk a hőátbocsátási tényező számításakor csak a rétegvastagságokat és a hővezetési tényezőket kell figyelembe venni (7/2006 TNM Rendelet, 2006). Azok a rétegek tekinthetők hőtechnikailag homogén rétegnek az MSZ EN ISO 6946 szerint az olyan állandó vastagságú réteget, melynek hőtechnikai jellemzői egyenletesek (MSZ EN ISO 6946, 2017). A falak egy részén a hővezetés nem egydimenziós. A többdimenziós hővezetés jelenlétét a hőhíd korrekcióval vesszük figyelembe. A hőhidak hatását a (2.3) formulával lehet meghatározni.

$$U_R = U_i \cdot (1 + \chi) \quad (2.3)$$

Az U_R a hőhidak hatását kifejező szorzóval korrigált („eredő”) hőátbocsátási tényező értéke, U_i az adott szerkezeti elem hőátbocsátási tényezője. A χ korrekciós tényező egyes épületelemekre vonatkozó értékeit a 7/2006. TNM rendelet 2. melléklete tartalmazza. Az érvényben lévő számítási módszereket a 9/2023-as ÉKM rendelet 6.1.2. fejezete tartalmazza.

Az egyszerűsített számítási módszer alkalmazásakor az alábbi egyszerűsítések tehetőek:

- a benapozás ellenőrzése elhagyható,
- a hőtároló tömeg szerinti besorolás a födémek és a külső falak rétegterve alapján végezhető el,
- a fűtési idényre vonatkozó direkt nyereség elhanyagolható, illetve az északi tájolásra vonatkozó sugárzási energiahozammal számítható,

- az egyensúlyi hőmérsékletkülönbség számítása elhagyható,
- a nyári sugárzási hőterhelés zavartalan benapozás feltételezésével az adott tájolásra vonatkozó intenzitás adattal számítható,
- az indirekt sugárzási nyereség számítása elhagyható.

2.1.2 A fajlagos hőveszteségtényező

A fajlagos hőveszteségtényező számításához a (2.4) képlet alkalmazható.

$$q = \frac{1}{V} \left(\sum A \cdot U_R + \sum l \cdot \psi - \frac{Q_{sd} - Q_{sid}}{72} \right) \quad (2.4)$$

A fajlagos érték meghatározása az épület fűtött térfogatával történik. A zárójelben lévő tagok közül az első tagban figyelembe veszi a transzmissziós hőáramokat a határoló szerkezeteken keresztül. A második tagban a vonalmenti vagy hőhídveszteségeket. A harmadik negatív előjelű tag a passzív sugárzási nyereségeket tartalmazza (Baumann, et al., 2016).

2.1.3 Fűtési energiaigényre vonatkozó számítások.

A fűtés nettó éves hőenergia igényét a 7/2006. TNM rendelet szerint a (2.5) képlet tartalmazza:

$$Q_F = 72 \cdot V \cdot (q + 0,35 \cdot n) \cdot \sigma + 4,4 \cdot A_N \cdot q_b \quad (2.5)$$

Az összefüggésből az egyes számértékek magyarázata: 72-es érték a magyarországi konvencionális 20/12 °C fűtési hőfokhíd ezredrészét jelenti. A 0,35-ös érték a levegő sűrűségének és fajhőjének szorzatából adódó átváltásból származtatott érték. A 4,4-es érték pedig a fűtési hőfokhíd hosszának ezredrésze órában kifejezve.

Amennyiben részletes számítást kell végezni, a következő általánosított formulával tehetjük meg:

$$Q_F = H \cdot V (q + 0,35 \cdot n) \cdot \sigma - Z_F \cdot A_N \cdot q_b \quad (2.6)$$

A formula tulajdonképpen egy Magyarországra konvencionálisan elfogadott hőfokhíd alapján veszi figyelembe a fűtési hőfokhíd ezredrészét, valamint a fűtési idény hosszának ezredrészét. Ennek alkalmazásához először meg kell határozni az egyensúlyi hőmérséklet különbséget. Melyet a 2.7 egyenlet mutat be:

$$\Delta t_i = \frac{Q_{sd} + Q_{sid} + A_N \cdot q_b}{\sum A \cdot U + \sum l \cdot \psi + 0,35 \cdot n \cdot V} + 2 \quad (2.7)$$

A fűtési rendszerrel fedezendő nettó fűtési energiaigény fajlagos értéke az alábbi képlettel számítható ki:

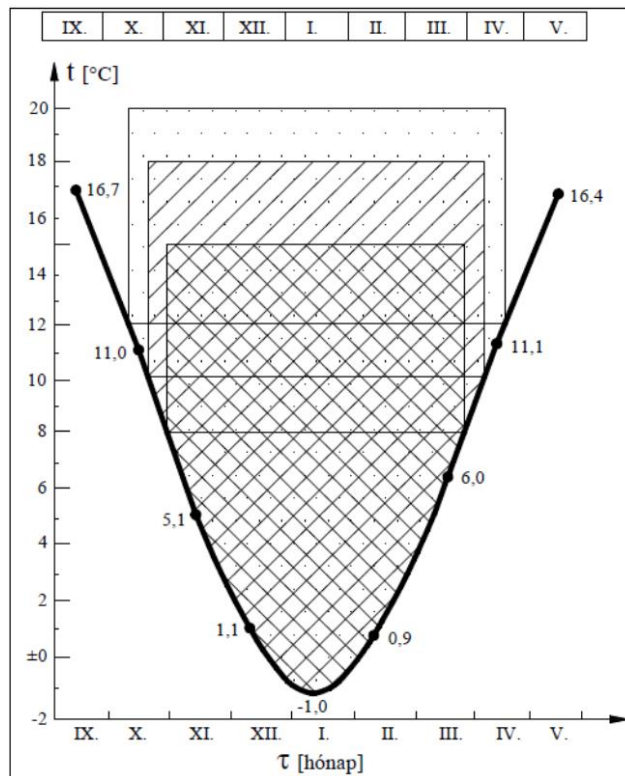
$$q_f = \frac{Q_F}{A_N} \quad (2.8)$$

2.2. A fűtési hőfokhíd

Az energiafelhasználás meghatározásához szükséges egy átlagosnak tekinthető év adatai. Ebből a célból vezették be a hőfokhidat. Amely valamely τ_0 időtartam fűtési hőfokhídját az alábbi integrál írja le:

$$G_{t0} = \int_0^{\tau_0} (T_i - T_e) dt \quad (2.9)$$

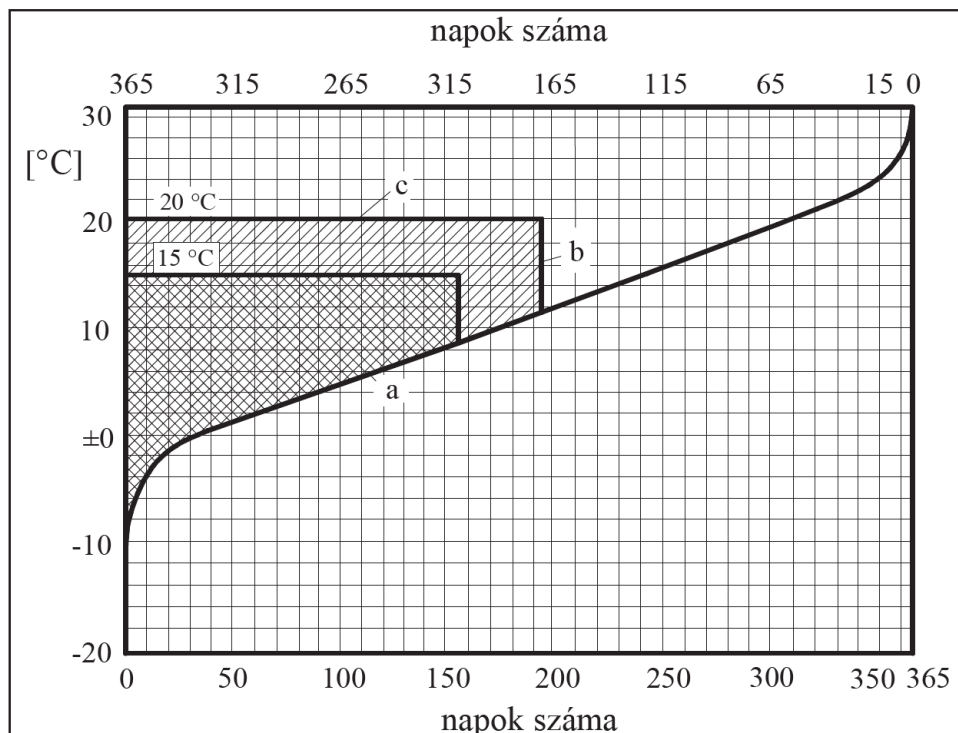
A fűtési nap azt jelenti, hogy az adott nap átlaghőmérséklete kisebb vagy egyenlő a fűtési határhőmérsékletnél. A hőfokhíd évenként és földrajzi helyszínenként is változik. Azonban egy-egy vidék területére rendkívül jellemző (Homonnay, 2000), (Macskássy, 1971). A 2.1. ábra szemlélteti Budapest hőfokhídjait a havi középhőmérsékletek alapján.



2.1. ábra Budapest hőfokhídjai a havi közepes hőmérsékletek alapján

20/12, 18/10, 15/8 °C belső és határhőfokra (Macskássy, 1971)

A hőfokhíd meghatározható a hőfokgyakorosság alapján is. A hőfokgyakorosság azt a számot jelenti, amely az évenként előforduló azonos átlaghőmérsékletű napok számát fejezi ki. Amennyiben a hőfokgyakorosságot az évi napok számában ábrázoljuk kapjuk meg a hőfokgyakorossági görbét. A napi átlaghőmérsékleteket növekvő sorrendben szerepeltetve. A 2.2. ábrán a hőfokhíd ábrázolási módja látható.



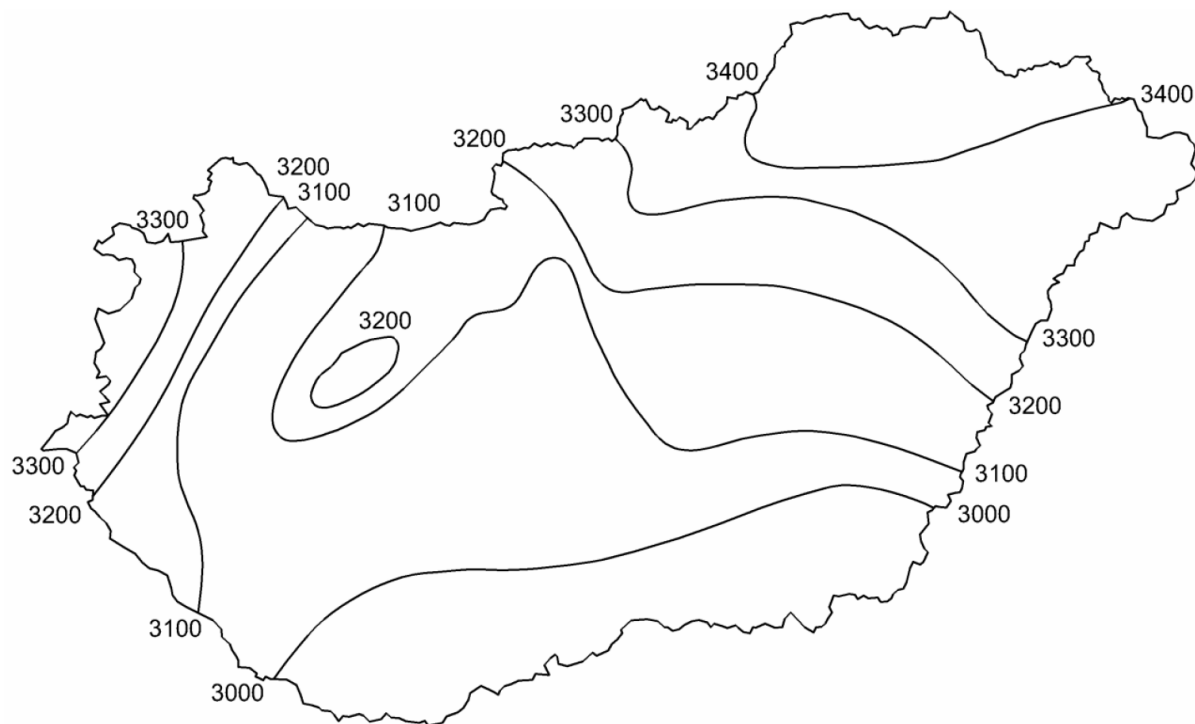
2.2. ábra Budapest hőfokhídja (Macskássy, 1971)

A görbéről azt lehet leolvasni, hogy egy adott átlaghőmérsékletű vagy annál kisebb átlaghőmérsékletű napok száma mennyi. Az emelkedő sorrendbe rendezés miatt a függvény szigorúan monoton növekvő. A görbe meredeksége az adott hőmérsékletek előfordulási gyakoriságát is mutatja. Minél meredekebb, annál kisebb az adott hőmérsékletű napok száma.

Az a, b, c vonalakkal és az ordinátákkal határolt terület jelenti a hőfokhidat, amely arányos a fűtési energia igénnyel. Ez a terület a hőfokhíd. Jelölésére $H_{20/12}$ szimbólumot alkalmazunk az indexben jelölt értékek a belső hőmérsékletet és a fűtési határhőmérsékletet jelölik. A hőfokhíd mértékegysége $\text{nap}^\circ\text{C/a}$ vagy ennek ezredrésze kelvinben kifejezve khK/a . Az egyszerűsített számításokban alkalmazott $H_{20/12} = 72 \text{ khK/a} = 3000 \text{ nap}^\circ\text{C/a}$ értékből adódik. A fűtési időny hossza $Z_F = 4,4 \text{ kh/a} = 183,3 \text{ nap/a}$ értékkel. A görbe és a határoló vonalak módosításával meghatározható más belső hőmérséklet, valamint más fűtési határhőmérsékletre tartozó értékek is (Baumann, et al., 2016).

Fontos azonban megjegyezni, hogy ezek az értékek nem állandóak. Az adott területen belül évről évre is változnak az értékek. A klímaváltozás következményei a magyarországi mérések eredményeiben is kimutathatóak. A 1901-től kezdődően gyűjtött, gondosan homogenizált és ellenőrzött adatsorok alapján az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) feljegyzései szerint az éves átlaghőmérséklet $1,2^\circ\text{C}$ -kal emelkedett. Két különböző normális periódus összehasonlításakor jól látható, hogy a hőmérsékletek magasabb értékek felé mozdultak el, a csapadékmennyiség éves eloszlása átalakult, és az ősze jellemző második csapadékcúcs fokozatosan megszűnőben van (Lakatos, et al., 2021).

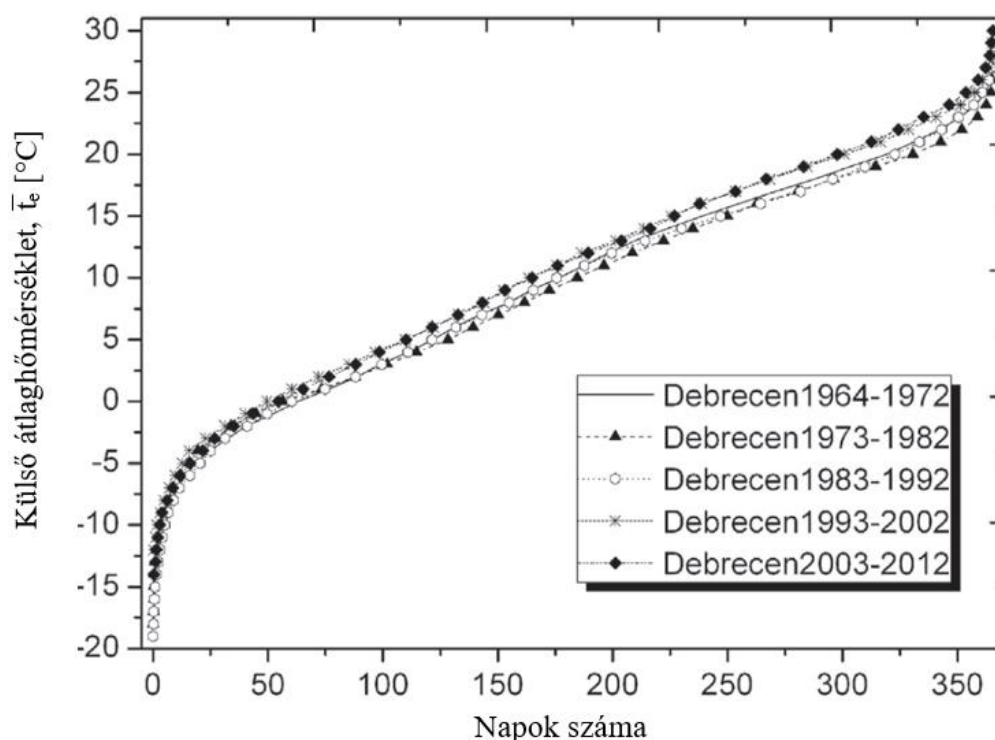
A hazai szakirodalomban legtöbbször idézett izo hőfokhíd vonalakat Macskássy alkotta meg. Az adatok meghatározásához havi középhőmérsékletekkel számolt. Az értékeket a Balti -tenger szintjéhez mért 150 m-es határig vette figyelembe. Ezt a megjelenítést a 2.3. ábra mutatja be.



2.3. ábra Macskássy féle izo hőfokhíd vonalak (Macskássy, 1971)

A szakirodalomban megtalálhatóak azonban ennek a hőfokgyakorisági görbének használhatóságával szembeni kételyek. Az általánosan használt Magyarországra érvényes fűtési hőfokhíd és hőfokgyakorisági görbe nem elég pontos, ezért nem javasolt a használata méretezéshez és tervezéshez. Ezt a megállapítást az alapján tették, hogy megvizsgálták Debrecen

fűtési hőfokhídjának értékeit 8-16 °C fűtési határhőmérséklet mellett 1963 és 2012 közötti időszakban öt évtizedre felosztva. Ezt a diagrammot mutatja be a 2.4. ábra.

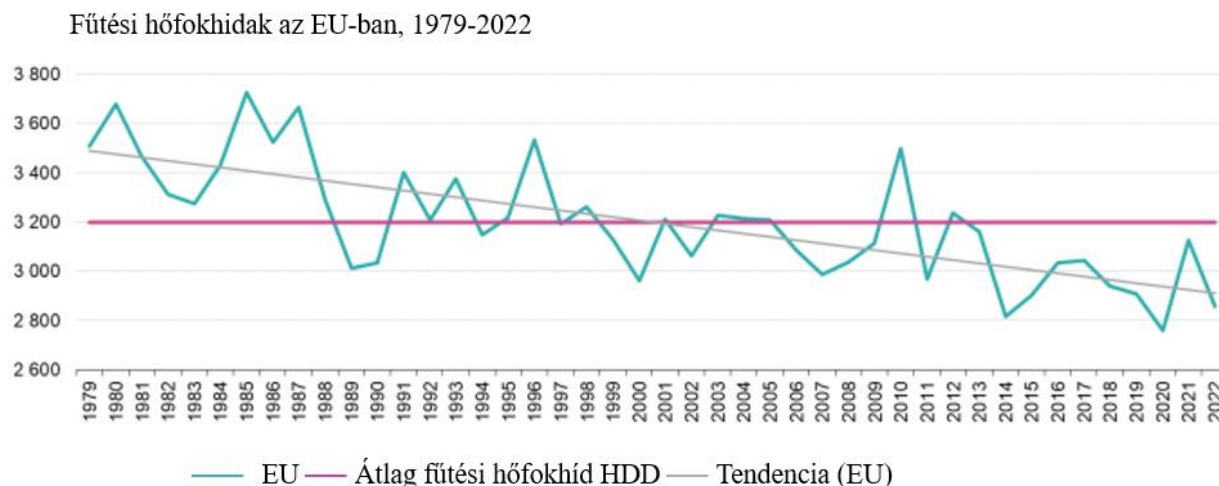


2.4. ábra Debrecen hőfokhídjai 1964-2012 (Verbai, et al., 2014)

Az eltéréseket százalékos formában adták meg az elméleti értékhez képest. Megállapították, hogy csak negatív értékek fordultak elő, a fűtéshez szükséges energiaigény alacsonyabb lesz a vártnál, és így a becsült energia-megtakarítások nem érhetők el. Magasabb beltéri hőmérsékletek feltételezése esetén az eltérések kisebbek lettek. Azt javasolták, hogy a fűtési energiaigény számításakor vegyék figyelembe a periodikus változás alapján előre jelzett fűtési hőfokhídértéket, amit a következő évtizedekre extrapolációval lehet meghatározni (Verbai, et al., 2014).

A belső léghőmérséklet módosításának és a hőfokhíd szerepének hatását vizsgálták kutatásukban Béni és L. Szabó (2023). Tíz évet átölelő hőmérsékleti adatsort használtak, debreceni lokációval. Vizsgálták a belső hőmérséklet és a fűtési határhőmérséklet közötti összefüggést, melyet lineárisként azonosítottak fűtési időszakban, hűtési határhőmérséklet esetében pedig exponenciális összefüggést tártak fel (Béni & L. Szabó, 2023).

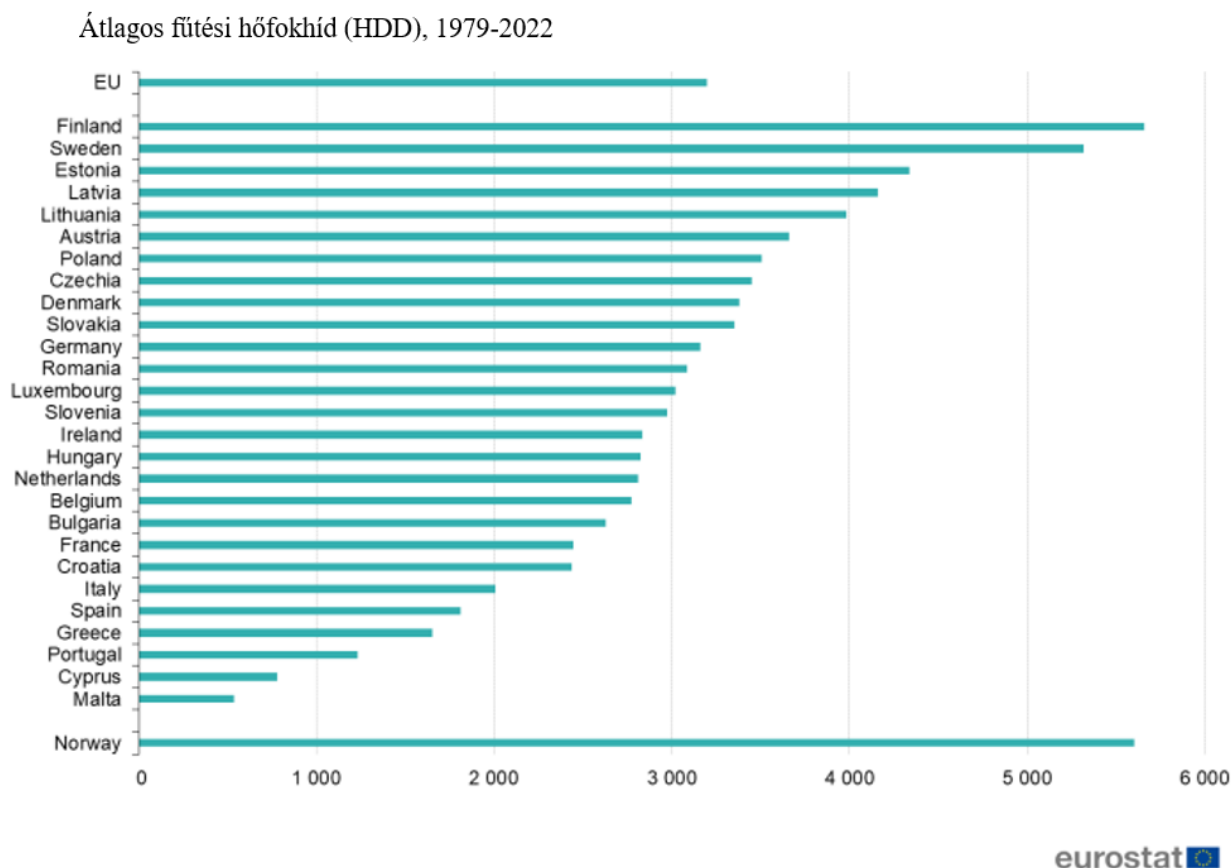
Az Európai Unió is vezet statisztikát a hőfokhíd értékeiről, melynek jelölésére a Heating Degree Days (HDD) alkalmazzák. Az EU-ban 1979 és 2022 közötti időszakban 19%-kal csökkent a fűtési hőfokhíd, ezt a statisztikát mutatja be a 2.5. ábra.



eurostat

2.5. ábra Fűtési hőfokhíd változása az EU-ban, 1979-2022 (Eurostat, 2024)

Az Eurostat egyes országokra lebontva is bemutatja az adatokat, itt be lehet azonosítani, melyik országban hasonlóak a fűtési energiaigények, (2.6. ábra) mint Magyarországon.



eurostat

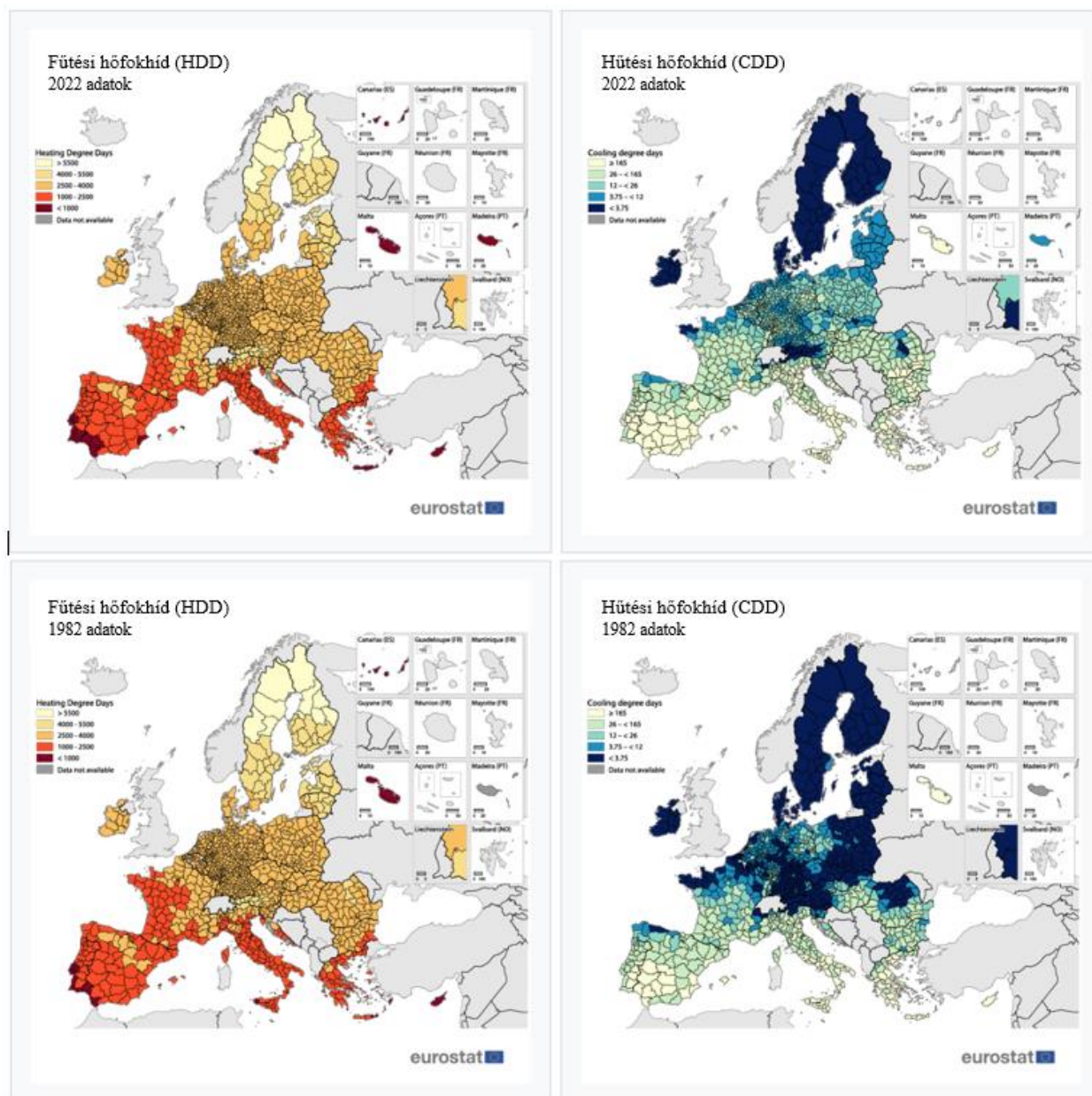
2.6. ábra Átlagos éves fűtési hőfokhidak az EU országaiban, 1979-2022 (Eurostat, 2024)

Az Eurostat az adatokat az alábbi metodika szerint állítja elő:

A fűtési hőfokhíd (HDD) index egy időjárás-alapú technikai index, amelyet az épületek fűtési energiaigényének leírására terveztek. A hűtési hőfokhíd (CDD) index szintén egy időjárás-alapú technikai index, amely az épületek hűtési (légkondicionálási) szükségleteinek leírására szolgál.

Az HDD és CDD adatokat a levegő hőmérsékletének meteorológiai megfigyeléseiből származtatják, amelyeket Európa területén 25 km felbontású szabályos rácsokra interpolálnak. Az így számított HDD és CDD adatokat összegyűjtik és rendelkezésre bocsátják.

Fűtési hőfokhíd (HDD) index: egy adott időszak hidegségének mértékét írja le, figyelembe véve a külső hőmérsékletet és az átlagos belső hőmérsékletet (más szóval a fűtési igényt). Az HDD számítása az alaphőmérsékleten alapul, amelyet úgy határoznak meg, mint a napi átlaghőmérséklet legalacsonyabb értékét, amely még nem vezet a belső tér fűtésének beindításához (fűtési határhőmérséklet). Az alaphőmérséklet értéke elvileg több tényezőtől függ, amelyek az épülettel és a környező környezettel kapcsolatosak. Általános klimatológiai megközelítés használatával az alaphőmérsékletet az HDD számításban állandó 18 °C értéken állapítják meg. A 2.7. ábra az 1982-es és 2022-es fűtési és hűtési hőfokhidak alakulását mutatja be.



2.7. ábra Átlagos fűtési- és hűtési hőfokhíd 1982 és 2022 évben (Eurostat, 2024)

Látható, hogy a nyarak és a telek átlaghőmérséklete is emelkedett így a fűtési és hűtési határhőmérsékletek is 1979 és 2022 között. Ez a fűtési idő hosszának rövidülését és a hűtési időszak meghosszabbodását jelenti (Eurostat, 2024).

Tanulmányukban Nishimwe és Reiter a jövőbeli éghajlatváltozást vizsgálta mesterséges intelligencia segítségével három különböző modellezési eljárással Belgium területén. Kiszámították a fűtési hőfokhidak alakulását és körülbelül 11,76% csökkenést prognosztizáltak 2012-től 2050-ig (Nishimwe & Reiter, 2022).

Energiatakarékos fűtésszabályozásról szóló Ezermeisterben megjelent cikkben arról írnak, hogy az épületek 1°C-os átlaghőmérséklet csökkentése közel 6%-os energiamegtakarítást eredményezhet (Ezermeister, 2022), (Baumann, et al., 2016). Afroz és társai megerősítették, hogy a fűtési időszak alatt becsült energiamegtakarítás fokként körülbelül 6%-ot tesz ki függően az épülettől és a filtrációtól (Afroz, et al., 2019).

2.3. Lakóépületek termikus időállandója

Lakóépületek esetében a belső hőmérséklet ingadozását befolyásolja az épület termikus időállandója is. Az időállandó a helyiség hőtároló kapacitásának és fajlagos hőveszteségtényezőjének a hányadosa (Fekete, 1985).

$$\tau = \frac{C}{U_R} \quad (2.10)$$

Az időállandó meghatározását bővebb formában fejtette ki Chalkey és Cater könyvükben, ahol az időállandó a tárolt hő és az órák hőveszteség hányadosaként szerepel (Chalkley & Cater, 1968).

Az időállandó számítására a következő összefüggést is alkalmazzák:

$$\tau = \frac{C}{\sum_i A_i U_i \sum_i l_i \psi_{li} + \rho_{air} c_{air} L} \quad (2.11)$$

A képletben a ρ_{air} , c_{air} , és L vagyis a szellőző levegő sűrűsége, fajhője, és a szellőző levegő mennyiségének a szorzata is szerepel. Látható, hogy az épület időállandója számos tényezőtől függ (Csáky, et al., 2013).

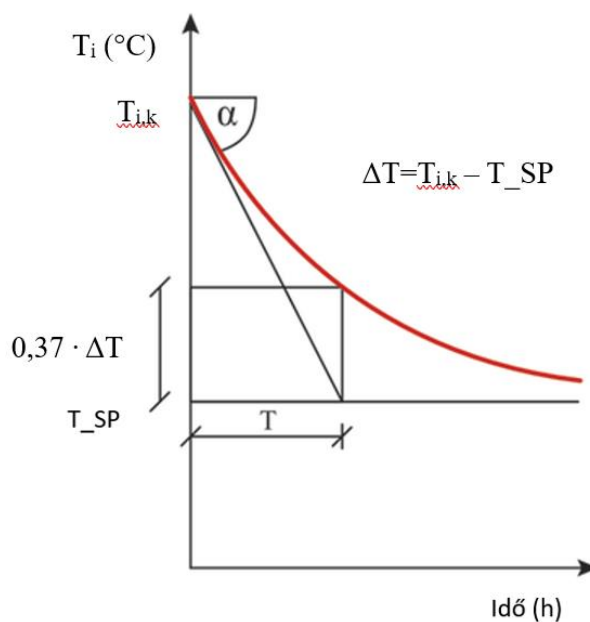
Az épületek időállandójának meghatározását vizsgálta kutatásában Levermore, ahol más képlet alkalmazását vezette le (Levermore, 2019).

$$\tau = \frac{m \cdot C}{U \cdot A} \quad (2.12)$$

Az időállandó definiálásához a (2.13) összefüggést alkalmazta, melyben azt az időt tekintik időállandónak, amíg a hőmérséklet a célhőmérséklet 63,2%-át el nem éri. A p a fűtési rendszer tervezési tényezőjét jelöli, amelyet az előfűtési idő figyelembevételével becsülnek meg értéke 1 és 2 közötti, ami azt jelzi, hogy a fűtési rendszer méretezésénél számításba veszik az előfűtési idő miatt szükséges többlet teljesítményt is, ami figyelembe veszi a nem állandósult állapotú (pl. indítási) körülményeket (Levermore, 2019).

$$T_i = p T_i \left[1 - \exp \left(-\frac{T}{\tau} \right) \right] \quad (2.13)$$

Az időállandó összefüggésében Vajda azt a következtetést vonta le, hogy a termikus időállandó növelésével az épületek fűtési energiaigénye kismértékben csökken, míg hűtési energiaigénye jelentős mértékben csökken. A publikációban a lehűlést szemléltető 2.8. ábrán az időállandó meghatározásához alkalmazott megközelítést alkalmazta (Vajda, 2023).



2.8. ábra Az épület belső hőmérsékletének változása az idő függvényében a termikus időállandó magyarázata (Vajda, 2023)

Az épület időállandójának szemléltetésére Szalay és Kiss a következő egyenletet adta meg:

$$\tau = \frac{\frac{C}{3600}}{H_{tr,adj} + H_{ve,adj}} \quad (2.14)$$

ahol C_m az épület vagy épületzóna hőtároló képessége; $H_{tr,adj}$ – a transzmissziós hőveszteség-tényező jellemző értéke, korrigálva az esetlegesen eltérő belső-külső hőmérsékletkülönbség miatt (pl. fűtetlen terek hatása); $H_{ve,adj}$ – a szellőzési hőveszteség-tényező jellemző értéke, korrigálva az esetlegesen eltérő belső-külső hőmérsékletkülönbség miatt (pl. fűtetlen terek hatása). Az alábbi következtetéseket vonták le az időállandó növelésének lehetséges módja, ha növeljük az épület hőtároló tömegét, javítjuk a hőszigetelését, valamint, ha csökkentjük a szellőzési veszteségeket (Szalay & Kiss, 2017).

Az időállandójukkal kapcsolatos kutatásukban megállapították, hogy a korszerű és egyben nagyobb időállandójú épületben sokkal stabilabb volt a belső hőmérséklet, mint a kevésbé korszerű épület esetében. A fajlagos energiafogyasztás a magasabb időállandójú épületben volt kedvezőbb (Stan Ivan & Mircea, 2013).

Kutatások nemcsak az időállandóval, hanem az időállandó egyik tényezőjét jelentő hőtároló tömeggel is foglalkoznak. Az épületek fűtési teljesítmény modulálásának lehetőségeit vizsgálták, a szabályozás szempontjából úgy, hogy a vizsgálat fókuszában az épületek hőtároló tömege volt. Két épületet vizsgáltak Dániában EnergyPlus programmal. Két különböző szigetelésű és légzárású épület modellezésével. Azt a következtetést vonták le, hogy különböző szabályozási stratégia javasolt rosszul és jól szigetelt épületek esetében (Le Dréau & Heiselberg, 2016).

Az épületek hőtehetetlenségét egyes források termikus inerciának nevezik ez a jelenség különösen fontos, mivel javíthatja a hőkomfortot és csökkentheti az energiafogyasztást. Egy kísérleti kutatásban tanulmányozták az épületek nagy termikus tömegének belső hőmérsékletre gyakorolt hatását. Az eredmények szerint a cellulózbeton falak használata a könnyűszerkezetes faház falai helyett hatékonyan csökkentheti az épületek maximális és átlagos napi hőmérsékletét a forró nyarakon mérsékelt éghajlatú országokban. Egy rendkívül meleg augusztusban az átlagos külső hőmérséklet 22,5 °C volt, és egy nagy tömegű épületben a belső levegő hőmérséklete közel 20 napig maradt 26 °C alatt, míg egy könnyűszerkezetes épületben kevesebb, mint 12 napig. A cellulózbeton falak használatával a 28 °C feletti hőmérsékletek előfordulási idejét 18,6 napról

mindössze 8 órára lehetett csökkenteni. Az épület tömegének hűtőhatása a hőhullám alatt stabil maradt és viszonylag független volt a legforróbb napok időtartamától és eloszlásától (Kuczyński & Staszczuk, 2020).

Szintén a hőtároló tömeg hatását vizsgálták Roberz és kutatótársai ultrakönnyű és nehéz betonszerkezetek esetében, ahol azt állapították meg, hogy a nehéz szerkezetek esetében a legkisebb a hőmérséklet ingadozás, a könnyű szerkezet, azaz a kisebb hőtároló tömeg nagyobb hajlamot mutat a belső túlmelegedésre (Roberz, et al., 2017).

2.4. Energetikai követelmények és azok változása Magyarországon

Az épületszerkezetekre vonatkozó előírásokat korábban műszaki irányelvekben, majd későbbiekben rendeletekben fektették le. Az első írásos kiadvány 1943-ból származó Építési zsebkönyv volt (Dr. Möller, 1943).

Ezután jelentek meg műszaki irányelvek majd szabványok: az ME 30-65, majd az MSZ 04-140/2-73, MSZ 04-140/2-85.

7/2006-os TNM rendelet, végül a jelenleg érvényben lévő 9/2023 ÉKM rendelet. Megfigyelhető a határoló szerkezetekre vonatkozó követelmények folyamatos szigorodása, melynek célja az épületek fűtési energiaigényének csökkentése (Horváth, 2017) (Csoknyai & Szalay, 2023).

Az Európai Unió az épületenergetikai hatékonyság növelése érdekében 2002-ben elfogadott egy irányelvet (2002/91/EK irányelv), mely általános célokat fogalmazott meg, és a tagországokra hagyta a nemzeti szabályozások kidolgozásának és bevezetésének feladatát. Ezek a szabályozások főként az épületek energetikai minőségére vonatkozó követelményrendszerre és az energiatanúsításra fókuszáltak. A konkrét követelmények és számítási módszerek meghatározása a tagországok hatáskörébe tartozott, melyeket alkalmazni kellett az épületek tanúsításakor is.

A harmonizált szabályozás érdekében rendszeres egyeztetések zajlottak a tagországok között, és ez a folyamat még ma is tart. Magyarország 2006-ban lépett a tettek mezejére az Irányelvnek megfelelő szabályozás bevezetésével, melyet a TNM 7/2006 számú miniszteri rendelet és az energiatanúsításról szóló 176/2008 kormányrendelet tartalmazott.

Az irányelv előírta, hogy az ilyen típusú szabályozásokat ötévente felül kell vizsgálni. Bár kisebb módosítások történtek, a követelmények lényegében nem változtak. Az eredeti határidőre tervezett szabályozás átdolgozására is volt kísérlet, de az esetleges változások elmaradtak, részben a kormányzati struktúra átalakulása miatt, ami a szabályozás felelősségének és feladatainak áthelyezését eredményezte.

Az EU azonban 2010-ben és 2018-ban is új irányelvet fogadott el az épületenergetikai területen (2010/31/EU irányelv és 2018/844/EK irányelv), de ezekben a változtatásokban nem kerültek javításra az előző irányelv hibái, sőt újabb alapvető elvi hibák is felmerültek.

Ezen kihívásokra válaszul a magyar illetékes minisztériumok 2023-ban elfogadtak egy új szabályozást, melyet részletes tanulmányok alapoztak meg. Ennek kidolgozásában a Budapesti Műszaki Egyetem koordinálásával számos szakember vett részt, és a folyamatot nyílt szakmai viták és egyeztetések kísérték. Az új szabályozásban a korábbi 176/2008 kormányrendelet módosult, és a 7/2006 TNM rendeletet felváltotta a 9/2023. (V. 25.) EKM rendelet (Csoknyai, et al., 2024) (7/2006 TNM Rendelet, 2006) (9/2023 ÉKM Rendelet, 2023) (Baumann, et al., 2016) (Szalay & Kiss, 2017).

Szalay a TNM rendeletben alkalmazott számítási metódussal kapcsolatban hibás és félreérthető részletekre hívta fel a figyelmet (Szalay, 2016).

A legfontosabb hőátbocsátási tényezőkre vonatkozó táblázat az adott korszakban meghatározott követelményértékek szerint a 2.1. táblázatban látható. A feltüntetett értékek a külső falra, lakóteret

határoló födémekre a nyílászárókra és a padlókra vonatkoznak. Ahol nem szerepel érték ott nem volt rá vonatkozó érték megadva.

2.1. táblázat A követelményértékek áttekintése Magyarországon 1920-2023 (Páger, et al., 2024)

Év	hőátbocsátási tényező [W/m ² K]				Rendelet/ szabvány
	külső fal	födém	nyílászáró	padló	
1920	1,5				12.600/XVI/137.sz. m. kir. Iparügyi min. rendelet
1965-79	1,36	0,8			ME 30-65
1979-86	0,85	0,4	3		MSZ 04.-140/2:-79
1986-91	0,7	0,4	2	1	MSZ 04.-140/2:-85
1992-2006	0,7	0,4	2	1	MSZ 04.-140/2:-1991
2006-2014	0,45	0,3	1,6	0,5	7/2006 (V.24.) TNM rendelet
2015-2023	0,24	0,26	1,15	0,3	7/2006 (V.24.) TNM rendelet
2023-	0,24	0,26	1,1	0,3	9/2023. (V.25.) ÉKM rendelet

Ezzel a témával Magyarországon több kutatás is foglalkozott, mely a lakóépület állományokat vizsgálta, erre készült egy lakóépületek tipológiai besorolása, ahol az adott építésre jellemző átlagos épületeket határozták meg, valamint foglalkoztak ennek energiamegtakarítási potenciáljával is ezt mutatja be a 2.2. táblázat (Csoknyai, et al., 2016).

2.2. táblázat Családi házak tipológiájának illusztrációja (Csoknyai, et al., 2016)

	családi ház			
	kisebb	nagyobb	vályog 1	vályog 2
-1944	3		1	2
1945-1959	4			
1960-1979	5	6		
1980-1989	7	8		
1990-2005	9	10		
2006-	11	12		

2.5. Épületenergetikai számítások választható módszerei energetikai tanúsítás során

Részletes módszer és szimuláció

Részletes módszer választása esetén az egy órás bontásban letölthető meteorológiai adatokat az illetékes minisztériumnak kell megadnia.

Az alábbi paramétereket kell biztosítani:

- Külső léghőmérséklet
- Külső abszolút és relatív nedvességtartalom, parciális vízgőznyomás, légnyomás
- Szélsébség és irány
- Sugárzási adatok vízszintes felületre (globál, direkt, diffúz, infravörös) és 8 féle tájolásra

(9/2023 ÉKM Rendelet, 2023) (Csoknyai, et al., 2024)

Egyszerűsített módszer

Egyszerűsített módszer esetében a fűtési hőszükséglet számítása során a fűtési határhőmérséklet függvényében kell figyelembe venni a hőfokhidat, valamint a fűtési idény hosszát. Ehhez a 2.3. táblázatban szereplő értékeket kell alkalmazni.

2.3. táblázat Havi külső hőmérséklet átlagértékek (9/2023 ÉKM Rendelet, 2023)

Hónap	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Éves
Átlagos külső hőmérséklet [°C]	2,1	-0,1	3,5	10,9	16,8	20,8	21,9	21	17,8	8,3	7,6	-0,1	10,9

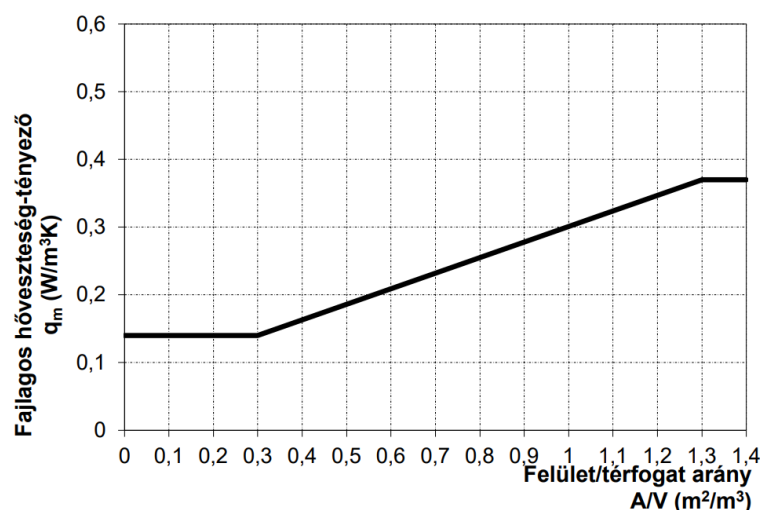
A/V arány

Az épületenergetikában alkalmazott egyik fontos mutatószáma az A/V arány, amely az épület külső felületének (A) és a belső térfogatának (V) aránya. Azt mutatja meg, hogy egy egységnyi térfogatú épülethez mekkora külső felület tartozik. Jelentősége, hogy az épület külső felületeinek aránya minél nagyobb, annál nagyobb a hővesztesége, az alacsonyabb A/V arányú épületek általában energiahatékonyabbak, mivel kisebb lehűlő felületekkel rendelkeznek. Az ÉKM rendelet 2. melléklete tartalmazza az A/V arány alapján megengedett legnagyobb fajlagos hőveszteség tényező értékét. A számítás során figyelembe kell venni az összes fűtött tereket határoló valamennyi szerkezetet, melynek értékeit a 2.4. táblázat tartalmazza.

2.4. táblázat A fajlagos hőveszteség tényező megengedett legnagyobb értéke közel nulla energiaigényű és jelentős felújítás alá eső épületek esetében

	A	B közel nulla energiaigényű épületek	B jelentős felújítás alá eső épületek
1	$A/V \leq 0,3$	$0,14 \text{ W/m}^3\text{K}$	$0,18 \text{ W/m}^3\text{K}$
2	$0,3 \leq A/V \leq 1$	$0,071 + 0,23(A/V) \text{ W/m}^3\text{K}$	$0,078 + 0,34(A/V) \text{ W/m}^3\text{K}$
3	$A/V \geq 1,3$	$0,37 \text{ W/m}^3\text{K}$	$0,52 \text{ W/m}^3\text{K}$

Az ÉKM rendelet 2. mellékletében a közel nulla energiaigényű épületek követelményeit mutatja be a 2.9. számú ábra.



2.9. ábra közel nulla energiaigényű épületek fajlagos hővesztés-tényező és A/V arány szerinti követelményértékek

2.6. Lakóépület fűtési energiaigényének modellezése és szimulációja

Az összetettebb rendszerek várható viselkedésének tanulmányozására kézenfekvő megoldást jelentenek a modellezés és szimuláció nyújtotta lehetőségek. A szimulációs eljárások előnye, hogy a vizsgált rendszer fizikai megvalósítása nélkül juthatunk eredményhez. Alkalmazása olyan esetekben előnyös, ahol túl komplikált, túl veszélyes vagy túlságosan drága lenne a megvalósítás. Lakóépületek esetében lefontosabb előny a gyors eredmény, és eltérő szerkezetek vagy környezeti paraméterek melletti vizsgálatokat lehet végezni. Ma már számos szoftver áll rendelkezésre ezeknek a vizsgálatoknak az elvégzéséhez (Farkas, et al., 1999). A különböző szoftverek más-más megközelítést alkalmaznak ezért az adott célhoz kell kiválasztani a megfelelő szimulációs szoftvert. Közös ezekben a szoftverekben, hogy gyors és költséghatékony vizsgálatot tesznek lehetővé.

A modellezés és a szimuláció révén teljesebb képet kaphatunk épített környezetünk várható viselkedéséről. Fontos tényező a külső hőmérséklet változása, és így az egyensúlyi hőmérséklet meghatározása. A beépített szerkezetek jelentős hatással vannak az épület viselkedésére (Mourshed, 2012), (Meng & Mourshed, 2017), (Vadiee, et al., 2019). A lakóépületek fűtési rendszerének modellezésére és szimulációjára a dinamikus rendszerek matematikai modellezése kínál megbízható megoldást. A modellezés során alkalmazott szimulációs szoftverek különböző matematikai módszereket használnak a rendszerek viselkedésének előrejelzésére. Ezek segítségével lehetővé válik a rendszer viselkedésének pontos és részletes elemzése, elősegítve ezzel a hatékonyabb és fenntarthatóbb megoldások tervezését is.

2.6.1 Blokkorientált modellezés

A blokkorientált megközelítés olyan modellezési eljárás, ami komplex rendszerek elemzésére alkalmazható. Elnevezését az alapépítőelemeiről kapta. Ez a fajta modellezés a vizsgálandó rendszert blokkokra vagy részrendszerekre osztja, ezeket az elemi blokkok összekapcsolásával építi fel a modellt, amiben a rendszer működése és viselkedése tanulmányozható. A blokkorientált modellezés alapelemei a blokkok, melyek az elemi részrendszereket vagy komponenseket jelentik meg. A blokkok ki- és bemeneti változókkal rendelkező függvények. Az egyes blokkok közötti kapcsolatok vonalakkal vagy nyilakkal vannak jelölve. A megjelenítést megkönnyítve a blokkok hierarchikus struktúrába rendezhetőek, ez megkönnyíti a modell áttekintését. A modell moduláris szerkezetű, ezáltal könnyen bővíthető, karbantartható és ismételten felhasználható. Az így kialakított modell fő előnye a modularitás és a vizuális megjelenítés, a blokkok könnyű és gyors változtathatósága. Blokkorientált modellezéssel vizsgálta Buzás és Kicsiny (2014) napkollektoros

rendszerek szabályozás tervezését, ahol felállították a rendszert leíró modellt, és annak átviteli függvényét. Elvégezték a linearizálását is. Azt a megállapítást tették, hogy a módszerük könnyen adaptálható más dinamikus rendszerek szabályozásához is (Buzás & Kicsiny, 2014).

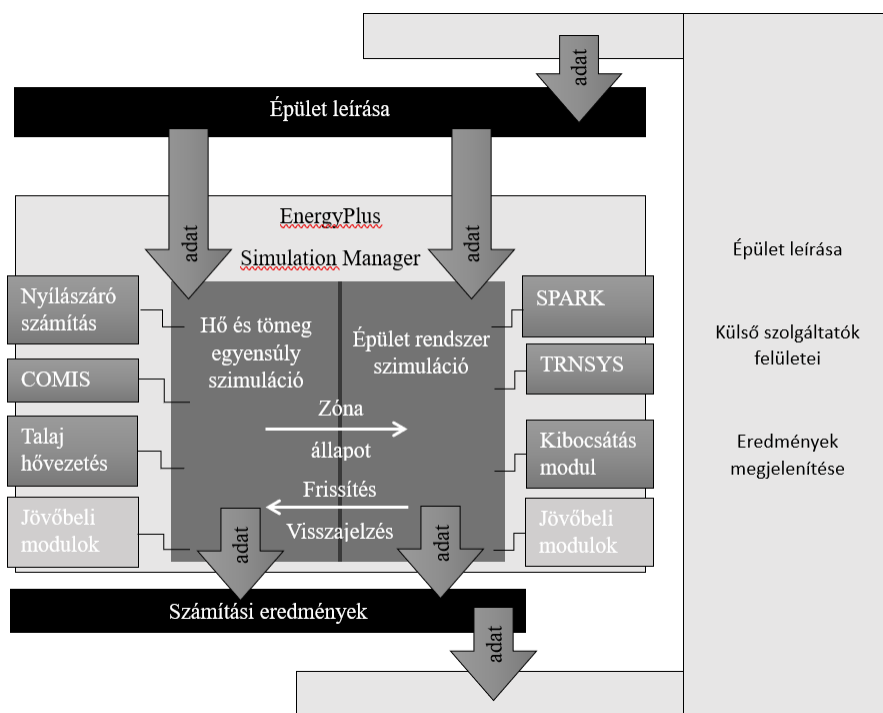
A blokkorientált modellezés terjedése szorosan kapcsolódik a számítási kapacitások elvégzéséhez rendelkezésre álló számítástechnikai eszközök fejlődéséhez, valamint modellezésre alkalmas szoftverek megjelenéséhez és fejlődéséhez is. Az egyik első blokkorientált megközelítést Richard Ernest Bellman alkalmazta a dinamikus programozás bevezetésével (Dreyfus, 2002).

2.6.2 Lakóépületek fűtési energiafelhasználásával kapcsolatos modellezés szoftverei

Mivel a gyakorlatban a folyamatok többsége nemlineáris, ezért ezek megoldásai is egyre nagyobb szerepet kaptak az elmúlt évtizedekben (Yang, et al., 2018), (Laurain, et al., 2010), (Xie & Lam, 2018), (Yin, et al., 2017). A szakirodalom széles körben vizsgálja a különböző alkalmazási területeken felállított modellek nemlineáris megközelítéseit (Rahrooh & Shepard, 2009), (Xiong, et al., 2014).

A lakóépületek esetében alkalmazott szimulációs szoftverek fejlődése is töretlen, folyamatosan fejlesztik őket. A leggyakrabban alkalmazott szoftverek többek között az EnergyPlus, Trnsys, Blast, therm, vagy a Magyar fejlesztésű Winwatt (Kassai, 2017), (Harish & Kumar, 2016), (Harmati, et al., 2015). A különböző szimulációs szoftvereket és módszereket hasonlította össze Coakley és társai az alkalmazott szoftverek szerint: DOE-2, EnergyPlus, Trnsys, ESP-r, ezek előnyeit hátrányait bővíthetőségét is megvizsgálva (Coakley, et al., 2014). A DOE-2 egy ingyenesen használható épületenergetikai szimulációs eszköz, amely óránként előrejelezi egy épület várható energiafelhasználását és energiaköltségét az óránkénti időjárési információk, az épület geometriájának épületgépészeti rendszerének, valamint az egyes energiahordozók költségének ismeretében. Fejlesztését U.S. Department of Energy az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma (DOE) finanszírozta (Winkelmann, et al., 1993), (Hirsch, 2022).

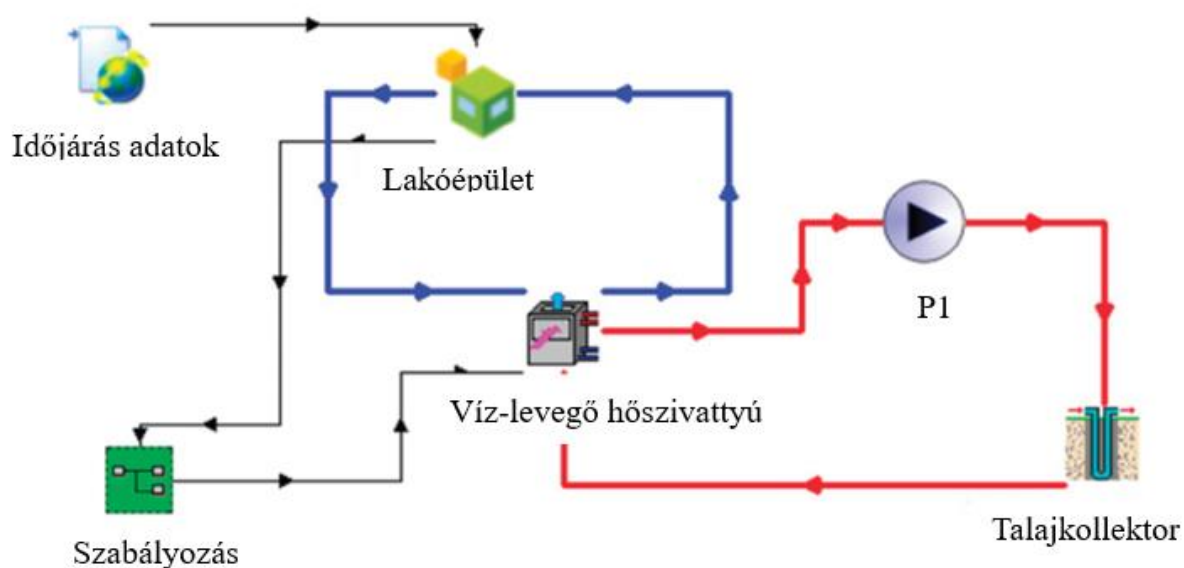
Az EnergyPlus rendszer tulajdonképpen a BLAST és a DOE továbbfejlesztése, ami ki lett bővítve valóságos szabályozási móddal, fűtési rendszerekkel és belső légáramlással. A fejlesztést az említett rendszerek nehéz bővíthetősége és testreszabhatósága indította el (Crawley, et al., 2001). Ennek a programnak a struktúráját szemlélteti a 2.10. ábra.



2.10. ábra Az EnergyPlus program struktúrája forrás: (Crawley, et al., 2001)

A TRNSYS rendszerszimulációs program első megjelenése 1979-ben volt. Moduláris szerkezettel rendelkezik, amely egy komponens-alapú szimulációs megközelítést valósít meg. Nevét a TRaNsient SYstems Simulation szavakból kapta. Moduláris jellege rugalmasságot biztosít a program számára és lehetővé teszi matematikai modellek hozzáadását a programhoz, alkalmas olyan rendszer részletes elemzésére, amelynek viselkedése időben változó. Fő alkalmazási területei közé tartoznak a napenergia rendszerek (napkollektoros és fotovoltaiikus rendszerek), alacsony energiaigényű épületek és épületgépészeti rendszerek, megújuló energiarendszerek, kogeneráció, üzemanyagcellák (Klein, 2017), (Beckman, et al., 1994).

Blokkorientált alkalmazására használták talajhős hőszivattyús rendszer megvalósításához, ahol négy különböző módot hasonlítottak össze, ez is jól szemlélteti a blokkorientált rendszerek használatának előnyeit, melyet a 2.11. ábra szemléltet.



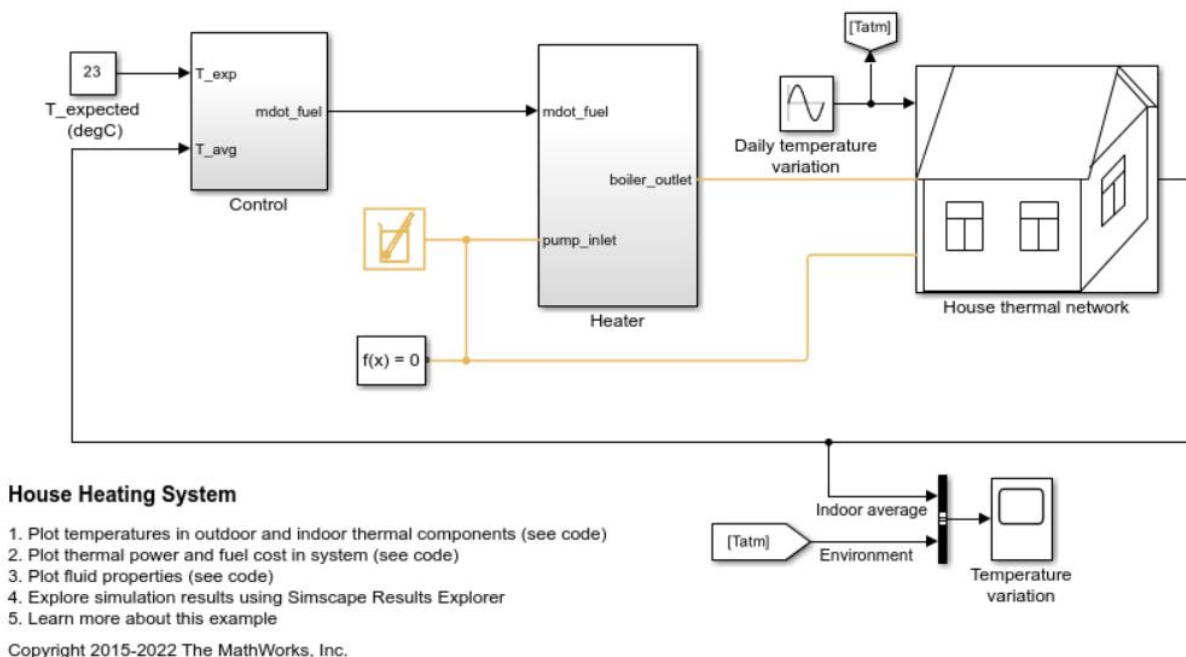
2.11. ábra Hőszivattyús rendszer megvalósítása TRNSYS környezetben, forrás: (Hu, et al., 2022)

A szimulációs szoftverek alkalmazhatóságának egyik legfontosabb eleme a validálhatóság, erre vonatkozóan végzett Witte és kutatótársai analitikai tesztekkel vizsgálatot, hogy a különböző szimulációs szoftverek DOE-2, BLAST, TRNSYS, ESP miként teljesítettek. Vizsgálták a matematikai megoldásokat, paraméterérzékenységi vizsgálatokat végeztek, a bemeneti értékek széles tartományán teszteteket hajtottak végre, valamint összehasonlították kísérlet adatokkal is (Witte, et al., 2001).

Egy átfogó tanulmányban az épületek teljesítményét vizsgálták szimulációs eljárással, jól szigetelt épületek esetében milyen viselkedési minta várható a klímaváltozások tükrében. EnergyPlus program és Monte-Carlo szimuláció ötvöztetésével hozták létre a különböző épület paramétert. Ahol azt a megállapítást tették, hogy a jól szigetelt épületek esetében a klímaváltozás hatása a fűtési energiaigényre jelentéktelen (Wang, et al., 2022).

A MATLAB különösen hasznos eszköz az épületek modellezéséhez, mivel különféle eszközkészletekkel (toolboxokkal) rendelkezik, amelyek speciálisan erre a célra kerültek kifejlesztésre. Az épületek energetikai modellezésére, strukturális elemzésére és belső környezeti viszonyainak szimulálására egyaránt használható. A MATLAB blokkorientált és integrált környezete lehetővé teszi a felhasználók számára, hogy gyorsan implementáljanak és teszteljenek komplex matematikai modelleket, ami időt takarít meg a fejlesztési és elemzési fázisban. A grafikus felhasználói felület, a Simulink és a különböző toolboxok, mint például az Optimization Toolbox vagy a Statistics and Machine Learning Toolbox, segítségével a MATLAB rendkívül rugalmas eszköz az épületek modellezésében, lehetővé téve a felhasználók számára, hogy pontos és részletes modelleket készítsenek (MathWorks, 2024). A 2.12. ábra egy Matlab mintát mutat be.

Model



2.12. ábra MATLAB családi ház modellezése minta, forrás: (MathWorks, 2024)

Egy 2012-es konferencián Karmacharya és szerzőtársai mutatták be eredményeiket, amely MATLAB Simulink környezetben végeztek. Megvalósították az épület termikus modelljét, szabályozási stratégiát dolgoztak ki, mely lehetővé tette az épületen belüli célhőmérsékletek elérését. A modellt tesztelték IEA Building Energy Simulation Test-el (IEA BESTest). Az épületek termikus burkainak változtatásával vizsgálták annak fűtési energiaigényét, szén-dioxid kibocsátását (Karmacharya, et al., 2012).

Az épületek energiaszükségleteinek megfelelő szinten tartása érdekében szükséges egy jól átgondolt és hosszú távú értékelés, ami a tervezéstől az üzemeltetésig tart. Ehhez nyújt segítséget a modellezés, ahol az adott épületre a finomhangolások elvégezhetőek, ennek egyik legfontosabb eleme a mérések és a validáció elvégzése (Jain, et al., 2021).

2.6.3 Hőátadás modellezése épületekben

A lakóépületeket vizsgálva jellemzően három megközelítési módot alkalmaznak. Akár az épületben tartózkodók hőkomfortjának, akár az épületgépészeti rendszerek vizsgálata céljából épületenergetikai modellezés alkalmazása lehet célszerű. A modellezés segítségével jobban megérthető a hőátadás egy termikus rendszer és környezete között. A modellek segítenek felmérni a bonyolult, szinergikus kapcsolatok hatását egy épület passzív és aktív rendszerei között. Ebben a szakaszban az épületenergetikai modellezést mutatom be. A következő három kategóriába sorolt épületenergetikai modelleket definiáljuk, és megvizsgáljuk alkalmasságukat: white-box-, black-box- és gray-box modellek.

Black-box vagy gray-box modelleket használnak, akkor ha nem ismert teljes egészében az adott rendszer elem felépítése. A másik megközelítés pedig a white-box modellek alkalmazása, ahol a rendszerkomponensek minden részlete ismert. Ez az eljárás bonyolultabb és nagyobb felkészültséget igényel, azonban teljes mértékben személyre szabható (Loyola-González, 2019).

2.6.3.1. White-box modell

A white-box modell egy nagyon részletes, fizikai alapokon nyugvó leírása egy termikus rendszernek, és képes pontos előrejelzést adni egy épületben lezajló energetikai folyamatokról

azáltal, hogy explicit módon modellezi az összes fizikai folyamatot, amely jelentős szerepet játszik az energiamérlegében (Gonzalez-Vidal, et al., 2017).

A white-box modellek a széleskörű paraméterkészlet beépítésével figyelembe veszik az épület fizikai tulajdonságait, rendszereit és környezeti feltételeit. Pontosságuk miatt számos épületszimulációs szoftvereszköz létezik, amely a white-box modellezési megközelítésre támaszkodik. A white-box modellek nagyon részletes előrejelzéseket képesek produkálni; ezek a modellek számos bemeneti adatot, jelentős számítási kapacitást és magas időráfordítást, valamint speciális ismereteket igényelnek (Coakley, et al., 2014).

A modell bemeneti adatai általában kinyerhetőek a tervekből, gyártási katalógusokból vagy helyszíni ellenőrzések során; azonban ezek közül néhány bemeneti adat gyakran nehezen beszerezhető, vagy akár elérhetetlen is lehet időnként (Gonzalez-Vidal, et al., 2017). Bár a modell bemeneti adatai rendelkezésre állnak, jelentős időre van szükség a modellt egy adott épületre alkalmazni. Az épületek kimerítő vizsgálata miatt a white-box modellek nem praktikusak nagyméretű alkalmazásra meglévő lakóépület-állományon.

2.6.3.2. Black-box modell

Black-box modellek egy adat vezérelt (vagy inverz) megközelítést használnak a modellfejlesztés során, kizárólag adattudományi technikákra és a vizsgált épület teljesítményadataira támaszkodva. Nagyon rövid fejlesztési idővel a black-box modellek képesek matematikai reprezentációt kifejleszteni, amely megragadja az ismert bemeneti és kimeneti változók közötti kapcsolatot (azaz a fontos befolyásoló változókat és az észlelt épület viselkedését); ezt a matematikai modellt és becsült együtthatóit fel lehet használni az épületrendszer viselkedésének reprodukálására (Gonzalez-Vidal, et al., 2017).

A fizikai környezethez való meghatározott kapcsolat hiánya azt jelenti, hogy a black-box modellek épületspecifikusak, és nem használhatók a tervezési vagy üzemeltetési változások hatásának meghatározására (Coakley, et al., 2014).

Az általánosság hiánya miatt a black-box modellek tehát nem alkalmasak a termikus viselkedés összehasonlítására a meglévő épületek széles körében. A szakirodalomban több példa is megtalálható adat alapú modellezési technikákra, amelyeket az épületenergetikai modellezés területén használnak, beleértve a többszörös lineáris regressziót is (Tabasi, et al., 2016), (Patonai, et al., 2022), (Moretti, et al., 2021), vagy a neurális hálózatokat és vektor alapú megközelítéseket (Elbeltagi & Wefki, 2021), (Verma, et al., 2020).

2.6.3.3. Gray-box modell

A gray-box modellek kompromisszumot képeznek a white-box és a black-box modellek között. Ezek egyszerűsített, fizikai alapokon nyugvó modellek, amelyek egy inverz modellezési megközelítést használnak a kulcsfontosságú rendszerparaméterek becslésére a mért épület adatok alapján (Gonzalez-Vidal, et al., 2017).

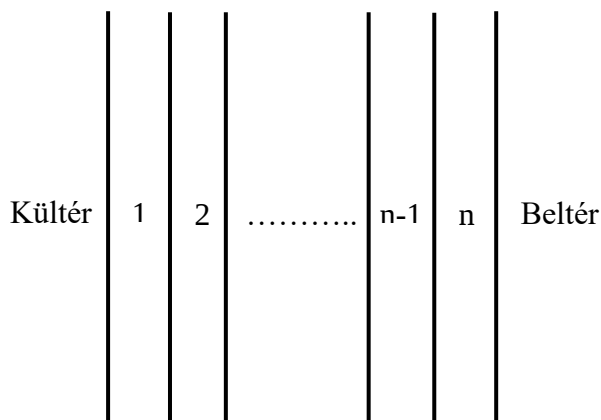
Miután azonosították a paramétereiket, a rendszert numerikusan meg lehet oldani. A gray-box modellek kihasználják az épületenergetikai rendszer fizikai ismereteit, hasonlóan a white-box modellekhez, de egyszerűsített verziók, rövidebb fejlesztési idővel, az épület teljesítményadatok integrálásának köszönhetően. Hibrid jellegük miatt a gray-box modellek alkalmasak épületek összehasonlítására egy nagy lakóállományban, de csak a becsült kulcsfontosságú fizikai paraméterek tekintetében (Coakley, et al., 2014).

A gray-box modellezés, mint például a hőátviteli ellenállás, hőkapacitás és hőáramhálózati (RC) modell, fizikai alapokon nyugszik és matematikai optimalizációs technikákat használ a modell ekvivalens fizikai paramétereinek becslésére. Ez a megközelítés ötvözi a white-box modellezés előnyeit az eltérések kiküszöbölése és a black-box modellezés előnyeit a részletes információk iránti szükséglet csökkentése érdekében. A gray-box modellek egyensúlyt teremtenek az

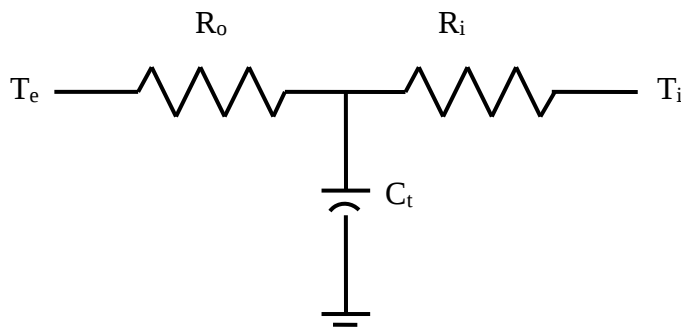
értelmezhetőség és a pontosság között, ezáltal különösen alkalmasak a vezérlőrendszerekbe való integrálásra. Az RC modellek egy sor ekvivalens modellparaméteren alapulnak, ahol az ellenállások (R-ek) a hőátviteli ellenállásokat képviselik, amelyek hasonlóak a különböző épületkomponensek, mint például a falak, tetők vagy ablakok által kínált hőáramlási ellenálláshoz. Magasabb ellenállási értékek lassabb hőátvitelt jeleznek, ami például jól szigetelt falak esetében fordulhat elő. Alacsonyabb ellenállási értékek gyorsabb hőátadást jeleznek, mint például egy rosszul szigetelt ablak esetében, és a kapacitások (C-k), amelyek a hőkapacitásokat képviselik, azaz egy csomópont vagy komponens hőenergia-tárolási kapacitását. A 'C' érték azt mutatja, hogy mennyi hőenergiát képes egy komponens tárolni és leadni. Magasabb 'C' értékű komponensek több hőt képesek elnyelni és tárolni, ami lassabb hőmérsékletváltozásokat eredményez, míg az alacsonyabb 'C' értékűek gyorsan reagálnak a hőingadozásokra, ami gyors hőmérsékletváltozásokat eredményez. Ez szemlélteti, mennyi hőenergia tárolható és szabadítható fel ezekben a csomópontokban. Ezek a modellparaméterek összekapcsolják a rendszer bemeneteit (pl. fűtési és hűtési ellátás) és a hőmérsékleti állapotokat. A gray-box modellezési megközelítést széles körben használták a hődinamikai modellezésben. Egy megbízható vezérlőrendszer fejlesztése mellett szükség van egy megbízható becslési technikára is, amely integrálható az RC modellekkel a rendszerek viselkedésének pontos becsléséhez, különösen a fűtési és hűtési ellátás (azaz az RC modell bemenet) becsléséhez (Cengel & Ghajar, 2014), (Zamani, et al., 2024). Ez a fajta megközelítés nagy múltra tekint vissza (Burnand, 1954).

Az RC hálózatokat gyakran használják az épületek termikus viselkedésének pontos modellezésére. (Li, et al., 2021), (Reynders, et al., 2014), (Harb, et al., 2016).

Az épületek határoló szerkezetei több különböző anyagból álló rétegből tevődik össze, amelyek mindegyikét a vastagsága, hővezetési képessége, fajlagos hőkapacitása és sűrűsége határozza meg, ahogy a 2.13. ábrán látható. Ezzel a módszerrel egy n rétegből álló anyagelem kombinálható, hogy két "összevont" hőátviteli ellenállást (R_i ; R_o) és egy hőkapacitást (C_t) alkossanak, ahogy az a 2.14. ábrán szemléltetve van.



2.13. ábra Többrétegű építőelem szemléltetése (Gouda, et al., 2002)



2.14. ábra Többrétegű építőelem RC modellként ábrázolva (Gouda, et al., 2002)

Az összesített hőátadási ellenállás és hőkapacitás a következő egyenletekkel számítható:

$$R_t = \frac{(r_{si} + r_{so} + r_a + \sum_{l=1}^{l=n} \frac{x_l}{k_l})}{A} \quad (2.15)$$

$$C_t = A \sum_{l=1}^{l=n} (x_l \rho_l c_l) \quad (2.16)$$

Az alkalmazott módszer kiválasztása az adott módszer előnyeinek és hátrányainak mérlegelésén múlik. Még a legrészletesebb modellek is csak közelítések a valós folyamatokhoz; feltételezéseken alapulnak és tartalmaznak bizonyos hibafokot. Ezzel szemben még a meglehetősen korlátozott modellek is hasznos közelítéseket nyújthatnak, és szerkezetük segíthet megérteni, hogyan működnek a dinamikus termikus rendszerek. A modell felbontása (vagyis a részletesség és összetettség foka) a modell alkalmazásának szándékától, az alkalmazás által igényelt pontossági szinttől és a modell kulcsparamétereinek azonosításához használt adatoktól függ (Athienitis & O'Brien, 2015).

2.7. Differenciálegyenletek numerikus megoldási módszerei

A differenciálegyenletek numerikus megoldására többféle módszer alkalmazható, amelyek két fő csoportba sorolhatók: az explicit és implicit módszerekbe. Mindkét esetben az a cél, hogy adott egy rendszer állapota egy t_n időpontban, valamint ismerve a deriváltakat t_n időpontban, a lehető legjobb becsléssel lehessen meghatározni a rendszer változóit egy későbbi $t_n + \Delta t$ időpontban.

A blokkorientált szimuláció során az általam alkalmazott matematikai modellek között előfordulnak első és magasabb rendű differenciálegyenletek, melyek megoldása számítógépes környezetben történik. Ezek a numerikus megoldásokat használhatóak a modellek szimulációinak elvégzésére. Emiatt kiemelkedő fontossággal bír ennek a témakörnek a bemutatása és megértése.

Az elsőrendű közönséges differenciálegyenletek megoldásához számos numerikus módszer létezik, míg a magasabb rendű differenciálegyenleteket elsőrendű differenciálegyenlet-rendszerekké alakítjuk át, hogy azok is hasonló módon megoldhatóak legyenek.

A differenciálegyenletek olyan egyenletek, amelyekben az ismeretlen egy függvény, és az egyenletben különböző rendű deriváltjai szerepelnek ugyanabban az időpillanatban. A differenciálegyenlet rendje az ismeretlen függvény az egyenletben előforduló legmagasabb rendű deriváltjának a rendje.

Az egyenletek megoldásához kezdeti feltételek megadása szükséges, míg magasabb rendű differenciálegyenleteknél peremfeltételek is megadhatóak.

A közönséges differenciálegyenletek vagy differenciálegyenlet-rendszerek numerikus megoldása felesleges, ezért is kerül előtérbe, mert a valós problémákat leíró differenciálegyenletek nagy része analitikus formában nem oldható meg. Ez azt jelenti, hogy nincs ismert zárt alakú megoldásuk. Ennek következtében szükség van numerikus módszerek alkalmazására, hogy közelítő megoldásokat találjunk ezekre a problémákra.

A számítógépes modellezés során használt differenciálegyenletek megoldására alkalmazható numerikus módszereket mutatok be melyek például a következő csoportokba sorolhatóak:

A numerikus eljárások valamekkora hibával rendelkeznek. Ez az analitikus és a numerikus megoldás különbsége a globális hiba, melyet O-val jelölünk

2.7.1 Egyszerű iterációs módszerek -Euler módszer

Az Euler-módszer az egyik legegyszerűbb numerikus módszer differenciálegyenletek megoldására. Alapelve az idő diszkretizációja és a deriváltak numerikus közelítése. A módszer lépéseit az alábbiak szerint határozza meg:

Diszkretizáció: Az időt egy előre meghatározott lépésközzel osztjuk fel, például Δt -vel.

Közelítés: Az első deriváltakat a jelenlegi időpillanatban lévő értékekre alapozva becsüljük meg. A következő értéket az alábbi formulával számoljuk:

$$y_{n+1} = y_n + \Delta t \cdot f(t_n, y_n) \quad (2.17)$$

ahol y_{n+1} a becsült érték a t_{n+1} időpontban, y_n a jelenlegi érték t_n időpontban, $f(t_n, y_n)$ pedig a differenciálegyenlet jobb oldalán található függvény értéke a (t_n, y_n) pontban.

Az Euler-módszer egyszerűsége és könnyű implementálhatósága miatt népszerű, de azáltal, hogy csak az előző lépés információit használja, néha pontossági korlátokhoz vezethet, különösen komplexebb rendszerek esetén.

Az Euler-módszer hibája az, hogy a numerikus közelítés során történő egyszerűség miatt lehetőséget ad a hibák kumulációjára, amelyek az időbeli előrehaladással növekedhetnek. Ezt az Euler-módszer lokalizált hibája és a numerikus hiba felhalmozódása jellemzi.

Az Euler-módszer lényegében egy lineáris extrapoláció az aktuális pontból a következő pont felé. A deriváltakat az aktuális pontban értékeljük ki, majd ezeket használjuk a következő pont becslésére. Azonban, ha az eredeti függvény görbéje nem lineáris a kis időlépésekben, akkor az Euler-módszer pontatlanná válhat.

Globális hiba $O(\Delta t)$ miatt, hosszú intervallumok esetén a pontossága jelentősen csökkenhet, ezért használata nem javasolt, mert az Euler-módszer a kisebb időlépésekkel történő közelítésre támaszkodik, így a hibák folyamatosan felhalmozódnak az időbeli iterációk során (Cormen, et al., 2001). Minél több lépést teszünk az időben, annál nagyobb lesz a hibafelhalmozódás. Ez a hiba idővel növekszik és jelentős lehet a hosszabb időtartamokra történő számításoknál. A módszer hibája korlátozhatja az eredmények pontosságát és megbízhatóságát hosszabb időtartamokra vagy magasabb rendű differenciálegyenletek esetén.

2.7.2 Módosított Euler-módszer (középponti-módszer)

A módosított Euler-módszer pontosítja az Euler-módszert azzal, hogy két lépésben számolja ki a következő értéket.

Első lépés (feljavított becslés): Először egy köztes értéket számolunk, ami a jelenlegi lépés közepén található. Ez az érték az Euler-módszer alkalmazásával számolható, de a lépésköz felezésével. Tehát:

$$y_{n+\frac{1}{2}}^* = y_n + \frac{\Delta t}{2} \cdot f(t_n, y_n) \quad (2.18)$$

Második lépés (a végső érték kiszámítása): A következő érték kiszámítása a köztes értékből történik, azaz:

$$y_{n+1} = y_n + \Delta t \cdot f\left(t_{n+\frac{1}{2}}, y_{n+\frac{1}{2}}^*\right) \quad (2.19)$$

A módosított Euler-módszer pontosabb eredményeket nyújthat, mivel a köztes lépés lehetővé teszi a pontosabb becslést a deriváltakra, így kisebb hibát eredményezhet a végeredményben a hagyományos Euler-módszerhez képest. Bár a módosított Euler-módszer javít a hagyományos Euler-módszer hibáján, mivel a köztes lépés lehetővé teszi pontosabb becslést a deriváltakra, még mindig lokalizált hibát eredményezhet. Az időközben végzett lineáris interpolációk és az apróbb lépések közötti folytonosság hiánya bizonyos esetekben továbbra is pontatlanságot eredményezhet.

Globális hibája $O(\Delta t^2)$ ami azt jelenti, hogy a hiba nagysága az alkalmazott lépésköz négyzetével arányosan csökken. Tehát minél kisebb a lépésköz, annál kisebb lesz a hiba. A módszer pontossága növekszik, ahogy csökken a lépésköz. A hiba gyorsabban csökken, mint lineáris módszerek esetén. Az esetleges hibák és korlátok ellenére sok alkalmazási területen hasznos lehet a számításokban.

Az optimális módszer kiválasztása mindig az adott probléma sajátosságaitól és a szükséges pontossági követelményektől függ.

2.7.3 Másod- és magasabb rendű módszerek

Differenciál egyenletek esetében alkalmazott közelítő eljárások

RK2 (Klasszikus másodrendű Runge-Kutta):

$$k_1 = \Delta t \cdot f(t_n, y_n) \quad (2.20)$$

$$k_2 = \Delta t \cdot f\left(t_n + \frac{\Delta t}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) \quad (2.21)$$

Becslés:

$$y_{n+1} = y_n + k_2 \quad (2.22)$$

RK3 (Harmadrendű Runge-Kutta):

$$k_1 = \Delta t \cdot f(t_n, y_n) \quad (2.23)$$

$$k_2 = \Delta t \cdot f\left(t_n + \frac{\Delta t}{2}, y_n + \frac{k_1}{2}\right) \quad (2.24)$$

$$k_3 = \Delta t \cdot f(t_n + \Delta t, y_n - k_1 + 2k_2) \quad (2.25)$$

Becslés:

$$y_{n+1} = y_n + \frac{1}{6} \cdot (k_1 + 4k_2 + k_3) \quad (2.26)$$

Adaptív lépéshosszú Runge-Kutta módszerek:

Ezek a módszerek rugalmasan változtatják a lépéshosszt a hibatűrés alapján, hogy a számítások hatékonyságát növeljék.

A mérnöki gyakorlatban RK5 (ötödrendű Runge-Kutta) módszer is használatos.

A Runge-Kutta módszerek O értéke attól függ, hogy melyik változatát alkalmazzuk és milyen rendű módszerről van szó (Lindfield & Penny, 2019). Az O érték meghatározza, hogy a hiba milyen arányban változik a lépésközzel, és ez segít becsülni, hogy mennyire pontos lesz a módszer az adott feladaton, RK2 esetén $O(\Delta t^2)$, RK3 esetén $O(\Delta t^3)$, RK4 esetén $O(\Delta t^4)$.

2.7.4 Butcher táblázatok

Dormand és Prince (1980) Butcher táblázatok segítségével megadhatóak az eljárások során alkalmazandó együtthatók (Butcher, 2016). A módszerek lépései és súlyozásai a Butcher táblával ábrázolhatóak.

A táblázat első oszlopában a Δt tényező együtthatója szerepel a t_n függvényében. A táblázat jobb oldalán szereplő értékek az iterációs lépésközök együtthatóit adja meg soronként. A táblázat alsó sora az egyes tényezők súlyát adja meg.

A módosított Euler (felezőpontos) módszer Butcher táblázat szerinti megjelenítését a 2.5. táblázat tartalmazza:

2.5. táblázat a módosított Euler módszer Butcher táblázata (forrás: saját szerkesztés (Butcher, 2016) könyve alapján)

0	
1/2	1/2
	0 1

A Klasszikus Runga-Kutta módszeré 2.6. táblázatban látható:

2.6. táblázat A klasszikus Runga Kutta módszer Butcher táblázata (forrás: saját szerkesztés (Butcher, 2016) könyve alapján)

0				
1/2	1/2			
1/2	0	1/2		
1	0	0	0	
	1/6	1/3	1/3	1/6

2.7.5 További módszerek

Ezen a módszereken kívül még számos módszer létezik:

Többek között Crank-Nicolson módszer, melynek alapelve az implicit és explicit módszerek kombinációja a trapéz szabály alapján, vagy Adams-Bashford és Adams-Moulton módszerek, amik többlépéses iterációval számolják ki a jövőbeli értéket az előző értékek alapján. Az Implicit Euler-módszer stabilitást biztosít és kevésbé érzékeny a numerikus hibákra, mivel az aktuális lépést az előző és a jövőbeli értékek között számolja ki. A Crank-Nicolson módszer implicit és explicit lépéseket kombinál, ami általában pontosabb eredményeket eredményez. Az Adams-Bashford és Adams-Moulton módszerek többlépéses eljárások, amelyek iteratíván számítják ki a jövőbeli értékeket az előző értékek alapján.

A véges differenciál módszert gyakran alkalmazzák differenciálegyenletek diszkretizálására, hogy könnyebben kezelhető differenciaegyenleteket kapjanak. Ide sorolhatóak még a véges elem módszerek is, amelyek a differenciálegyenletek diszkretizálásával vezetnek közelítő megoldásra.

Multistep módszerek: Ezek a módszerek előre és/vagy hátra mutató lépéseket alkalmaznak az új pontok értékeinek kiszámítására, több korábbi pont felhasználásával.

Diszkrét válasz módszer: Ezek a módszerek az impulzusokra adott válaszokat modellezik a rendszerekben.

Spectral módszerek: A differenciálegyenleteket Fourier-transzformációkkal vagy más spektrális módszerekkel közelítik és oldják meg.

Finite Element módszer (Véges Elem módszer): Általában szerkezetek mechanikájában, hőátadásban, elektromágnesességben használt módszer, amely a teret véges elemekre osztja fel.

Párosított differenciálegyenletek módszerei: Az olyan rendszerek megoldására alkalmazzák, amelyek több összefüggő differenciálegyenletet tartalmaznak.

Collocation módszer: Ez a módszer a differenciálegyenleteknek az interpolációval történő közelítésén alapszik.

2.7.6 Magasabb rendű egyenletekre alkalmazható módszerek

Az elsőrendűvé alakítás módszerével magasabb rendű differenciálegyenleteket alakítanak át elsőrendű egyenletek sorozatává, így az előző módszerek alkalmazhatóvá válnak rájuk.

Ezen módszerek alkalmazhatók különböző differenciálegyenletek típusaira és speciális tulajdonságaira. Az optimális eljárás kiválasztása a probléma jellegétől, a számítások pontosságától és az elvárt eredmények precizitásától függ. A differenciálegyenletek numerikus megoldásánál kiemelten fontos a módszerek hatékonyságának és pontosságának egyensúlyba hozása az adott problémakör kontextusában.

2.8. A modellezés során alkalmazott numerikus módszer

A MATLAB számos beépített *Ordinary Differential Equation* (ODE) módszerrel rendelkezik. Ezek közül a modellezés során az ode45 módszert alkalmaztam. Ez egy adaptív lépéshossz kontrollal rendelkező numerikus módszer a differenciálegyenletek megoldására. A módszer Runga-Kutta-Fehlberg (RKF45) szerint történik (Fehlberg, 1964). Ennek Butcher táblázat szerinti megjelenítése a 2.7. táblázatban látható (Ode45, 2023).

2.7. táblázat ODE45 függvény Butcher táblázata (forrás: saját szerkesztés (Butcher, 2016) könyve alapján)

0					
1/4	1/4				
3/8	3/32	9/32			
12/13	1932/2197	-7200/2197	7296/2197		
1	439/216	-8	3680/513	-845/4104	
1/2	-8/27	2	-3544/2565	1859/4104	-11/40
	25/216	0	1408/2565	-1/5	0
	16/35	0	6656/12825	-9/50	2/55

Működési elve:

Lépéshossz Kontrollt alkalmaz, az ode45 kezdetben kisebb lépéshossz alkalmazásával kezdi meg a számítást, majd adaptív módon változtatja a lépéshosszt az egyenletrendszer tulajdonságainak figyelembevételével. Adaptív lépéshossz-szabályozás révén igyekszik fenntartani a megoldás pontosságát a megadott toleranciahatárok között.

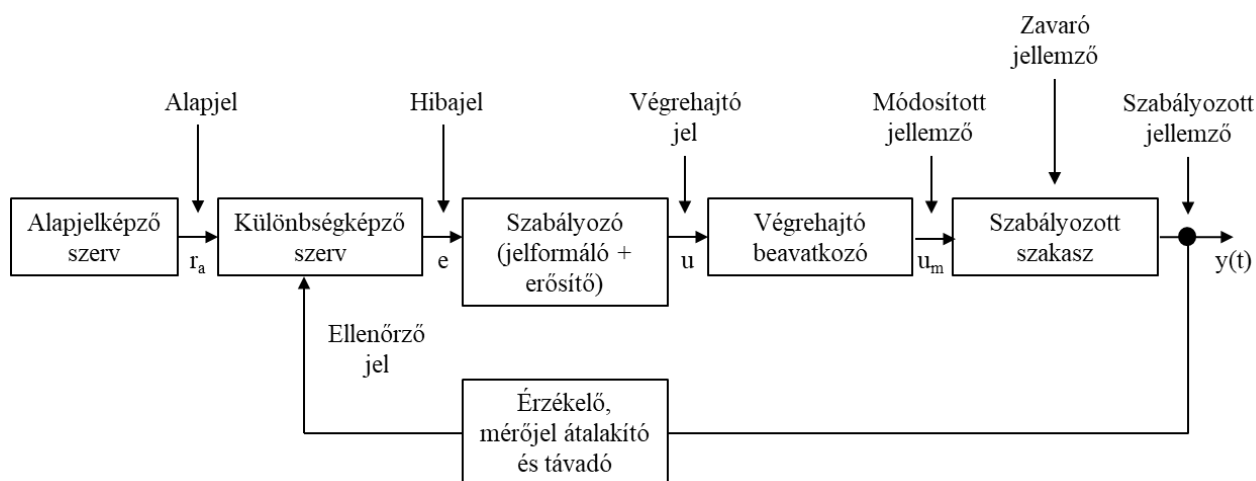
Az ode45 a klasszikus negyedrendű Runge-Kutta eljárást alkalmazza. Az algoritmus két különböző lépéshosszúságú lépést hajt végre: egy negyedrendű és egy ötödrendű Runge-Kutta lépést. Az ötödrendű lépés pontosabb, de több számítási kapacitást igényel, így ezt az értéket használja a lépéshossz-szabályozás során a pontosság javítása érdekében.

Interpoláció. Az ode45 a negyedrendű és az ötöd rendű lépések közötti különbséget felhasználva interpolál a lépések közötti értékekre, így meghatározza a megoldás pontosabb értékeit.

Az ode45 figyelembe veszi a megadott tolerancia értéket az adaptív lépéshossz-szabályozás révén. Az algoritmus igyekszik fenntartani a megadott toleranciahatárok közötti pontosságot, és a lépéshosszt ezeknek megfelelően szabályozza.

2.9. Szabályozástechnika

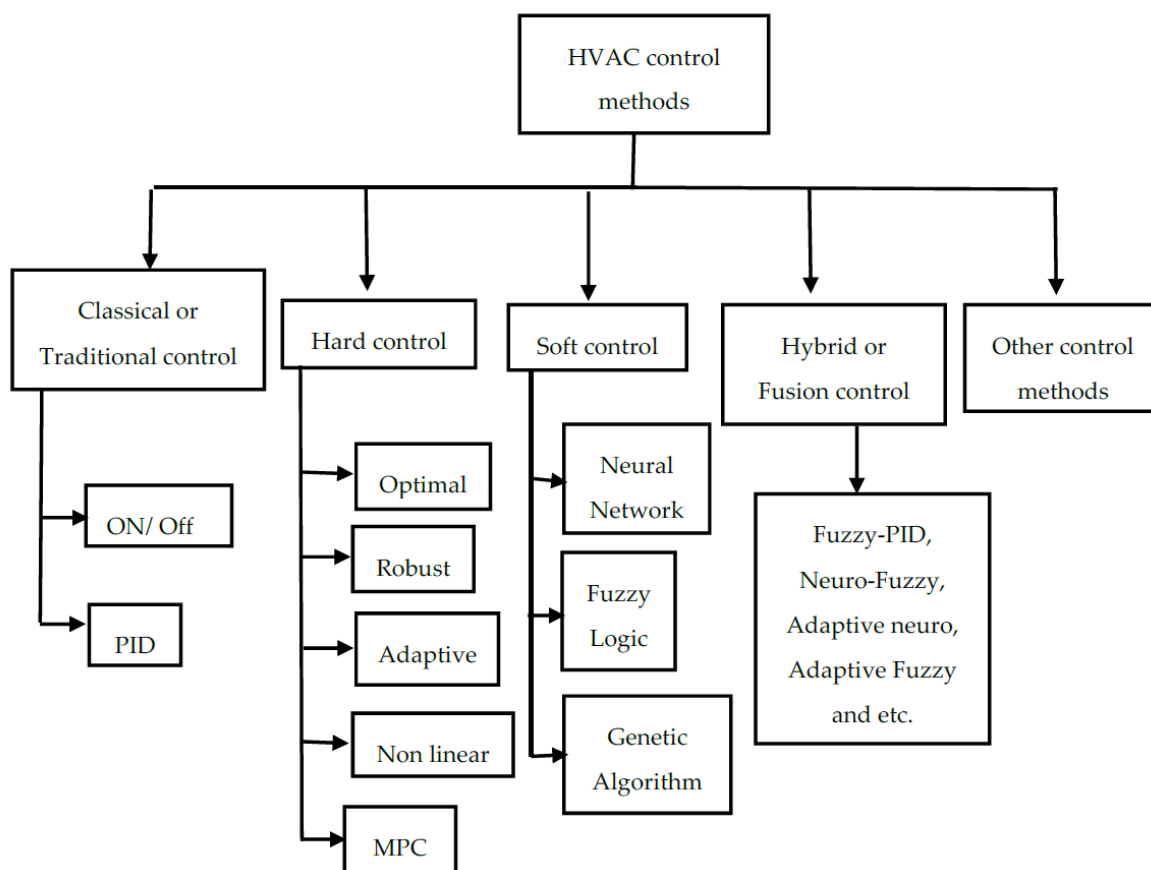
A szabályozás olyan folyamat, amelynek során egy rendszer vagy kimenetét vagy viselkedését egy előre meghatározott alapjel követése érdekében automatikusan módosítják. A szabályozás lényege, hogy a folyamat kimeneti jellemzőjéről van visszacsatolás. A 2.15. ábrán látható a szabályozás hatásmechanizmusának felépítése. A szabályozó célja az alapjel és a szabályozott jellemző közötti különbség minimalizálása (Farkas, 2001).



2.15. ábra Szabályozás hatásmechanizmusa

Tipikus példa a hőmérséklet-szabályozás egy fűtési rendszerben, ahol a szobahőmérsékletet egy termosztát szabályozza az előre beállított érték körül. Az épületgépészetben általánosan használt szabályozási módok az On/Off, a folytonos- és a PID szabályozók alkalmazása.

Az épületgépészeti rendszerekben a leggyakrabban alkalmazott szabályozások feloszthatóak hagyományos, hard control, soft control, hibrid és egyéb szabályozási módszerekre. Ezek a rendszerek tovább oszthatók alcsoportokra. Ennek szemléltető ábráját mutatja be a 2.16. ábra.



2.16. ábra Épületgépészetben alkalmazott szabályozások egy lehetséges csoportosítása (Behrooz, et al., 2018)

A szakirodalom kiemeli, hogy az épületgépészeti szabályozások jellemzően nemlineáris, összetett rendszerek. Valóságban a legtöbb rendszer több bemenettel és kimenettel rendelkezhet. Az

épületgépészeti rendszerek fő szabályozási nehézsége a rendszerparaméterek változása: a változó paraméterek és az éghajlati paraméterek közötti kölcsönhatások, valamint a modell bizonytalansága. Emiatt a lineáris szabályozások nem tudnak megfelelő teljesítményt- és stabilitást nyújtani (Afram & Janabi-Sharif, 2014).

A hagyományos szabályozások körébe tartoznak az on/off szabályozók és PID szabályozók is. Ezeket a rendszereket az egyszerűségük és alacsony költségük miatt részesítik előnyben (Mirinejad, et al., 2008).

Állásos vagy on/off szabályozók

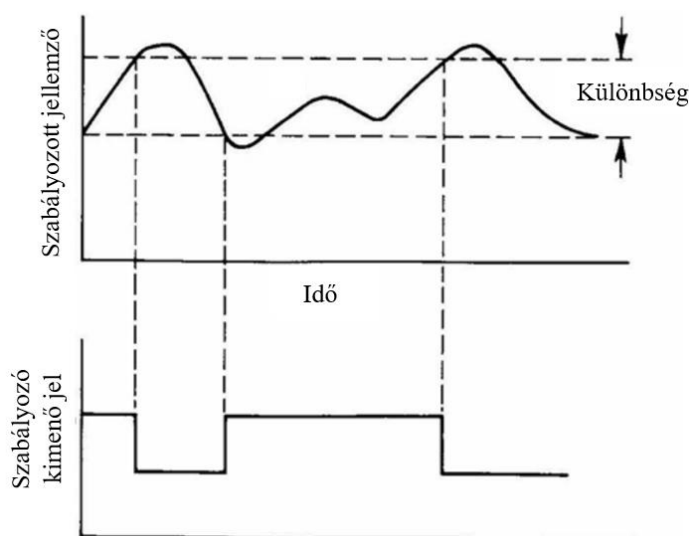
Az állásos szabályozók, amelyeket gyakran on/off szabályozóknak is hívnak, a legegyszerűbb típusú szabályozók, amelyeket széles körben alkalmaznak különféle ipari és háztartási rendszerekben. Ezek a szabályozók két állapot között kapcsolnak: bekapcsolva (on) vagy kikapcsolva (off).

Működési alapelvük: Alapjel (setpoint): Az állásos szabályozó egy előre meghatározott referenciaértéket (setpoint) használ, ami a kívánt szabályozott jellemző értéket jelenti. A szabályozó folyamatosan figyeli a rendszer szabályozott jellemzőt, és összehasonlítja az alapjellel. A kapcsolási döntést egy kétállású hiszterézises relé végzi. A relének négy beállítási paramétere lehet:

- A beállítható bemeneti jel értéke, amelynél a relé bekapcsol.
- A beállítható bemeneti jel értéke, amelynél a relé kikapcsol.
- A kimenő jel értéke a bekapcsolt állapotban.
- A kimenő jel értéke a kikapcsolt állapotban.

A relé bemenő jele az alapjel és a pillanatnyi szabályozott jellemző különbsége. Ezen bemenő jel alapján történik a be- és kikapcsolás. Az állásos szabályozók gyakran rendelkeznek hiszterézissel, amely megakadályozza a rendszer túl gyakori be- és kikapcsolását. Ez hosszabb élettartamot biztosít a rendszerelemeknek és javítja a rendszer stabilitását.

Az állásos szabályozó kimeneti értékei csak a maximális érték vagy nulla lehet. A 2.17. ábra egy állásos szabályozó bináris működését és a szabályozott érték alakulását mutatja be.



2.17. ábra Az állásos szabályozó működés közben (Mirinejad, et al., 2008)

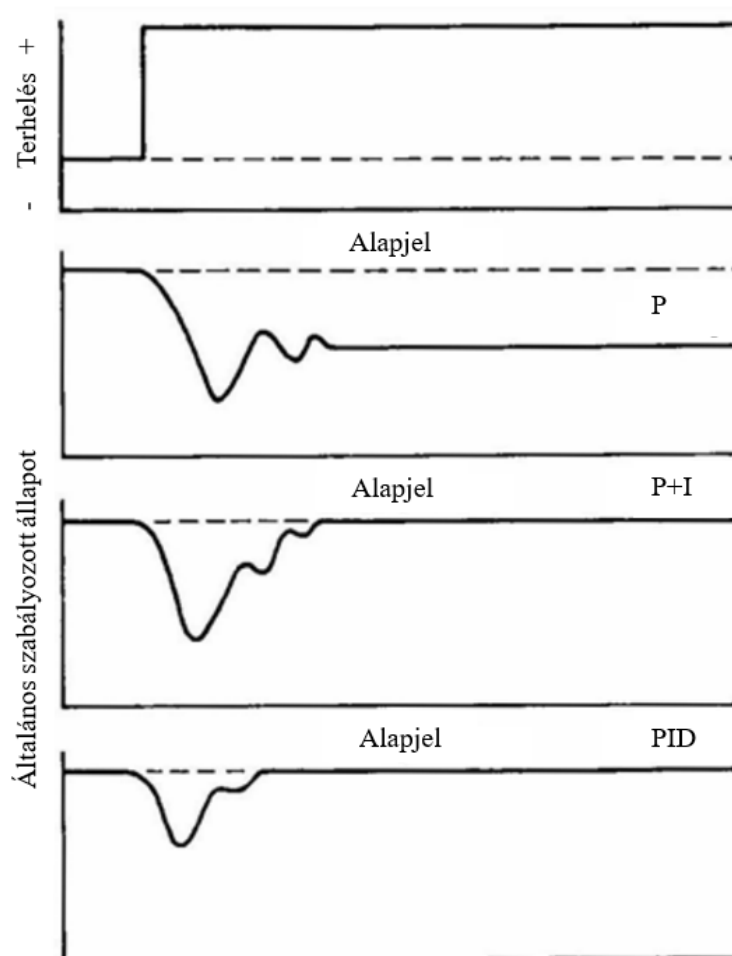
Ez a típus jellemzően pl. a termosztát, nyomáskapcsoló, párapcsoló, melyek csupán ki- vagy bekapcsolásra képesek. A módszer egyszerűsége miatt nem elég pontos (Perera, et al., 2014).

PID szabályozók

A hagyományos szabályozási módok másik típusa a PID szabályozók. A PID szabályozók visszacsatolások szabályozók, melyek figyelembe veszik a rendszer hibáit, vagyis a szabályozott jellemzőről érkező ellenőrző jel és az alapérték közötti különbségeket. A P az arányos tag, az eltolásra vonatkozik, az I az integráló tag a múltbelli hibák felhalmozására vonatkozik, a D a deriváló tag a folyamat változási sebességének figyelembevételére szolgál. A PID szabályozások azért alkalmazhatók az épületek fűtési rendszereiben, mert a termikus folyamatok az épületekben lassú folyamatoknak tekinthetők, amelyekben arányos szabályozó használható a hőmérséklet szabályozására elfogadható kis statikus hibával és jó stabilitással. A 2.17. ábrán, a tisztán arányos (P) kompenzálás esetében a szabályozás minősége az arányos tag átviteli tényezőjének értékétől függ. Nagyon kis arányos tag átviteli tényező esetén lassú lesz a szabályozás, és állandósult állapotban nagy lesz a statikus hiba. A szabályozás az arányos tag átviteli tényező értékének növelésével gyorsítható, és ezzel a statikus hiba is csökkenthető, de az átviteli tényező értéke nem növelhető minden határon túl, mert a rendszer stabilitását veszti, és lengésbe hozható. Arányos jelkompenzációval a nulla statikus hiba nem érhető el.

Időben állandó alapjelre végzett értéktartó szabályozásnál az arányos (P) kompenzáló tagot integráló (I) taggal kiegészítve a szabályozás statikus hibája nullára kompenzálható, ha ehhez elegendő idő áll rendelkezésre. Ez az arányos-integráló (PI) jelkompenzáció látható a 2.17. ábrán, P+I eset.

Ha a szabályozást alkalmassá akarjuk tenni arra, hogy az alapjel vagy a zavaró jel hirtelen, gyors változásaira gyorsabban reagáljon, akkor az arányos-integráló (PI) jelkompenzációt differenciáló (D) taggal egészítjük ki. Ez a PID jelkompenzáció, amely a 2.18. ábrán a PID esetről látható.



2.18. ábra A PID szabályozó működés közben (Mirinejad, et al., 2008)

A PID szabályozás paramétereinek beállítására is végeztek kutatásokat, ahol különböző bemeneti változók használatával vizsgálták a beállási időre és a túllendülésre gyakorolt hatását. Épületgépészeti rendszerek esetében hőmérséklet túlfutás előfordulhat, ami fokozatosan korrigálható, azonban a túlzott csillapítás vagy túlfutás megelőzésével a beállási idő növekedhet (Tashtoush, et al., 2005).

Az állásos szabályozások előnyei: Ez az egyik legegyszerűbb módszer, alacsony kezdeti költség, egyszerű szerkezet, gyors reakció és visszacsatolás jellemzi.

Az állásos szabályozás hátrányai: Nem képes szabályozni a változásokat időbeni késéssel, nem elég pontos, nem minőségi szabályozás, csak bináris bemeneteket fogad, nem elég hatékony.

A PID szabályozás előnyei: Az egyik leggyakrabban alkalmazott szabályozás, visszacsatolással működik, a hirtelen változások lekezelésére is alkalmas.

A PID szabályozás hátrányai: Az alul- és túlvezérlés kárt okozhat a beavatkozóban. Nem minden esetben megfelelő nem lineáris és összetett rendszerekhez, hosszú beállítási idő, a nem megfelelő erősítés választása a teljes rendszer instabilitását okozhatja (Behrooz, et al., 2018).

A hard kontrol szabályozók többek között: az optimális-, robosztus- vagy H_∞ , adaptív-, és modellprediktív (MPC) szabályozók az irányítástechnikában a nemlineáris rendszerek szabályozásának alternatíváját jelentik (Dávid, et al., 2020).

Optimum szabályozók

Az optimum szabályozók mindig egy valós függvény minimalizálására, vagy maximalizálására törekednek, kiválasztják a paraméterek vagy változók értékeit egy elfogadható tartományon belül. Ezek a rendszerek az energiafogyasztás minimalizálására és a megfelelő komfort maximalizálására törekednek, úgy, hogy figyelembe veszik mind a külső mind a beltéri változásokat is (Yang, et al., 2022).

MATLAB/Simulink válaszoptimalizációt a bemenet/kimenet visszacsatolásos linearizációt alkalmazta épületgépészeti szabályozás megtervezésére Dong. Ez az egyik hátránya, hogy paraméterek meghatározása és a megfelelő modell felállítására is időigényes (Dong, 2010).

Robosztus szabályozók

A modellparaméterek, a mért, nem mért vagy külső zavarok bizonytalanságára vonatkozó robusztus szabályozás vonzó tulajdonságainak eredményeként sikeresen alkalmazták az alapjelkövetés zavarainak kiküszöbölésére (Naidu & Rieger, 2011). Emellett nincs szükség előzetes bizonytalan inputokra. Bár ez a módszer előnyös a zavaraszűrésben és az alapjelkövetésben, drasztikus változásokkal járó időjárási körülmények között nem megfelelő választás. Mivel a nemlineáris robusztus szabályozóban az előretolás és a visszacsatolás vezérlésének kombinációja valósul meg, képes kiszűrni az ismeretlen és külső zavarokat (Sivanandam & Sundaram, 2012).

Adaptív szabályozók

Az adaptív szabályozók bonyolult felépítésűek, jellemzőjük a nemlineáris működés és az időben változás (Naidu & Rieger, 2011). Ez a szabályozási stratégia alkalmas nemlineáris rendszerek szabályozására, valamint lassú reagálással üzemelő rendszerekkel is (Meskin, et al., 2011). Az adaptív kifejezés a rugalmasságra utal, ez teszi lehetővé egy épületben a kiszámíthatatlan és ismeretlen viselkedések lekezelését. Az adaptív megközelítéssel az épületgépészeti rendszerek hatékonyan és stabilan képesek működni. A paraméterek gyorsan változhatnak a változásokra reagálva (Buonomano, et al., 2015), (Behrooz, et al., 2018).

Prediktív modell alapú szabályozás - Model Predictive Control (MPC)

Az MPC egy gyakori alkalmazás az épületgépészetben mely magában foglalja a rendszerek jövőbeli dinamikus viselkedésének előrejelzését és a szabályozó általi válasz ennek megfelelő beállítását, ami energia- és költségmegtakarítást eredményez, miközben kielégíti az elvárt

komfortot igényeket is (Hazyuk, et al., 2014). Lassú reagálási rendszerekben jól alkalmazható, a prediktív modell a bemeneti jellemzők adatainak minőségén alapul ezért nagyon gondosan kell kiválasztani az érzékelőket és azok elhelyezését (Rockett & Elizabeth, 2017).

A bemutatott szabályozásokon kívül még számos megoldás és módszer létezik és lehet alkalmas épületgépészeti rendszerek szabályozására.

2.10. A szakirodalmi áttekintés összefoglaló értékelése

A szakirodalmi áttekintésben bemutattam a nemzetközi és hazai szakirodalmat, amely kiterjed:

- A lakóépületek fűtési energiaigényének meghatározására, ahol ismertettem a hőátbocsátási tényezővel, a fajlagos hőveszteség tényezővel a fűtési hőfokhíddal és a hőtároló tömeg és a termikus időállandó kapcsolatával foglalkozó szakirodalmakat. Bemutattam a Magyarországon az épületek határoló szerkezetével szemben támasztott követelmények hogyan szigorodtak.
- Kitértem és megvizsgáltam a lakóépületek modellezési és szimulációs módszereit, azon belül a blokkorientált modellezés jelentőségét. Kitértem a három fő modell típusra a white-box, black-box és gray-box előnyeire és hátrányaira.
- Megvizsgáltam a differenciálegyenletek numerikus megoldási módszereit is. Valamint, hogy a szimulációs program milyen módon oldja meg azokat.
- Ismertettem a fűtési rendszerekben használt leggyakoribb szabályozási megoldásokat.

A tudományos kutatások között sokan hasonló eredményre jutottak, azonban sikerült azonosítani ellentmondásos vagy nem vizsgált területeket. Ilyen például a termikus időállandó és a hőtároló tömeg hatása az fajlagos fűtési energia igényére lakóépületek esetében az épületek hőtároló tömegének hatása. A hőfokhíd esetében milyen fűtési hőfokhidat célszerű használni, az milyen összefüggésben van a klímaváltozással és a lokációval. A fajlagos fűtési energiaigény számítására alkalmazott egyszerűsített és részletes számítási eljárás nem veszi figyelembe megfelelően az egyes épületek földrajzi elhelyezkedését.

Lehetőséget látok a kutatási területek összevonására. Ilyen terület például modellezésnél a vizsgálatok kiterjesztése nem csak egy paraméter változtatására, hanem különböző helyen lévő épületek vizsgálatára, a szabályozó módosítására, valamint az épületszerkezetek tulajdonságainak módosítására. Nem találtam olyan kutatást, ahol kisminta modellekkel vizsgálták volna valós körülmények között a szabályozási mód és a hőtároló tömeg hatásait, szimulációval és mérésekkel is igazolva a modell pontosságát.

A szakirodalom áttekintése során arra az eredményre jutottam, hogy magyarországi lakóépületekkel nem készült átfogó modellezési és szimulációs vizsgálat, ami az épületek hőtároló tömegét, szigetelését, földrajzi helyét figyelembe véve határozza meg az egyes épületek fajlagos fűtési energiaszükségletét. Szélesebb belső hőmérséklet tartományban.

Ezen szakirodalmak áttekintése alapján megalapozottnak találtam a kitűzött kutatás célok elvégzését és igazolását.

3. ANYAG ÉS MÓDSZER

Ebben a fejezetben bemutatom a kutatáshoz használt kísérleti módszereket és eszközöket, a használt programokat. Az időjárási adatokhoz történő hozzáférés lehetőségeit. A kisminta modell felépítését, a hőtároló tömeg módosítását. Ismertetem a vizsgálat során alkalmazott valós fizikai folyamatokat leíró differenciálegyenleteket.

3.1. Alkalmazott mérőeszközök, és mérési adatsorok

Modellezéshez, a modellek validációjához, majd a validált modellek és a valós körülmények összehasonlításához mérési adatokra van szükség. Az adatok megfelelő felbontása és pontossága elengedhetetlen. Ezért a mérések során az alábbi mérőeszközöket és adatrögzítőket alkalmaztam.

A hőmérséklet mérésére és az adatok rögzítésére Almemo 2590-4S (Alhborn Messtechnik, Illmenau, Németország) használtam. A mérőeszköz 4 mérési bemenettel rendelkezik, a beépített memóriája 100 000 mérési adat tárolására alkalmas. A mérőműszerhez csatlakoztatott NTC termoelemek ideálisan alkalmazhatóak alacsony és közepes hőmérséklet tartományban (3.1. ábra). A hőmérséklet érzékelő technikai adatait a 3.1. táblázat tartalmazza:

3.1. táblázat Almemo 2590-4S technikai adatok (Alhborn Messtechnik, Illmenau, Németország)

Hőmérséklet tartomány:	-200 ... 600°C
Felbontás:	0,1 K
Linearizálási pontosság:	$\pm 0,05 \text{ K} \pm 0,05 \% \text{ a mért értéknek}$
Csatlakozó programozása:	ZA 9021 FST



3.1. ábra Alhborn 2590-4S mérőeszköz

Hőmérséklet mérése EBI 300-T mérő-adatgyűjtő eszközt használtam, (Ebro, Ingolstadt, Németország) amely 40 000 mért adat tárolására alkalmas. Az adatgyűjtő NTC érzékelővel van ellátva és USB csatlakozási lehetőséggel rendelkezik a mérési adatok feldolgozásához (3.2. ábra). Technikai adatait a 3.2. táblázat tartalmazza:

3.2. táblázat EBI 300-T technikai adatok (Ebro, Ingolstadt, Németország)

Hőmérséklet tartomány:	-30 ... 70°C
Felbontás:	
Linearizálási pontosság:	$\pm 0,5 \text{ K} \pm (-20...+40^\circ\text{C}) / 0,8^\circ\text{C} \text{ a mért értéknek}$
Csatlakozó:	ZA 9021 FST



3.2. ábra EBI 300 hőmérséklet érzékelő és adatrögzítő

A villamosenergia fogyasztási adatok mérésére és rögzítésére a 3.3. ábrán szereplő Voltcraft SEM5000 (Voltcraft, Franciaország) fogyasztásmérőt alkalmaztam. Az energiafogyasztás mérő technikai adatait a 3.3 táblázat tartalmazza.



3.3. ábra Voltcraft SEM5000 villamosenergia fogyasztás mérő (Voltcraft, Franciaország)

3.3. táblázat Voltcraft SEM5000 technikai adatai (Voltcraft, Franciaország)

Tápfeszültség	220 ... 240 V/AC, 50 Hz
Saját teljesítményfelvétel	<2 W
Max. csatlakoztatott teljesítmény	3680 W (230 V/AC, 16 A)
Üzemeltetési feltételek	0°C...+40°C, 10%...95% relatív páratartalom
Méréstartományok, tűrések és felbontások (feszültség):	
Méréstartomány	220 ... 240 V/AC
Tűrés	< ±2%
Felbontás	0,1 V
Méréstartományok, tűrések és felbontások (áram):	
Méréstartomány	0,02 ... 16,00 A
Tűrés	< ±2% >0,5 A; < ±5% 0,05 ... 0,5 A; < ±0,005% <0,05 A
Felbontás	0,001 A 0 ... 9,999A; 0,01 A 10 ... 16,00 A;
Méréstartományok, tűrések és felbontások (teljesítmény):	
Méréstartomány	0,3 ... 3680 W
Tűrés	< ±2% > 10 W; < ±10% 3 ... 10 W; < ±0,3% < 3W
Felbontás	0,001 W 0,3 ... 9,999W; 0,01 W 10 ... 99,99 W;

0,001 W @ 100 ... 999,9 W;
1 W @ 1000 ... 3680 W;

A lakóházak gázfelhasználása a területileg illetékes gázszolgáltató hitelesített gázmérőórájával volt mérve (3.4. ábra).



3.4. ábra Lakossági gázmérő

Meteorológiai adatok

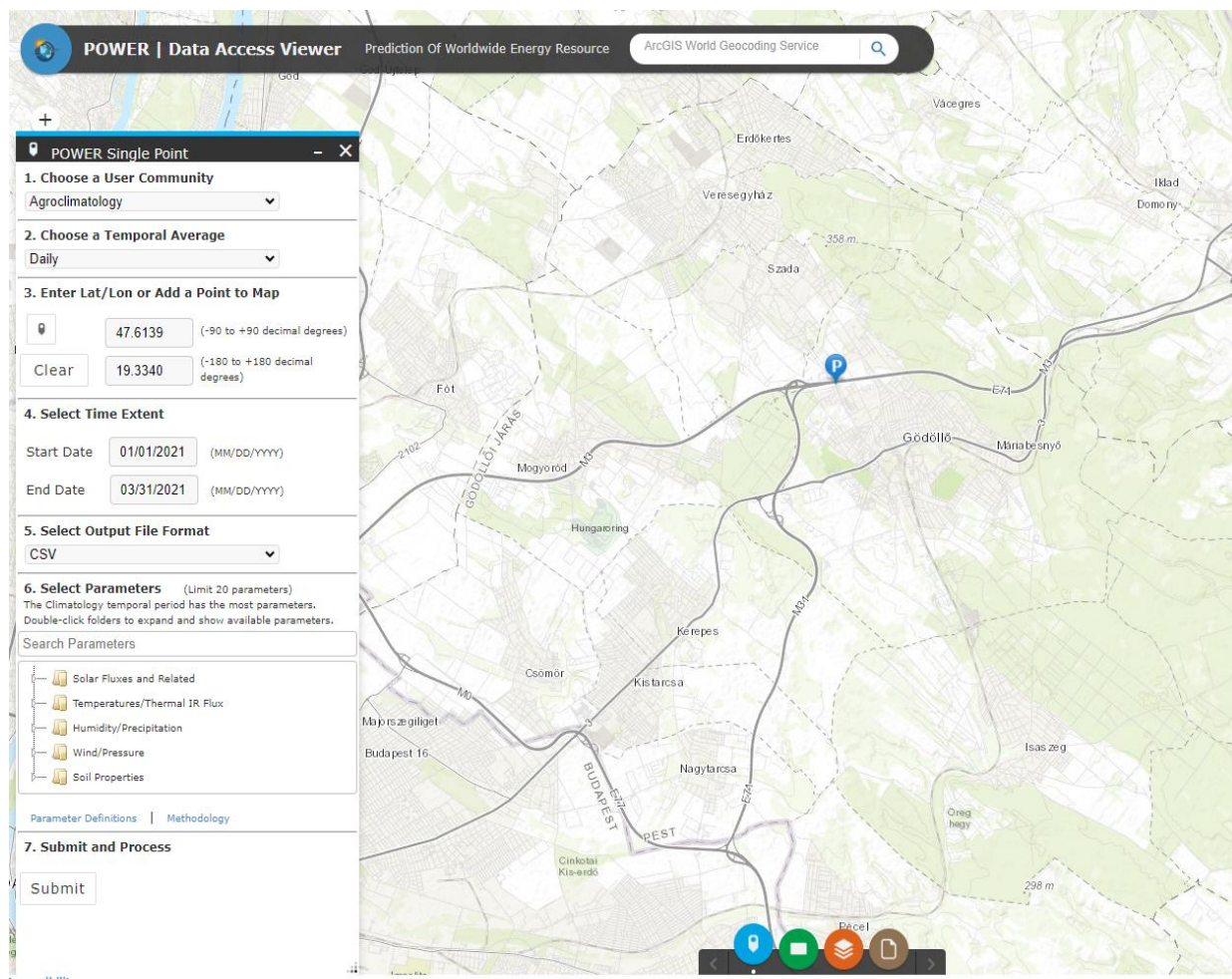
Az időjárási adatokat több forrásból szereztem be. Méréssel, valamint külső adatszolgáltató adatbázisaiból.

A KSH nyilvántartásából 1901-től 2022-ig állnak rendelkezésre mérési adatok évekre vonatkozóan (KSH 15.1.1.37 tábla). Átlagos középhőmérsékletek, lehullott csapadékmennyiség, csapadékos napok száma, globálsugárzás [MJ/m^2], fagyos napok száma, hőségnapok száma, hóhullámmal érintett napok száma (KSH, 2023a). További településekről 1985-től áll rendelkezésre éves mérési adatsor meteorológia megfigyelőállomásokról (KSH 15.1.2.12. tábla) (KSH, 2023b). Részletesebb adatok 2017-2022 közötti időszakra érhetőek el havi bontásban. Közép- maximális-, minimális hőmérséklet, csapadékos nap, csapadék mennyiség, napsütéses órák száma, szeles napok száma (KSH 15.9.2.1 – 15.9.2.11 táblák) (KSH, 2022). 2022-től ez az adatsor nem kerül frissítésre.

Ingyenesen elérhető és szabadon felhasználható adattár áll rendelkezésre (OMSZ, 2022). Időjárási adatok 1901-2020-ig állnak rendelkezésre a Magyar Meteorológia Szolgálat kezelésében. A következő településekre: Budapest, Debrecen, Pécs, Szeged és Szombathely városokra. Napi középhőmérséklet, maximumhőmérséklet, minimumhőmérséklet, csapadékösszeg, csapadékösszeg fajta, napfénytartam összege, globálsugárzás napi összege (HungaroMet, 2020).

Szintén ingyenes elérhető adatforrás a NASA által ingyenesen biztosított időjárási adatok az egész világra. Órás felbontásban állnak rendelkezésre az adatok.

Az elérhető adatok földrajzi helymeghatározással ellátott meteorológiai és napenergia-kapcsolatos paramétereket tartalmaznak, amelyeket megújuló energia rendszerek értékelésére és tervezésére dolgoztak ki. Különböző alkalmazások állnak rendelkezésre: napi átlagos adatokhoz különféle dátumtartományokban és paraméterekben egy adott helyszínre vonatkozóan. A végfelhasználók interaktív grafikonokat, adattáblákat tekinthetnek meg, és különféle táblázatos és földrajzi fájlformátumokban érhető el. A 3.5. ábra mutatja be a NASA oldalán elérhető felületet. Lehetőség van egyéni klimatológiai jelentéseket és adatokat generálni egyetlen pont (szélesség/hosszúság) alapján.



3.5. ábra NASA időjárási adatok felülete (NASA, 2024)

Lehetőség van továbbá beépülő modulok segítségével az adatokat feldolgozni (NASA, 2024).

3.2. A fűtési energiaigényt meghatározó módszer

Az egyes szerkezeteken keresztül lezajló energiáttranszport folyamatok összessége jelenti az adott épület fűtési és hűtési energiaigényét. Esetemben a fűtési energiaigény meghatározása történt.

$$\dot{Q}_{\text{fűtési/hűtési}}^{\text{hőigény}} = \pm \dot{Q}_{\text{rétegrendi transzmisszió}} \pm \dot{Q}_{\text{vonalmonti}} \pm \dot{Q}_{\text{légcsere}} \pm \dot{Q}_{\text{belső hőnyereség}} (\pm \dot{Q}_{\text{nap sugárzás}}) \quad (3.1)$$

A rétegrendi transzmissziós energiaáram a belső határoló teret a környezettől elválasztó szerkezetek összességén áthaladó energiaáramokat tartalmazza. Ezek jellemzően a falak, nyílászárók, födém és padló szerkezetek hőhidakkal korrigált értékei.

Vonalmenti hőátbocsátás

A hőhidaknál kialakuló hőáramok számítására használt összefüggés a vonalmenti hőátbocsátási együtthatóval határozható meg. Ezek a hőhidak jellemzően vonalak mentén húzódnak meg (csatlakozási élek, nyílások kerülete, pillérek, koszorúk) ezt fejezi ki a vonalmenti hőátbocsátás.

Lakóépületek esetében talajra fektetett padló esetében az alábbi formában jelenik meg:

$$\dot{Q}_{\text{vonalmonti}} = \Psi \cdot l \cdot (T_i - T_e) \quad (3.2)$$

Légcsere

Friss levegőre minden esetben szükség van. Ennek biztosítása gépi szellőztetéssel vagy – a hőmérsékletkülönbség hatására létrejövő – természetes légcserével lehetséges. Nagysága természetes szellőzés esetén függ a hőmérsékletkülönbségtől, és a légcsereszámától. A légcsereszám a helyiség teljes levegőmennyiségének lecserélésének száma óránként:

$$\dot{Q}_{\text{légcsere}} = \frac{n_{\text{fhouse}}}{3600} \cdot V \cdot \rho_{\text{air}} \cdot c_{\text{air}} \cdot (T_i - T_e) \quad (3.3)$$

Belső hőnyereség

A belső hőnyereség a helyiségben működtetett gépek és a bent tartózkodók vagy akár az épületbe vitt tárgyak (belső hőforrások) által leadott hő.

$$\dot{Q}_{\text{belső hőnyereség}} = A_b \cdot \dot{q}_b \quad (3.4)$$

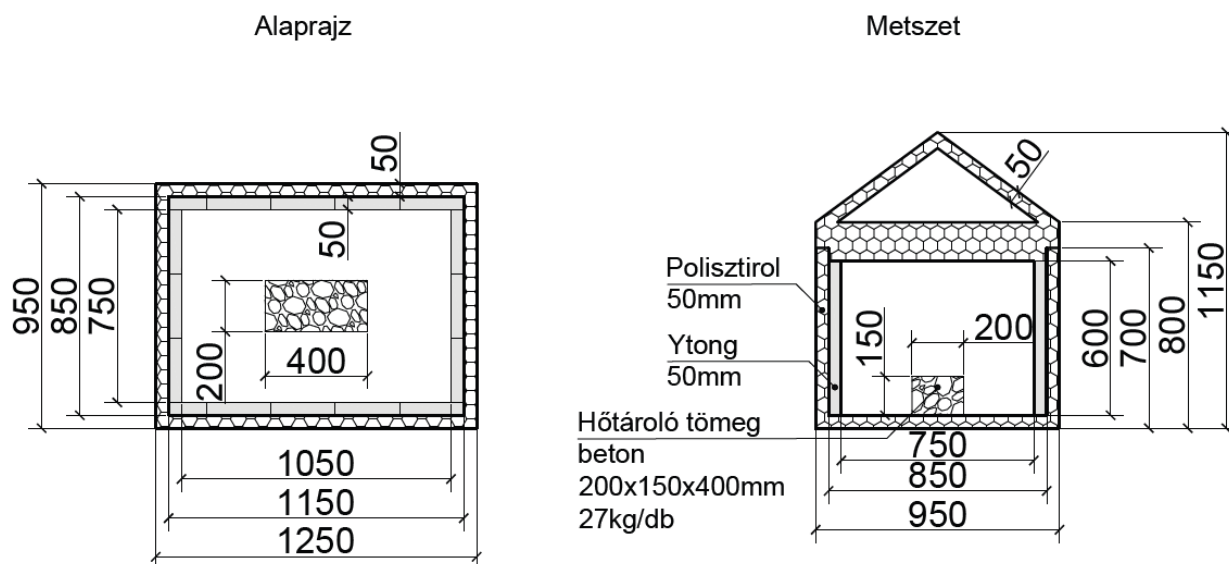
Egyéb hőnyereségek

Hőnyereség származhat az épület használói által történő hőleadásból, napsugárzásból, vagy akár egyéb pl. melegebb tárgyak helyiségbe helyezéséből is.

3.3. Kisminta modell épületek

A kísérletek elvégzéséhez szükség volt mérések végzésére. Ahhoz, hogy a méréseket ne csak egy esetben és beállítással lehessen elvégezni, hanem összehasonlító méréseket is tudjak végezni három azonos méretű és szerkezeti felépítésű kisminta modell épületet készítettem. A három kisminta modell épületben méréseket végeztem, a mérések során mindhárom épületben azonos mennyiségű hőtároló tömeget helyeztem el. Mindhárom kisminta modellépület ugyanolyan tájolásban került elhelyezésre. Elneveztem őket a könnyebb azonosítás miatt A, B és C kisminta modell épületnek.

A kisminta modellépületek hőszigetelt külső burkolatot kaptak, belső falazat Ytongból készült a 3.6. ábra mutatja be a kisminta modell épületek méreteit és kialakítását.



3.6. ábra A kisminta modell épületek kialakítása

A 3.4. táblázatban a kisminta modell épület épületszerkezeteinek jellemzői találhatóak meg, rétegenként.

3.4. táblázat A kisminta modell épületek szerkezetei

Típus	Réteg	Anyag	c [kJ/kg/K]	ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]	d [m]
Külső fal	1.	Austrotherm AT-H80	1,46	20	0,038	0,05
Külső fal	2.	Ytong	1	500	0,13	0,05
Padló	1.	Austrotherm AT-H80	1,46	20	0,038	0,05
Padló	2.	OSB lap	2,34	650	0,16	0,02
Tető	1.	Austrotherm AT-H80	1,46	20	0,038	0,05

A jellemző épületfizikai értékeket és azok geometriai méreteit a 3.5. táblázat tartalmazza.

3.5. táblázat A kisminta modell épületek határoló szerkezetei

Felület	U [Wm ² /K]	A [m ²]	ρ [kg/m ³]	c [kJ/kgK]	l [m]	Ψ [W/mK]
Külső fal szigeteléssel	0,535	2,2	260	1,23		
Padló	0,17	0,7875	200	0,86285	3,6	0,75
Tetőfödém	0,353	0,7575	20	1,45		

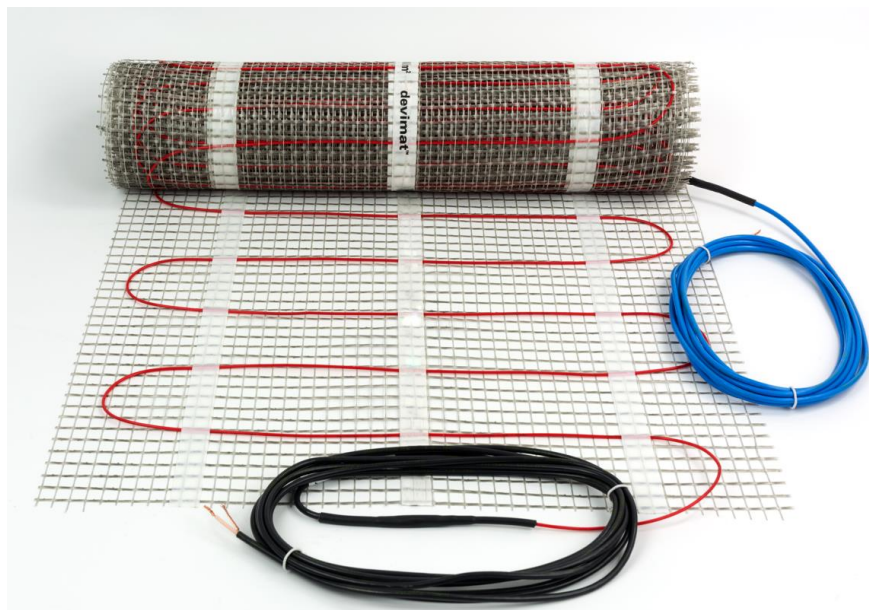
Mérések helyszínének GPS koordinátái: 47.61204835472161, 19.343435272717898 Gödöllő, Magyarország. A kisminta modellépületek elhelyezése a 3.7. ábra mutatja be.



3.7. ábra A, B, és C modellépületek azonos tájolással

Az A és B kisminta modellépületet elektromos fűtéssel alakítottam ki. A C kisminta modellépületet fűtés nélküli referenciaépületként használtam a méréseim során. Az elektromos

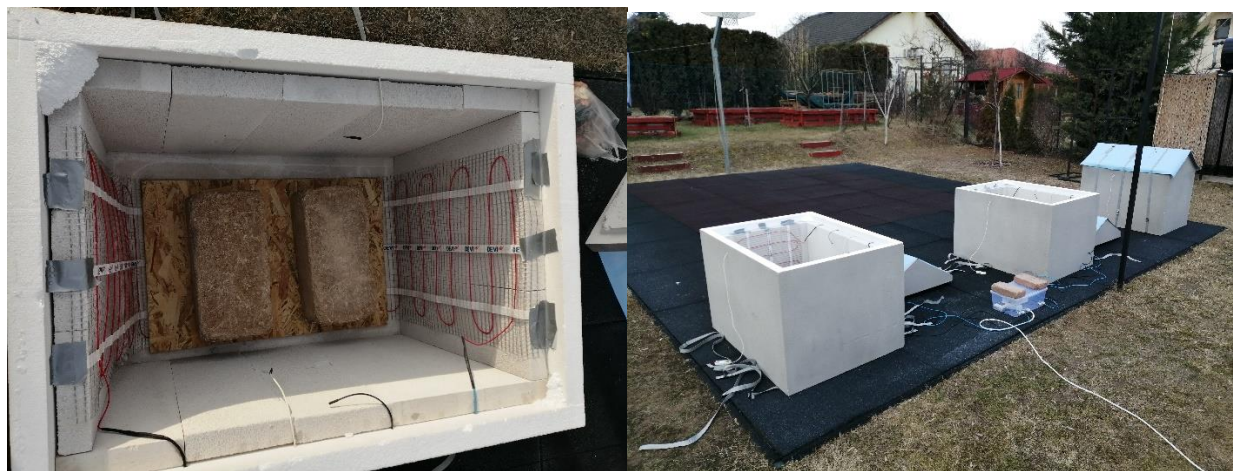
fűtés DEVImat™ DSVF-150 (Danfoss, Dánia) típusú fűtőszőnyeggel biztosítottam, amelynek teljesítménye 150 W négyzetméterenként. Az A és B kisminta modellépületekben egy-egy négyzetméteres fűtőfelületet telepítettem (3.8. ábra).



3.8. ábra Devimat fűtőszőnyeg (Danfoss, 2024)

A fűtőszőnyeg maximum fűtőteljesítménye 150 W/m^2 , 1 m^2 ($0,5 \times 2 \text{ m}$) felületű.

A 3.9. ábrán látható a kisminta modellépület szerkezete, a fűtés és a belső térben elhelyezett érzékelők.



3.9. ábra A kisminta modellépületek kialakítása és telepítése

A kisminta modellépületek külső hőmérséklet érzékelői mérés közben téli körülmények között a 3.10. ábrán láthatóak. A kisminta modellépületekben a belső hőmérséklet 2-2 érzékelővel a külső hőmérséklet rögzítése minden kisminta modellépület mindkét hosszanti oldalán kerültek elhelyezésre 500 mm magasságban, valamint egy referencia külső hőmérsékletmérés is történt, ennek helye az épületektől 2 m távolságban 1m magasságban volt.



3.10. ábra A kisminta modellépületek mérés közben

A fűtés szabályozása a DEVIreg™ Opti (Danfoss, Dánia) segítségével történt. Az elektromos fogyasztásmérők és a szabályozás kialakítását a 3.11. ábra mutatja be.



3.11. ábra Fűtés szabályozás és elektromos fogyasztásmérés a kisminta modellépületekben

A mérések folyamán egyperces mintavételezés történt.

A kisminta modellek szabályozása

A méréseket a következőképpen végeztem el: az A kisminta modellépületben állandó alapjelet tartottam, a B kisminta modellépületben időprogram alapján változó alapjelet alkalmaztam, míg a C kisminta modellépület fűtetlen (referencia) volt. Ennek értékeit a 3.6. táblázat tartalmazza. A szabályozó hiszterézise $\pm 0,4^{\circ}\text{C}$. A jelű kisminta modell esetében az időprogram alapján 17°C és 21°C míg a B kisminta modell esetében állandó 21°C hőmérséklet érték volt beállítva.

3.6. táblázat Az A és B kisminta modell fűtési programja

Időprogram	A alapjel [$^{\circ}\text{C}$]	B alapjel [$^{\circ}\text{C}$]
00:00-05:59	17	21
06:00-07:59	21	
08:00-15:59	17	
16:00-22:29	21	
22:30-23:59	17	

3.3.1 A hőtároló tömeg változtatása a kisminta modellekben

Az épületek különböző hőtároló tömegeit a kisminta modellépületekbe helyezett betontégglákkal módosítottam. Az összehasonlító mérések célja az volt, hogy a hőtároló tömeg változtatása milyen hatással van az energiafogyasztásra állandó és időprogram szerint változó alapjel mellett a 3.12. ábra az egyes mérések során változtatott hőtároló tömegeket jeleníti meg. Egy darab betontömb $200 \times 150 \times 400 \text{ mm}$ méretű 27 kg tömegű volt, valamint végeztem méréseket 105 liter térfogatú víz behelyezésével is.



3.12. ábra Hőtároló tömegek módosítása különböző mérések előtt

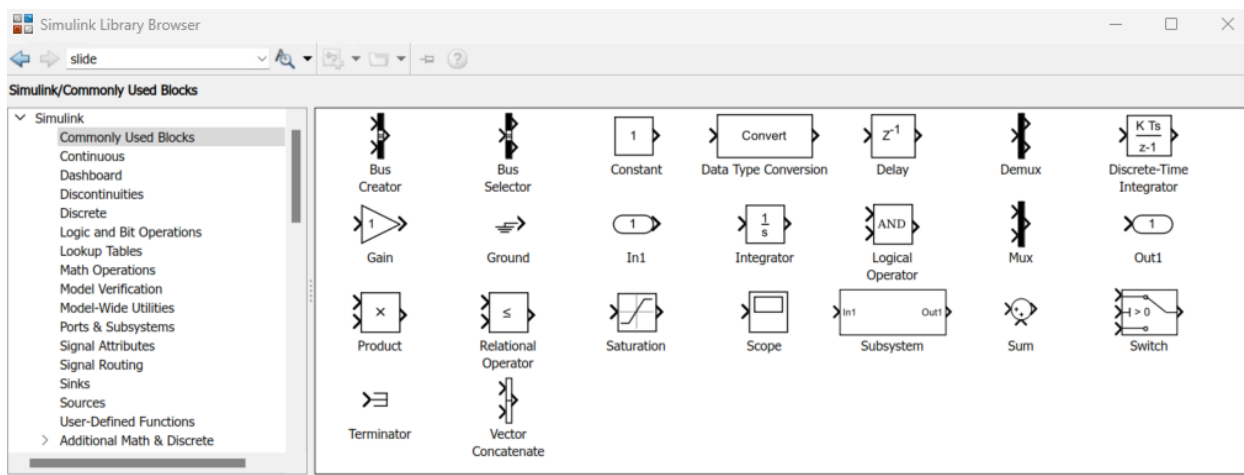
A mérési időszak 2023 február 5-től március 16-ig tartott. A hőtároló tömeget többször változtattam a mérések során. Így különböző hőtároló tömegekkel állnak rendelkezésre a mérési adatok, a módosítási napokat kivéve. A mérési eredményeket és azokból levonható következtetéseket az eredmények fejezetben mutatom be. A kisminta modellek mérési eredményeit és számítógépes szimulációs eredményeit is összehasonlítottam (MATLAB/Simulink) környezetben.

3.3.2 Kisminta blokkorientált szimulációs modell

Valós környezetben végzett mérések sok esetben nehezen hasonlíthatók össze, mert különböző helyszíneken végzett mérések során az időjárási jelenségek is különbözőek, illetve hosszú mérés sorozatra van szükség, hogy a szélsőséges időjárási körülményekre is megbízható adatok álljanak rendelkezésre. A szimulációs modell alkalmazásával gyorsabban érhető el eredmény és az

épületszerkezet, valamint épületgépészet adta széles lehetőségeket is figyelembe tudjuk venni. Ugyanakkor a modell kiválasztásában vagy kialakításában körültekintően kell eljárni. A szimuláció gyorsan futtatható, könnyen változtathatóak a vizsgálati paraméterek. A megfelelő modell megalkotásához az azokat leíró fizikai folyamatok matematikai leírása, validálásához mérési eredmények összehasonlítása szükséges a szimuláció során kapott eredményekkel.

A szakirodalmi áttekintés alapján a blokkorientált modellezést választottam céljaim megvalósításához. MATLAB Simulink (3.13. ábra) környezetben végeztem el a modellezést és futtattam le a szimulációkat.



3.13. ábra MATLAB Simulink könyvtár (MathWorks, 2024)

Kisminta modellépületek hőtechnikai tulajdonságait leíró differenciálegyenlet

MATLAB Simulink környezetben white-box modellt készítettem. Erre illesztettem a rendelkezésre álló hőmérsékleti adatokat, majd elvégeztem a modell validálását. A modell felépítése során a fizikai folyamatokat leíró matematikai egyenleteket oldottam meg MATLAB segítségével. A kisminta modellre jellemző differenciálegyenletek, Kelvin-Thomson módszerrel kerültek megoldásra.

A kisminta modellépületek hőtechnikai modelljét leíró differenciálegyenletek a következők:

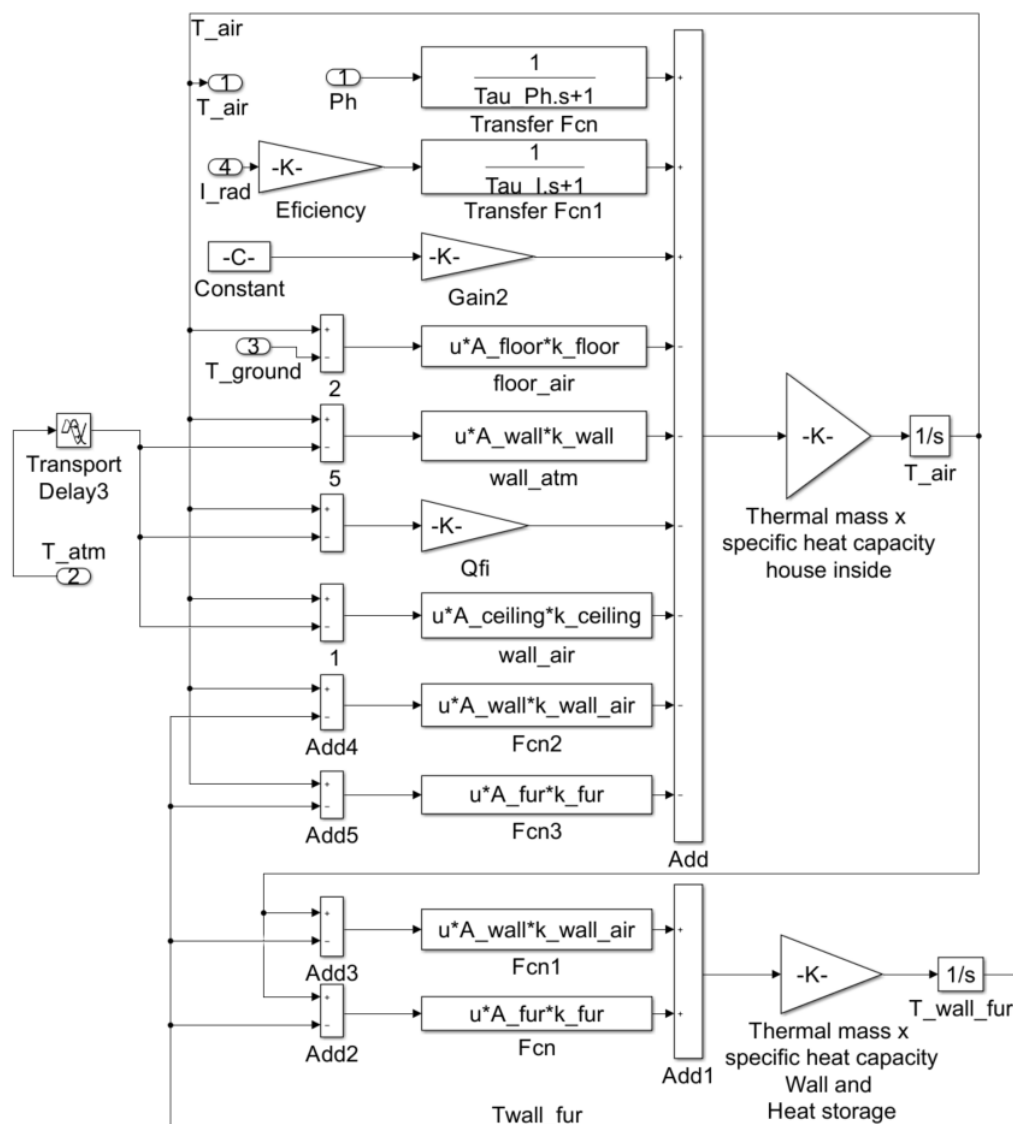
A belső tér léghőmérsékletét leíró (3.5.) differenciálegyenlet:

$$\begin{aligned}
 P_h + I_{rad} \cdot \eta_{I_{rad}} \cdot A_{roof} + q_B \cdot A_{floor} - (T_{air} - T_{ground}) \cdot A_{floor} \cdot k_{floor_ground} - \\
 (T_{air} - T_{atm}) \cdot A_{wall} \cdot k_{wall_air} - \\
 (T_{air} - T_{atm}) \cdot n_{f_{house}} \cdot \rho_a \cdot c_{air} - (T_{air} - T_{atm}) \cdot A_{ceiling} \cdot k_{ceiling} - \\
 (T_{air} - T_{fur}) \cdot A_{fur} \cdot k_{fur} = (m_{air} \cdot c_{air}) \cdot \frac{dT_{air}}{dt}
 \end{aligned} \quad (3.5)$$

A kisminta modellépületek határoló felületeinek hőmérsékletét leíró (3.6.) differenciálegyenlet:

$$\begin{aligned}
 (T_{air} - T_{wall_fur}) \cdot A_{wall} \cdot k_{wall_air} + (T_{air} - T_{wall_fur}) \cdot A_{fur} \cdot k_{fur} = \\
 (m_{fur} \cdot c_{fur} + m_{wall} \cdot c_{wall} + m_{floor} \cdot c_{floor} + m_{ceiling} \cdot c_{ceiling}) \cdot \frac{dT_{wall_fur}}{dt}
 \end{aligned} \quad (3.6)$$

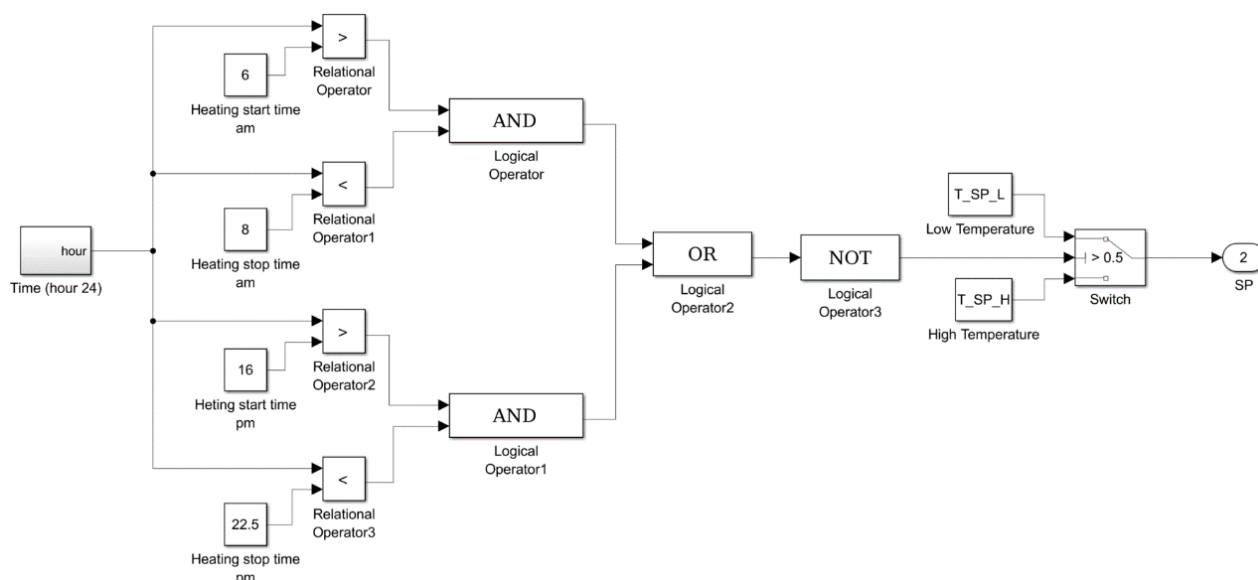
A modell felépítésének részletét MATLAB Simulink elemekkel a 3.14. ábra mutatja be.



3.14. ábra A kisminta modellépületek blokkorientált megjelenítés részlete

Az elkészített modell figyelembe veszi az egyes határolószervezetek épületfizikai jellemzőit. A környezeti-, a talaj- és belső hőmérsékletet. A napsugárzást, valamint a szabályozási mód szerinti bevitt fűtőtéljesítményt. A napsugárzás és napi átlaghőmérséklet szimulációját Farkas (1999) egyetemi jegyzete alapján alkalmaztam, felhasználva a termikus napenergia-hasznosító rendszer kismintamodelljét (Tóth, et al., 2019). Ezek után lehetőség van konkrét mérési adatok alapján vagy szimulált időjárási adatok alapján is számítások végzésére.

Az A B és C kisminta épületek szabályozási módjai a következők voltak. Az A kisminta modellépületben folyamatos alapjelű, a B kisminta modellépületben a 3.6. táblázatban közölt időprogram szerint változó alapjelű, míg a C kisminta modellépületben nem volt fűtés. Ezeket a szabályozási módokat valósítottam meg a MATLAB/Simulink modellben is. A 3.15-ös ábra a szabályozás alapjelenek előállításához használt Simulink modellt mutatja.



3.15. ábra B kisminta modellépület időprogram szerint változó alapjelének MATLAB implementációja

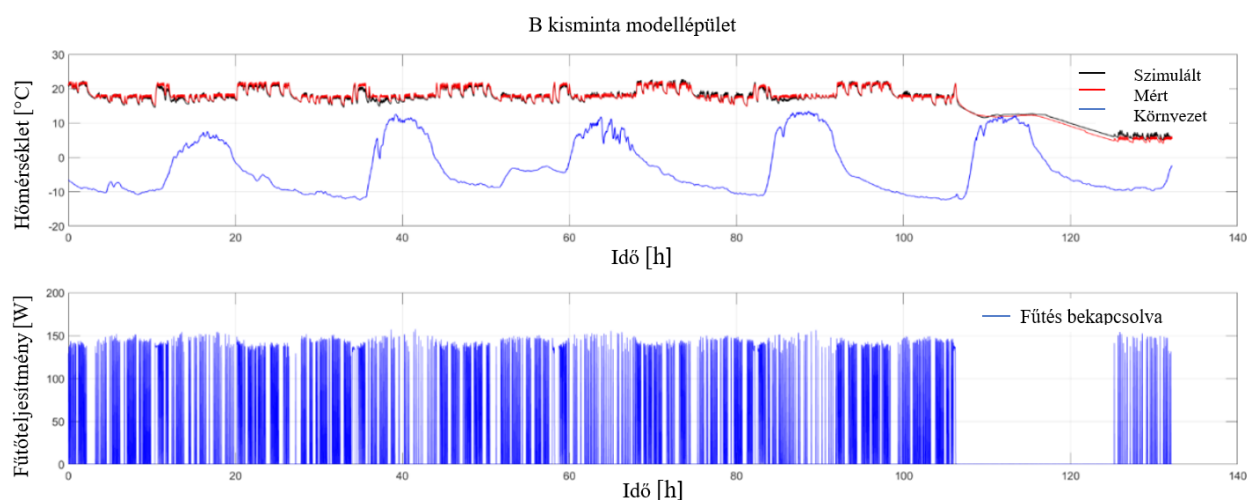
3.3.3 A kisminta modellek identifikálása

Az elkészült modell és a mérési eredmények összehasonlításával került identifikálásra a modell paramétere. Az identifikált paraméter a külső fal hőátbocsátási tényezője. A paraméterek értékének meghatározására MATLAB Simulink TM fminsearch beépített függvénye került alkalmazásra a célfüggvény minimumának megkeresésére egy megadott kezdőérték alapján. Ennek leíró formulája a következő:

$$J(k_{wall}) = \int_0^{t_{max}} (T_{measured}(t) - T_{simulated}(t,k))^2 dt \rightarrow \min \quad (3.7)$$

A paraméter értéke $k_{wall} = 0,535 \text{ W/m}^2\text{K}$.

A modell validálása a mért külső és belső hőmérséklet a napsugárzási adatok és a villamos fogyasztás alapján történt. A szimulált eredmények esetében a fűtés be- és kikapcsolt állapotát alkalmaztam bemeneti paraméterként. A 3.16. ábra a szimulált és mért adatokat mutatja be a B időprogram szerint változó alapjelű kisminta modellépület esetében. Az identifikációs és validációs eredményeket a 4.1 fejezetben mutatom be.



3.16. ábra B kisminta modellépület mért és szimulált értékek

A kutatás kiterjesztéséhez fejlesztési iránynak valós épület modellezését tűztem ki célul. Felhasználva az itt szerzett tapasztalatokat a modell kibővítését végeztem el. A valós épületek esetében a méréseket és validálást csak a konkrét épületre az adott időszakra lehet elvégezni, nincs könnyen kivitelezhető megoldás egyszerre három azonos épületben végezni a méréseket, és a mérésre hatással levő mértékben változtatni az épület hőtároló tömegét. Emiatt célszerű szimulációkkal végezni a további kutatást.

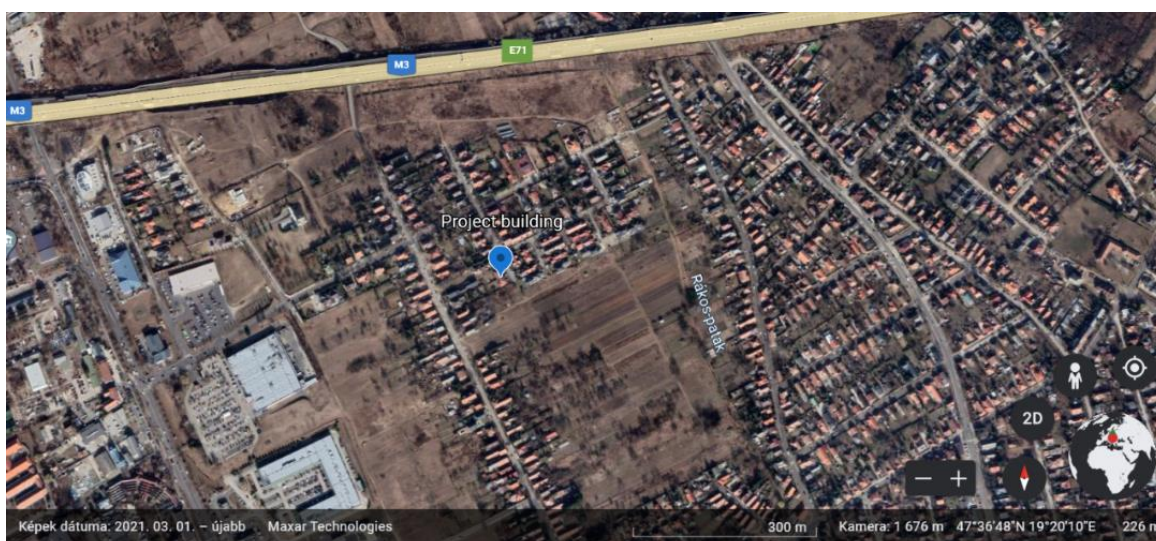
3.4. A valós épületek

A valós körülményeket és épületeket öt különböző használatban lévő lakóépülettel vizsgáltam meg. Rendelkezésre álltak a gázfogyasztási adatok, melyek a fűtési energiaszükségletet jelentették. Ezeket az adatokat a lakóépületek tulajdonosai biztosították számomra. A lakóépületekben 3-5 fő lakott a vizsgált időszakokban. Alapterületük 100-170m² közötti, építési idejük 1960-2020 közötti volt. Fajlagos hőátbocsátási tényezőjük 0,32-0,987 W/m²K tartományba esett. Az épületek Magyarországon találhatóak. Más hőtermelő berendezés, szellőztető rendszer nem üzemelt a lakóépületekben. A lakóépületek alaprajzait az M5.1-5.8 mellékletei tartalmazza. Az épülettípológia besorolás (2.2. táblázat) szerint 6, 8, 10 és 12-es csoportba esnek.

3.4.1 B2 – Identifikációs – épület

A valós családi ház Közép-Magyarországon található, Gödöllőn. Építési éve 2008, az adott kor korszerű építőanyagaiból épület fel, épületgépészeti rendszerei a 2008-ban korszerű technológiákat tartalmazza. Az épületről rendelkezésre állnak az építészeti dokumentációk energetikai számítás és gépészeti tervek is.

Az épület elhelyezkedését a 3.17. ábra mutatja be, koordinátái: 47°36'43"N 19°20'37"E, tengerszint feletti magassága: 222 m.

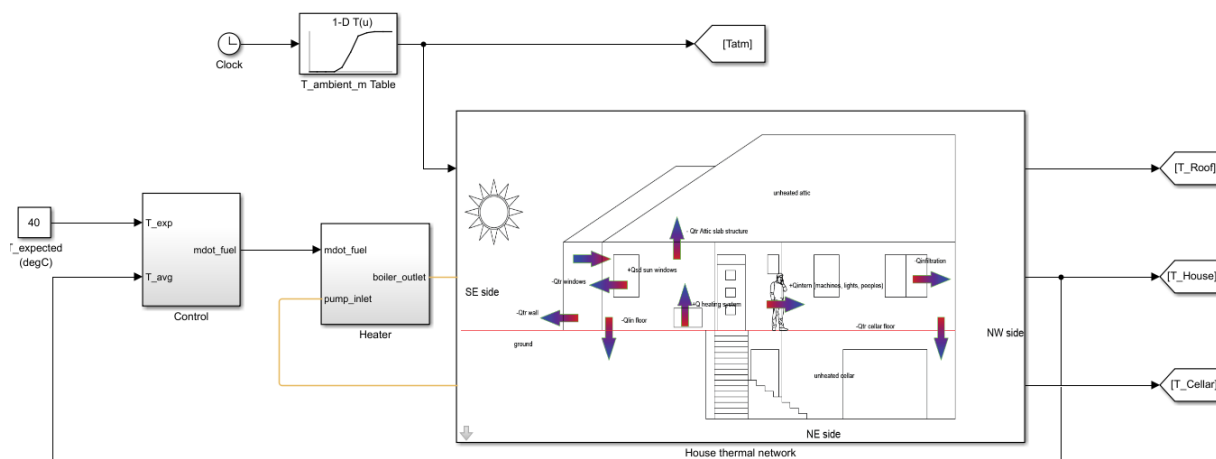


3.17. ábra Valós épület földrajzi elhelyezkedése

A vizsgált épület részben alapincézett, földszintes kialakítású, padlástere fűtetlen, cseréptetővel borított. A külső falak PoroTherm 44HS falazóelemből készültek, a műanyag tokos nyílászárók redőnnyel vannak felszerelve. Alapterülete 124,18 m², belmagassága 2,65 m. A részletes adatokat a mellékletben adom meg.

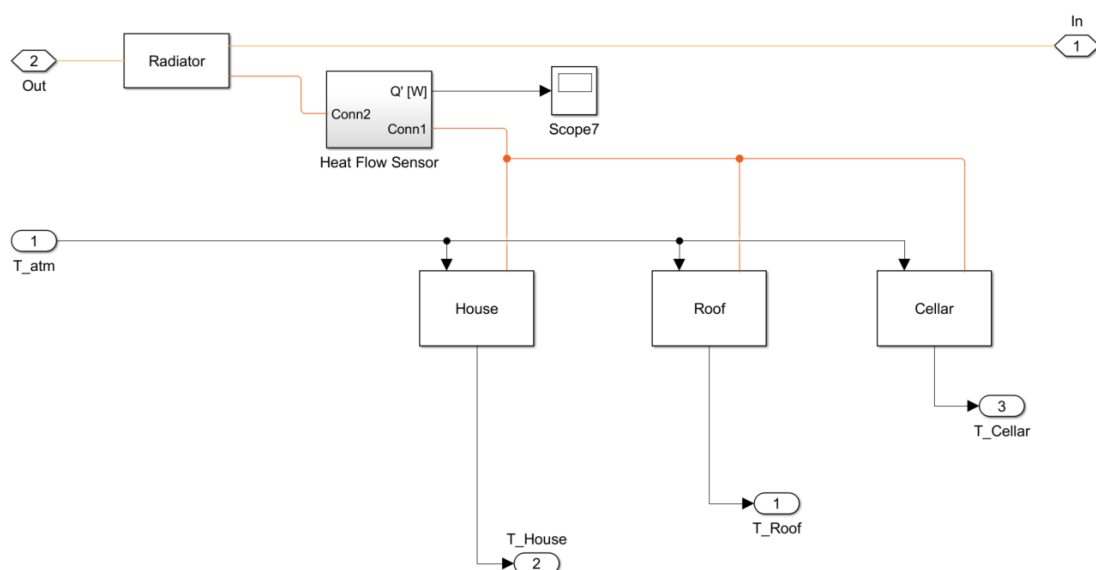
A modellezést és későbbiekben a szimulációkat MATLAB/Simulink környezetben végeztem el. Az épületet részekre osztottam. A legfontosabb egysége a lakótér, ahol a kívánt hőmérséklet tartása a cél. Alatta fűtetlen pince található, felette a szintén fűtetlen padlástér. A külső tér felé az energiaáramok a határoló szerkezeteken keresztül és közvetve a két fűtetlen téren keresztül mennek végbe. Bemeneti adatként a külső hőmérsékleteket, valamint a globális napsugárzást

vettem figyelembe. Ezen adatok az anyag és módszer 3.1. fejezetben bemutatott NASA adatbázisából származnak. A B2 épület esetében a rövidtávú méréseknél saját külső hőmérséklet mérés is történt. Az egyszerűsítések miatt a talaj hőmérsékletét állandó 12 °C értékkel vettem figyelembe. Kimenatként a lakótér, padlástér és pince hőmérsékleti adatai jelennek meg. A vizsgált lakóépület metszetét a 3.18. ábra mutatja be, ahol a nyilak jelzik a lakóteret érintő hőtranszport folyamatokat.



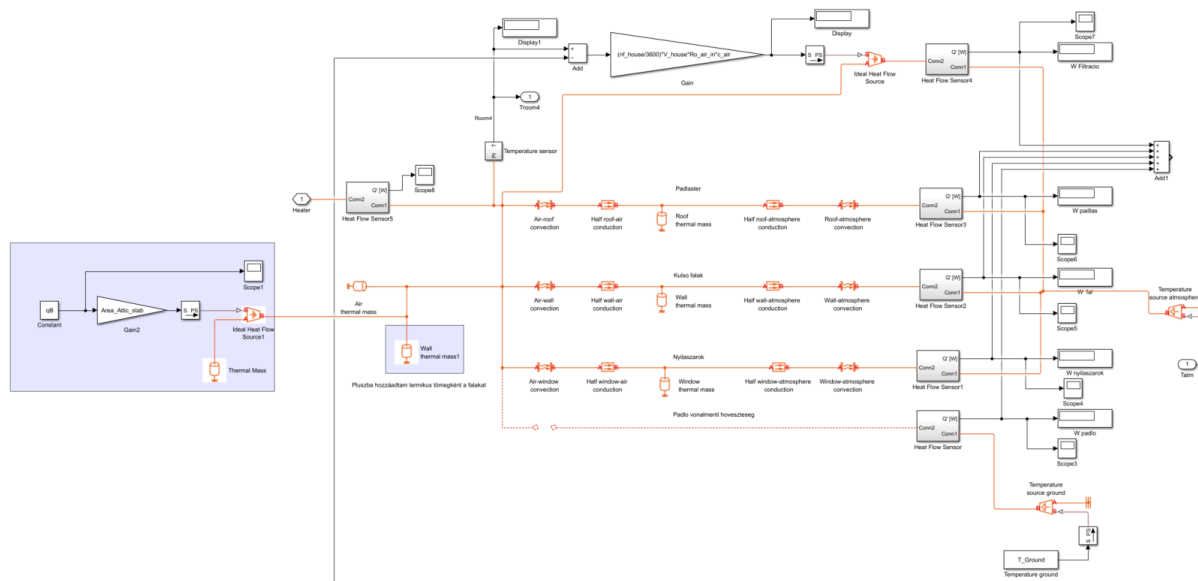
3.18. ábra A vizsgált épület áttekintő vázlata MATLAB/Simulink környezetben

A vizsgált épület részegységekre történő felosztását, az egyes épületrészek egymással és a környezettel való kapcsolatát, valamint a szükséges fűtőteljesítmény bevitelét a 3.19. ábrán mutatom be.

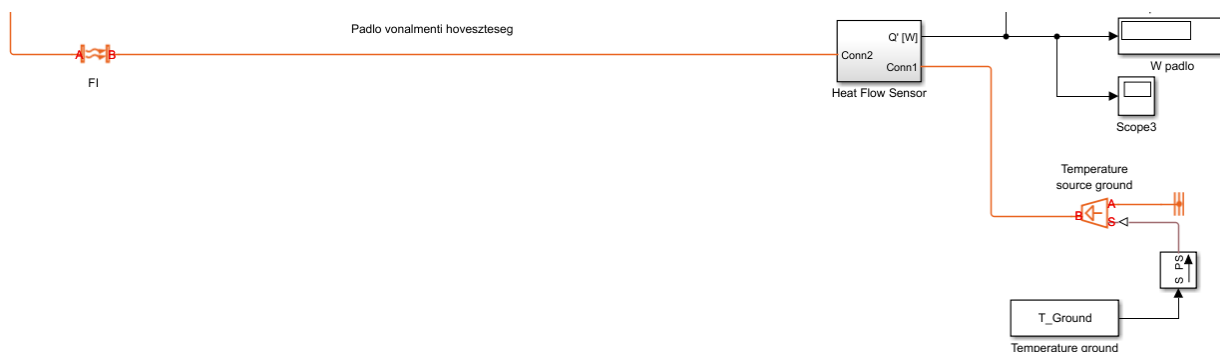


3.19. ábra A vizsgált épület felosztása

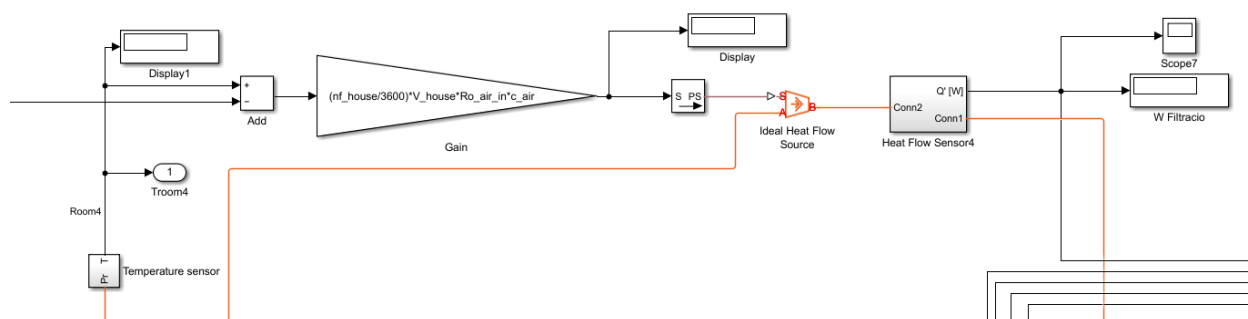
A vizsgálatom fókuszában lévő lakótér modellje már összetettebb felépítésű. A 3.20. ábrán a blokkorientált modellezéssel készült energetikai összefüggéseket tartalmazó modell elemei láthatóak. A lakóépület energiamérleg számításának alapját a hőveszteségeket és hőnyereségeket leíró egyenletek adják. A formula megegyezik a kisminta modellekben a 3.3. alfejezetben bemutatott (3.1) számú formulával.



3.20. ábra A vizsgált épület lakóterének energetikai modellje MATLAB/Simulink környezetben
A jobb áttekinthetőség miatt nagyobb részletben a 3.21. ábra a vonalmenti hőátbocsátás, a 3.22. ábra a filtráció modellezését mutatja be.



3.21. ábra Vonalmenti hőátbocsátás modellezése

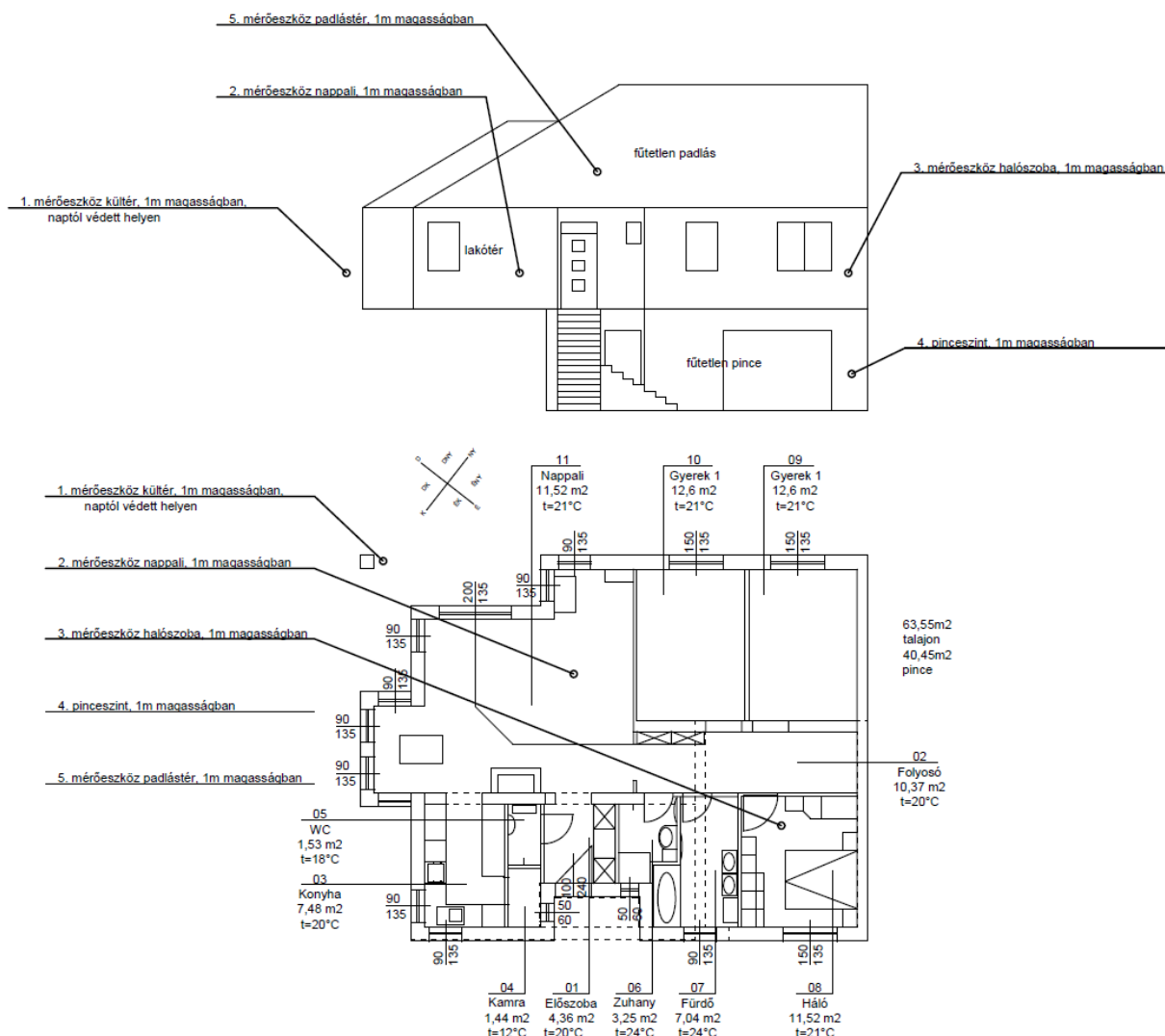


3.22. ábra Filtrációs hőnyereségek és veszteségek modellezése

A vizsgált épület paraméterérzékenységi vizsgálata és validálása

A vizsgált lakóépületben 2021.07.22-2021.08.15. között folyamatosan méréseket végeztem. Az épület ekkor használaton kívül volt, így kevesebb zavar mellett zajlottak a mérések. A mérés során mértem a levegő hőmérsékletét és relatív páratartalmát. Az alkalmazott mérőműszerek EBRO EBI

300 mérő és adatrögzítő volt (Xylem Analytics, Németország), a mérési adatokat (hőmérséklet és relatív páratartalom) 5 percenként rögzítette a berendezés. A mérőberendezések helyét a 3.23. ábra mutatja be, melyeken a mérések egy időben történtek. Elhelyezésre kerültek mérőműszerek a külső térben és belső térben két helyen, valamint a pinceszinten és a padlástérben is. Ismételt belső hőmérsékleti méréseket végeztem téli körülmények között is EBRO EBI 300 mérő- és adatrögzítővel, Valamint ALMEMO 2590-4S mérőberendezésekkel kiegészítve 2022.11.13-2022.12.04-ig és 2023.01.18-tól 2023.02.12-ig Az alkalmazott mérőműszereket és érzékelőket a 3.1 fejezetben ismertetem.



3.23. ábra belső és környezeti hőmérséklet mérési pontok

A mérési adatokat táblázatos formátumban mentettem el, melyet feldolgozva a MATLAB számára egy '.m' kiterjesztésű fájlba rendeztem. Az épület szimulációjakor a fűtési határhőmérséklet alatt üzemeltetem a fűtési rendszert, attól magasabb hőmérséklet esetében ki van kapcsolva. A modell felépítésekor az egyes differenciálegyenletekbe az adott szerkezet épületfizikai jellemzőit, geometria méreteit az épületre vonatkozóan szintén egy '.m' kiterjesztésű fájlban adtam meg.

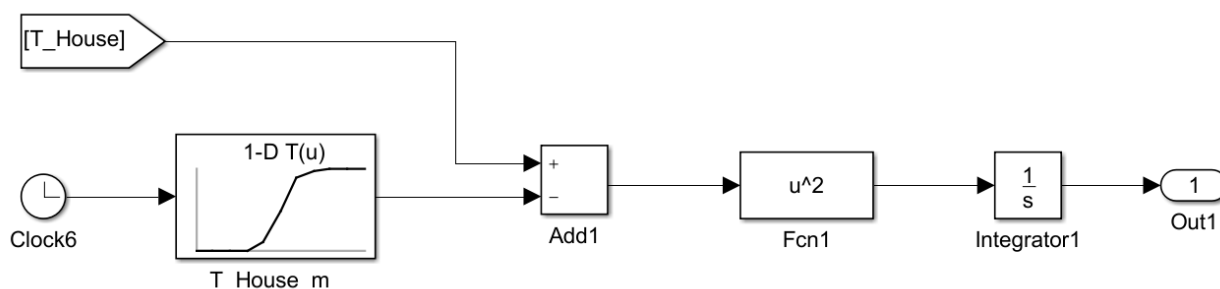
A paraméterérzékenységi vizsgálat során megvizsgáltam milyen paraméterek vannak hatással a belső hőmérsékletre. Ezek a következő paraméterek voltak: lineáris hővezetési együttható, fajlagos belső hőnyereség a filtrációs tényező. A napsugárzásból származó hőnyereség figyelembevételétől eltekintettem az alkalmazott árnyékolás miatt, valamint azért, mert a Napsütés nyeresége elhanyagolható és nem mindig számolhatunk vele. A vizsgált paramétereket a szakirodalomban szereplő értéktartománnyal vettem figyelembe, majd 10% módosítás hatásaiból állapítottam meg,

hogy a belső fajlagos hőnyereség az a paraméter, mely ezek közül a legnagyobb hőmérsékletváltozást eredményezte. Erre végeztem el az identifikálást és a minimum keresést.

A belső fajlagos hőnyereség identifikálását és a modell validálását a következők szerint végeztem el. Az elkészült modellel kapott lakótér szimulált hőmérséklet és a lakótér mért hőmérséklet eredményeit összehasonlítva ellenőriztem a modell megfelelő pontosságát. A q_b belső fajlagos hőnyereség értékét keresem. Így a célkitűzésben szereplő modell megalkotásának egyik lépése a belső fajlagos hőtermelés olyan legkisebb, legnagyobb vagy optimális értékének meghatározása lett, amely mellett a legkisebb az eltérés a mért és számított hőmérsékletek között. Ezt a célt a legkisebb négyzetek módszerével felállított célfüggvény minimumának keresésével értem el.

$$J(q_B) = \int_0^t (T_{house_m} - T_{house_{sz}})^2 \cdot dt \Rightarrow \min \quad (3.8)$$

A q_b belső fajlagos hőnyereség értékének meghatározására a MATLAB/Simulink beépített fminsearch függvényét alkalmaztam. A célfüggvény minimalizálásának indításakor a paraméter értékét a TNM rendeletben javasolt 5 W/m^2 értékkel vettem figyelembe. A minimumkeresési célfüggvény bloksémáját a 3.24. ábra mutatja be.

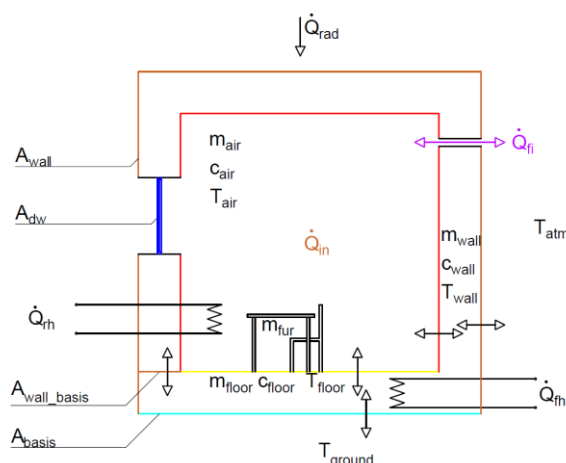


3.24. ábra A minimalizálandó célfüggvény (3.8) realizálása Simulink-ben

Az identifikált és validált modell mért és számított eredményei közötti különbség minimális, így kellő pontosságú a modell. Az identifikációt és több épületen elvégzett validáció eredményeit az eredmények 4.4 fejezetben mutatom be részletesen. Ezzel a 4.2. fejezetében bemutatásra kerülő fajlagos belső hőnyereség értékkel lefuttatva a modellt, ahol a korrelációs együttható $R=0,9288$ és annak négyzete $R^2=0,8627$ adódott, amely számszerűen is igazolja a modell kellő pontosságát. A modell alkalmazható más épületek esetében is, teendő csupán az adott épület geometriai adatainak megadása az alkalmazott anyagok tulajdonságaival, valamint a belső fajlagos hőtermelés meghatározása. Tervezéskor vagy tervezett felújításkor geometriai és az épülethatároló szerkezetek anyagára vagy tájolásra szolgáló optimalizációra is alkalmassá tehető a modell.

3.4.2 Egyszerűsített modell

Az egyszerűsítésre azért volt szükség, mert a modell futtatása nagy gépkapacitást igényelt, egy-egy optimalizáció és szimulációs kísérlet lefuttatása több órát vett igénybe. További kutatási és fejlesztési lehetőség lehet a modellben alkalmazott fizikai alapokon nyugvó differenciálegyenletek Laplace transzformációval történő analitikus megoldása és egyszerűsítése. Ezáltal egy még gyorsabban futtatható szimulációs eszközt lehetne fejleszteni. Ami továbbra is white-box alapokon működtethető. A 3.25-ik ábrán az egyszerűsített modell építőelemei láthatóak.



3.25. ábra Az egyszerűsített modell vázlata

Az egyszerűsített modell belső hőmérsékletét leíró differenciálegyenletek

A lakóház belső terének hőmérsékletét leíró differenciálegyenlet:

$$\begin{aligned}
 (m_{air} \cdot c_{air} + m_{water_rh} \cdot c_{water} + m_{fur} \cdot c_{fur}) \cdot \frac{dT_{air}}{dt} = & P_{rh} + n f_{house} \cdot V_{house} \cdot \rho_{air} \cdot c_{air} + \\
 & q_B \cdot A_{floor} + A_{wall} \cdot k_{air_wall} \cdot (T_{wall} - T_{air}) + A_{floor} \cdot k_{floor_air} \cdot (T_{floor} - T_{air}) + \\
 & A_{dw} \cdot k_{dw_atm} \cdot (T_{atm} - T_{air})
 \end{aligned} \quad (3.9)$$

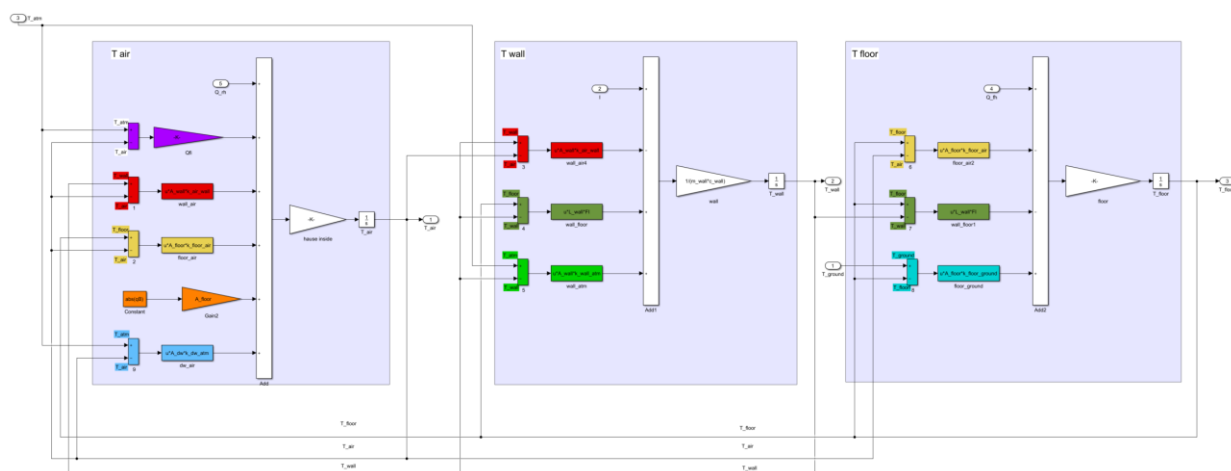
A lakóház határoló felületeinek hőmérsékletét leíró differenciálegyenlet:

$$\begin{aligned}
 (m_{wall} \cdot c_{wall}) \cdot \frac{dT_{wall}}{dt} = & Q_{rad} - A_{wall} \cdot k_{air_wall} \cdot (T_{wall} - T_{air}) + L_{wall} \cdot FI \cdot \\
 & (T_{floor} - T_{wall}) + A_{wall} \cdot k_{wall_atm} \cdot (T_{atm} - T_{wall})
 \end{aligned} \quad (3.10)$$

A lakóház padlójának hőmérsékletét leíró differenciálegyenlet:

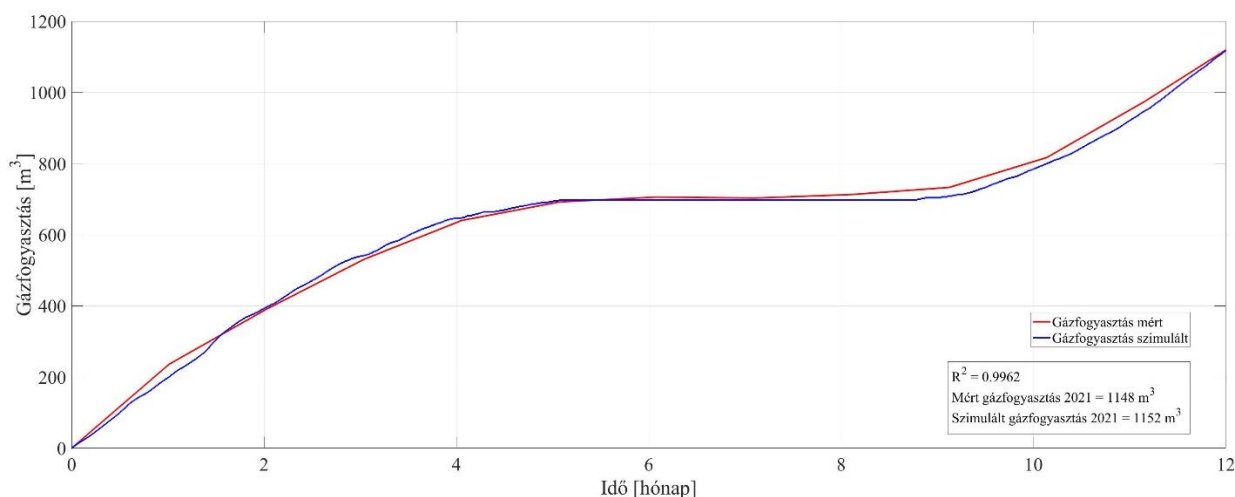
$$\begin{aligned}
 (m_{floor} \cdot c_{floor} + m_{water_fh} \cdot c_{water}) \cdot \frac{dT_{floor}}{dt} = & P_{fh} - A_{floor} \cdot k_{floor_air} \cdot (T_{floor} - T_{air}) - \\
 & L_{wall} \cdot FI \cdot (T_{floor} - T_{wall}) + A_{floor} \cdot k_{floor_ground} \cdot (T_{ground} - T_{floor})
 \end{aligned} \quad (3.11)$$

A MATLAB/Simulink környezetben kialakított egyszerűsített modell blokksémáját a 3.26. ábra tartalmazza, ahol azonos színjelölést használtam, mint a 3.25. ábrán, a folyamatok könnyebb beazonosításához.



3.26. ábra Az egyszerűsített modell blokkdiagramja

Az egyszerűsített modellel elvégeztem az identifikációt q_b belső fajlagos hőtermelésre a mért és szimulált hőmérsékletek alapján 3.4.1 fejezet szerint. A validálást pedig az identifikációtól eltérő egy éves időszakra végeztem el öt különböző épületre a mért és szimulált gázfogyasztás alapján. Melyet az eredmények 4.2 fejezetében mutatok be részletesen. A gázfogyasztás mért és számított értékére. Az R^2 értéke a 0,9962 volt, így kellően pontos és alkalmas további vizsgálatokra. Legfőbb előnye az egyszerűsített modellnek, hogy kellő pontosság mellett gyorsabban végezhetőek el a kutatás során sokszor ismétlődő más-más beállításokkal végzett szimuláció. A 3.27. ábrán a mért és számított gázfogyasztás látható. Az épületek tulajdonosaik által megadott fűtésre fordított gázfogyasztási adatokat a melléklet M5.1. táblázata tartalmazza.



3.27. ábra Gázfogyasztás mért és számított értékei 2021.01.01.-2021.12.31. időszakra

Statisztikai számítások az adatok feldolgozása során

Hőmérséklet alapjel 1°C -al történő csökkentése

A vizsgált épületek átlagos fajlagos fűtési energiaigényének meghatározása

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.12)$$

A százalékos változás számítása

$$\text{változás} = \frac{x - \bar{x}}{\bar{x}} \quad (3.13)$$

A százalékos változás számítását ilyen formában alkalmaztam a mért és szimulált eredmények összehasonlításánál, valamint az 1°C hőmérséklet alapjel csökkentéssel elérhető százalékos energiafogyasztás megtakarítás meghatározásánál.

Regressziós analízis

Egyszerű lineáris regressziós illesztés esetén alkalmazott közelítő egyenlet általános formája, ahol az m az irányítványozó, ami a meredekséget jelöli. A modell paramétereit Excel beépített függvényével a legkisebb négyzetek módszerével minimalizálva következő összefüggést írhatjuk fel:

$$y = mx + b \quad (3.14)$$

Előrejelzésre használhatjuk az így kapott egyenletet:

$$\hat{y} = mx + b \quad (3.15)$$

Szórás meghatározás

Az átlagértékekből standard szórás értékének meghatározására az következő összefüggést használjuk:

A szórás

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.16)$$

Determinációs együttható számítása

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (3.17)$$

$$SS_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.18)$$

$$SS_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.19)$$

Az R^2 értékének számítása MATLAB környezetben:

```
R = corrcoef(x, y);
r = R(1, 2); % A korrelációs együttható
R^2 = r^2; % R^2 érték kiszámítása
disp(R^2) % Eredmény kiírása
```

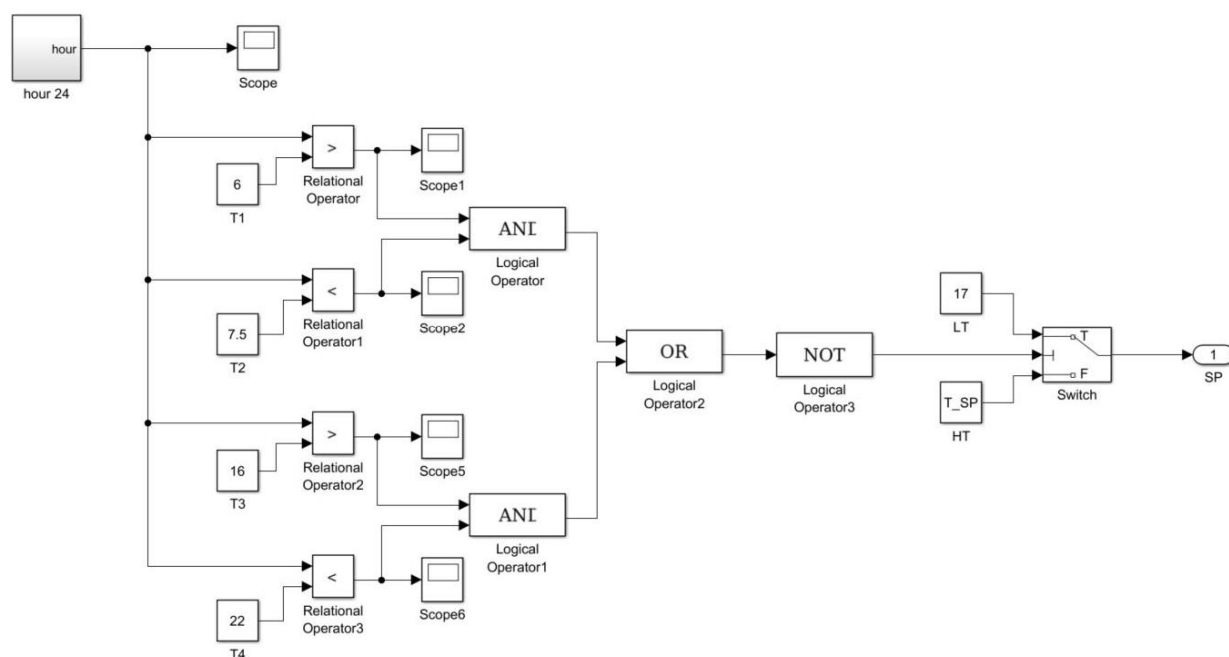
3.4.3 Validációs épületek

A blokkorientált modellezés és a MATLAB/Simulink környezet egyik legnagyobb előnye a könnyű adaptálhatósága. A modellek egy .m fájlban tartalmazzák a vizsgált épület jellemzőit. Így tehát a modell kiterjesztése más épületekre ezeknek az adatoknak a megadásával történhet.

A kutatásomat, hogy a 3.5. fejezetben ismertetett egyszerűsített modell megfelelő működését és további összehasonlításokat végezhessek el kiterjesztettem öt épületre, ahol rendelkezésre álltak gázfogyasztási adatok, valamint az épületek modellezéséhez szükséges bemeneti – épületfizikai és geometriai - adatok, valamint a termosztáton beállított hőmérséklet értékek. A környezeti hőmérséklet és a globálsugárzás értékeit az anyag és módszer fejezetben bemutatott NASA adatforrásból szereztem be. Ezekre a modellekre is elvégeztem a korábban a 3.4.1. fejezet szerint identifikált belső fajlagos hőtermelés paraméterrel $q_b=4.9687 \text{ [W/m}^2\text{]}$ a validációt a gázfogyasztási értékek alapján. A beazonosíthatóság miatt B1-B5 elnevezéssel hivatkozom őket a továbbiakban. Az épületek minden esetben családi házak, amelyek az ország különböző pontjain találhatók, van köztük korszerűtlen és korszerű is. Az épületek részletes adatai az M5 mellékletben találhatók meg.

Validáláshoz szükséges bővítések

Az épületekben más-más szabályozási módokat és beállításokat használtak a lakók. Ezért a különböző szabályozási módokat és időprogramokat is beépítettem a modellbe. Így lehetőség van állandó alapjel, PID szabályozás, vagy (3.28. ábra) időprogram szerinti változó alapjel használatára is.



3.28. ábra Változó alapjel MATLAB Simulink sémája

A kutatás további részében ezeknek az épületeknek, épületfizikai jellemzőinek, lokációjának és szabályozási módjainak összehasonlítását végeztem el. Ezeknek az eredményeit az Eredmények fejezetben mutatom be.

A B1-B5 épületek validálását az egyszerűsített modell validálásával azonos módszerrel végeztem el. A validáció mindegyik lakóépület esetében egy év mért és szimulált gázfogyasztási adatai alapján végeztem el.

Az eredő U értékek meghatározásakor az egyszerűsített és részletes számítási módszerekben is alkalmazott eredő számítási módszert alkalmaztam:

$$U_R = \frac{\sum U_i \cdot A_i}{\sum A_i} \quad (3.20)$$

Identifikáció és validáció

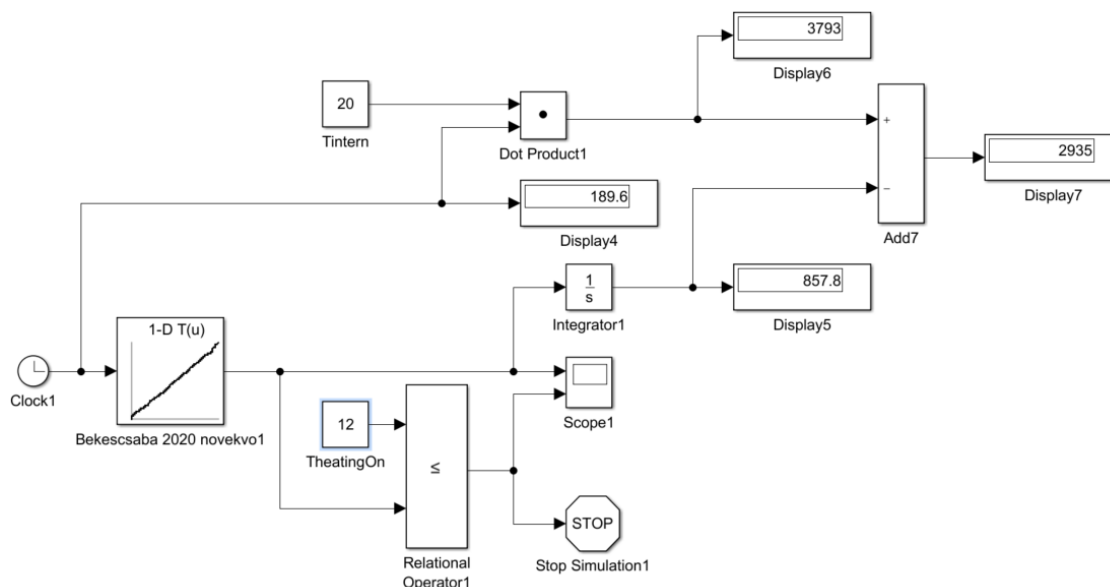
A számítógépes modellezés és szimulációkor, a lakóépületek energiafelhasználásának szimulációja esetén, az identifikáció és a validálás kiemelt jelentőséggel bírnak. Az identifikáció azt a folyamatot jelenti, amely során az épület működésének szimulációjához szükséges releváns paraméterek és változók kerülnek meghatározásra. Ez magában foglalja az épület különböző rendszereinek modellezéséhez szükséges adatok összegyűjtését, feldolgozását, illetve a bemeneti paraméterek meghatározását.

A validálás a számítógépes szimulációban az a folyamat, amely során ellenőrzésre és igazolásra kerül, hogy a szimulációs modell képes-e a valós világban tapasztalt működést pontosan előre jelezni. Ez azt jelenti, hogy a modell által generált eredményeket valós mérésekkel vagy referenciaadatokkal kerülnek összehasonlításra.

Az identifikációt és a validálást különböző adatsorokon végeztem el, így elkerülhető volt a torzítás, az úgynevezett overfitting. Az overfitting során a modell túlzottan alkalmazkodik a használt adathalmazhoz, ami csökkenti annak képességét, hogy új, ismeretlen adatokra jól reagáljon. Ezért az identifikálást egy rövidebb mérési adatsoron végeztem el, míg a validálást egy hosszabb mérési adatsoron.

3.5. Az éves fűtési hőfokhíd meghatározása MATLAB/Simulink környezetben

A fűtési energiaigény egyszerűbb meghatározásához, ami figyelembe veszi az adott lakóépület elhelyezkedését is jellemző érték a fűtési hőfokhíd és a fűtési idény hossza is. A magyarországi mérnöki gyakorlatban a szakirodalmi áttekintés fejezetben bemutatott konvencionális fűtési hőfokhíd értékeit alkalmazzák. A fűtési hőfokhidak számításához szükséges napi átlaghőmérséklet adatokat a NASA oldalán elérhető adatbázisból dolgoztam fel: 2020-2023 évekre a vármegyék székhelyeire, valamint Gödöllőre és Zabarra. Az adatsorokat a melléklet M6.1. táblázata tartalmazza. Ennek feldolgozásához szükséges volt az adatok MATLAB számára feldolgozható rendezése és az .m fájlok elkészítése. A 3.29. ábra ennek a hőfokhídnak a számítását végző MATLAB megvalósítása látszik, ami a rendezett hőmérsékleti adatok alapján MATLAB segítségével határozom meg a 20/12 °C hőfokhídhoz tartozó értékeket.



3.29. ábra Fűtési hőfokhíd és fűtési napok számítása

3.6. Ismétlődő feladatok automatizálása MATLAB/Simulink környezetben

A szimulációk elvégzése során a modelleket egymás után többször kell lefuttatni, egy paraméter adott lépésköz szerinti változtatásával. Erre kifejlesztett megoldás a scriptek készítése és futtatása, mellyel automatizálni lehet ezeket a folyamatokat. Kezdve a futtatások automatikus indításával a különböző beállítási értékek mellett, vagy az adatok folytatólagos rögzítésére. A scriptek alkalmazásával a hibák is minimalizálhatóak, mivel az adatokat akár a MATLAB munkafelületére, vagy további feldolgozásra Excel fájlba is menthetők. A MATLAB ban a scriptek is .m fájlkiterjesztésűek. A scriptek főbb jellemzői a sorrendiség, ami az utasítások megadott sorrendű végrehajtását jelenti. Közvetlenül a MATLAB munkaterületén végzik el a változók módosítását. A scriptek önállóan futtathatóak. Kellő interaktivitást biztosítanak, mivel a futtatás közben a MATLAB felületén keresztül közvetlenül megjelennek a változtatás eredményei, ami előnyös pl. grafikonok megjelenítésekor.

A kutatás során scripteket is alkalmaztam. Ezek segítségével végeztem el a szimulációk során a hőmérséklet alapjel változtatását, vagy a hőkapacitás módosítását is. Az adatok Excel formátumba való kimentését. Az általam készített és alkalmazott scriptekből -terjedelmi korlátok miatt - a fontosabb részleteket a mellékletben mutatom be.

Az anyag és módszer fejezetben bemutatott módszerek és eljárások segítségével végeztem el kutatásomat. Mérési eredményekkel validált szimulációs modellekkel. Valamint kisminta modellek segítségével. Az így elvégzett kutatások eredményeit a következő fejezetben mutatom be.

4. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE

Az értekezés ezen fejezetében a kutatásom során elért eredményeket mutatom be, amelyek alapján megfogalmazom az új tudományos eredményeket. Ezek az eredmények, amelyek lakóépületek fűtési fajlagos energiaigényével foglalkoznak a napi gyakorlatban is hasznosak, pontosítanak eddig nem ismert vagy nem kellően meghatározott folyamatokat. A kutatásom során először kisminta modellépületeken végzett méréseket és azok szimulációját végeztem el valós időjárási körülmények között. Majd egy valós épület mérési eredményei alapján készítettem el a paraméter identifikációt. Ezek után a modell egyszerűsítése újbóli identifikálása és validálását hajtottam végre egy éves időszakra, öt épületre. A validált modellekkel végeztem el ezt követően a szimulációs kísérleteket, amelyből vontam le az eredményeket és következtetéseket.

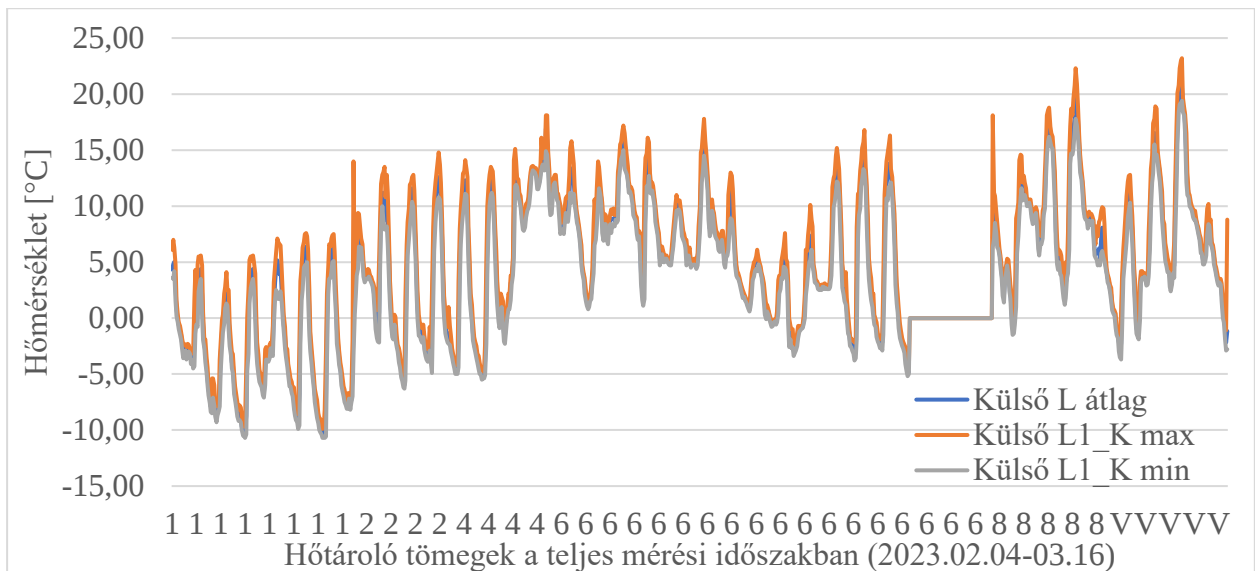
4.1. Kisminta modellek eredményei

Mérések az anyag és módszer fejezetben ismertetett módon történtek. Az adatrögzítés 5 perces időközökkel történt. A 4.1. táblázat a mérések időpontjait és a behelyezett hőtároló tömeget és az időállandókat tartalmazza. Az időállandó meghatározásához a 2.3. Lakóépületek időállandója fejezetben bemutatott (2.11) összefüggést alkalmaztam.

4.1. táblázat Kisminta modell épületek vizsgálatai

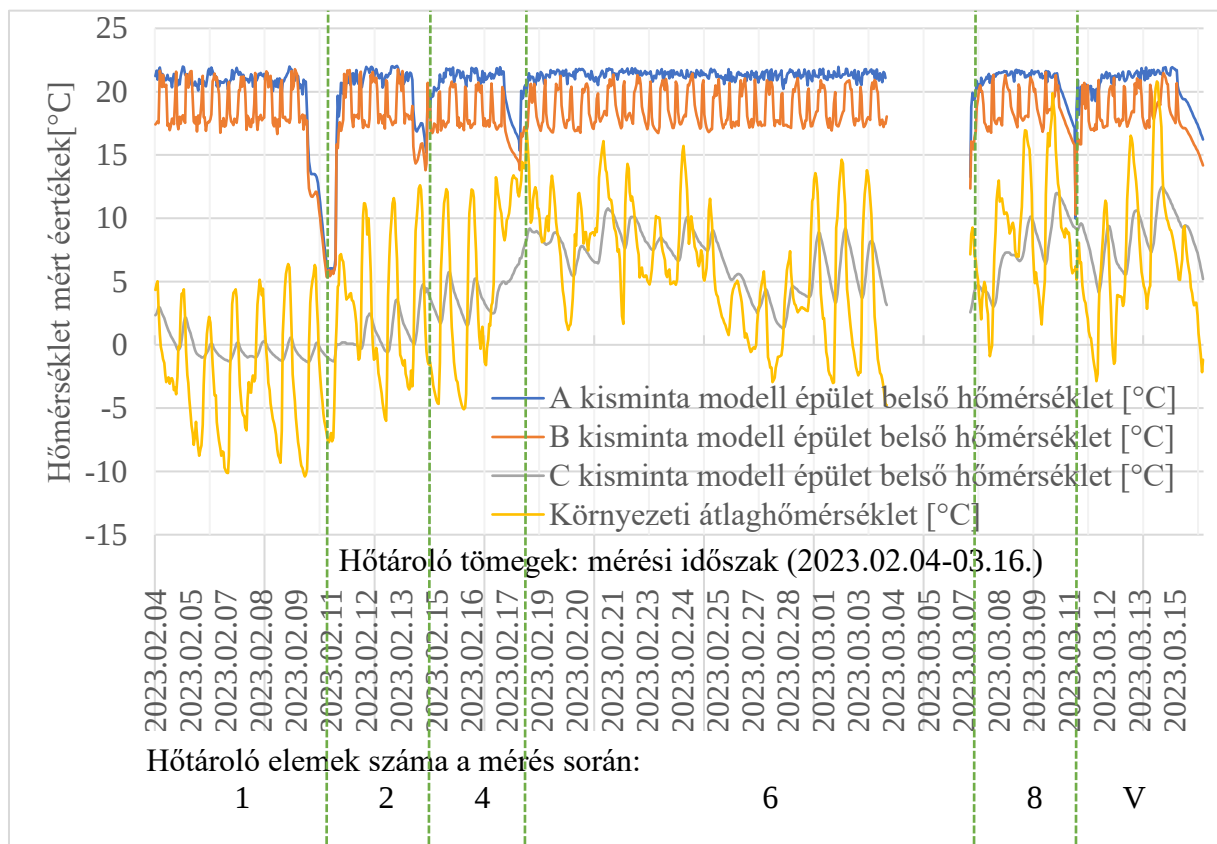
Mérés	Vizsgált időpont	Hőtároló tömeg	TTC termikus időállandó [h]	Mért épületek	Hőmérséklet adatpont	Energiafogyasztás adatpont
1.	2023.02.04-02.11	1 db 27 kg	14,506	A, B, C	93600	28800
2.	2023.02.11-02.14.	2 db 54 kg	18,508	A, B, C	56160	17280
3.	2023.02.14-02.18.	4 db 108 kg	26,512	A, B, C	37440	11520
4.	2023.02.18-03.04.	6 db 162 kg	34,515	A, B, C	243360	74880
5.	2023.03.07-03.11.	8 db 216 kg	42,519	A, B	56160	17280
6.	2023.03.11-03.16.	105 liter víz	78,299	A, B	56160	17280

A mérések során rögzített mérési adatsorok 57406 sorból és 18 mért értékből állnak. Az órás összesített adatokat a mellékletben helyeztem el. A kisminta modellek mérése során rögzített környezeti átlag-, minimum- és maximum hőmérsékleteket a 4.1. ábra mutatja be. Az ábrán a teljes mérési időszak látható, valamint a kisminta modellekben lévő hőtároló elemek száma.

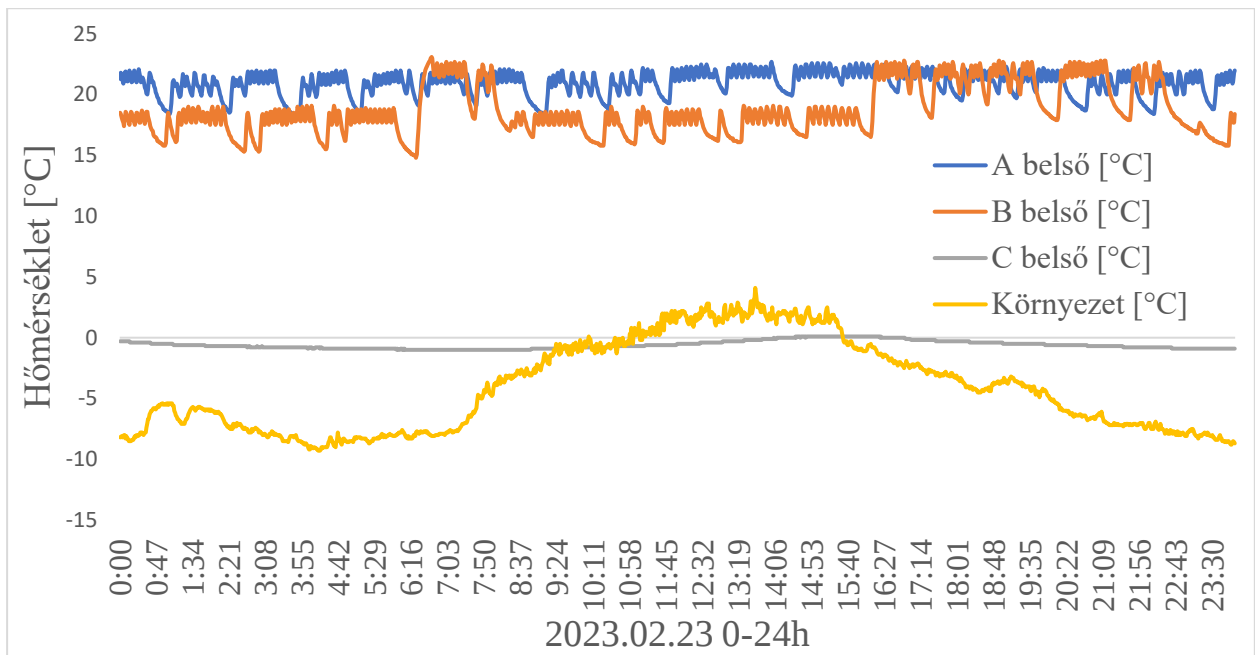


4.1. ábra Külső hőmérséklet mért értékek

A továbbiakban a külső átlaghőmérsékletek, valamint az A, B, és C kisminta modellek mért belső hőmérsékletei láthatóak. A mérési időszak 2023.02.04-től 2023.03.16-ig tartott. Az egyes méréseknél a hőátviteli tömeget a 4.1. táblázatban szereplő értékekkel változtattam meg. A 4.2. ábrán jól látható, hogy az A állandó alapjellel, a B időprogram szerinti változó alapjellel üzemelt. A C fűtetlen volt, azonban nyomon követhető az épület reagálása a külső hőmérséklet változására. A kiugró értékeknél történtek a hőátviteli tömeg módosításai. A szakadásnál pedig betelt az adatrögzítő memóriája. Az egyes elkülönített szakaszok a 4.1 táblázat szerinti hőátviteli tömegekre vonatkozó méréseket jelöli.

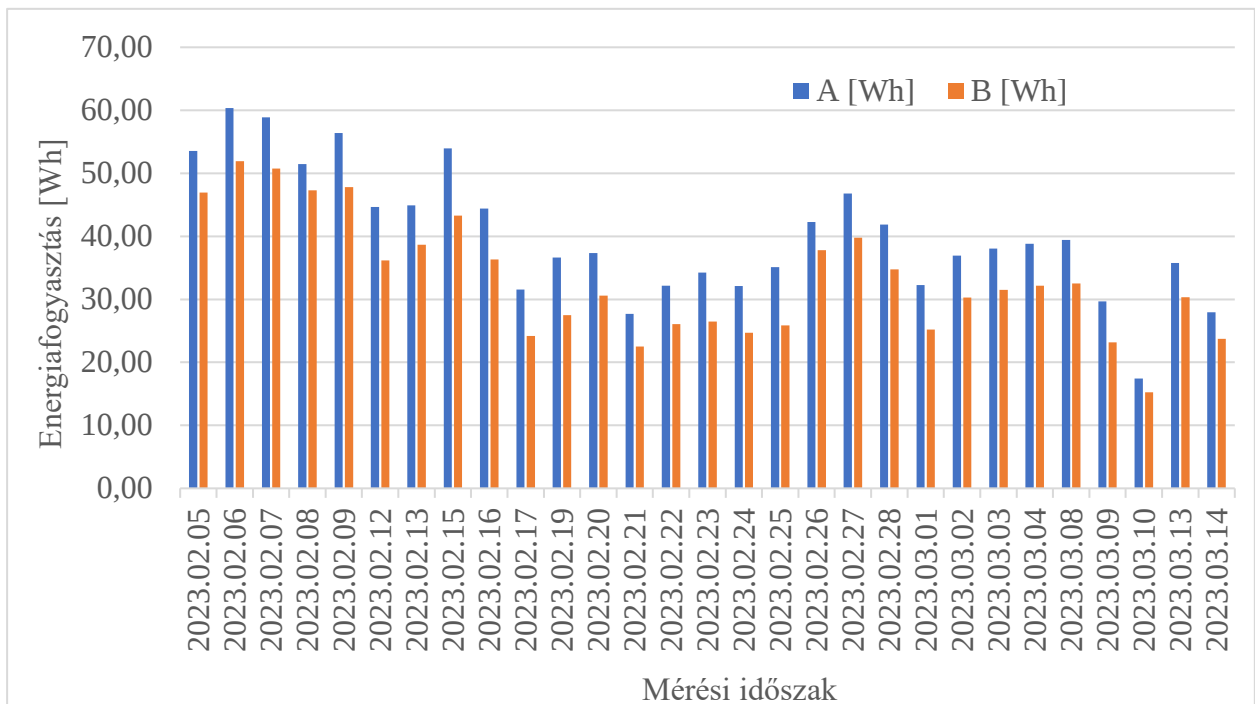


4.2. ábra Mért hőmérsékleti értékek a vizsgálat időszakában 1 órás felbontásban



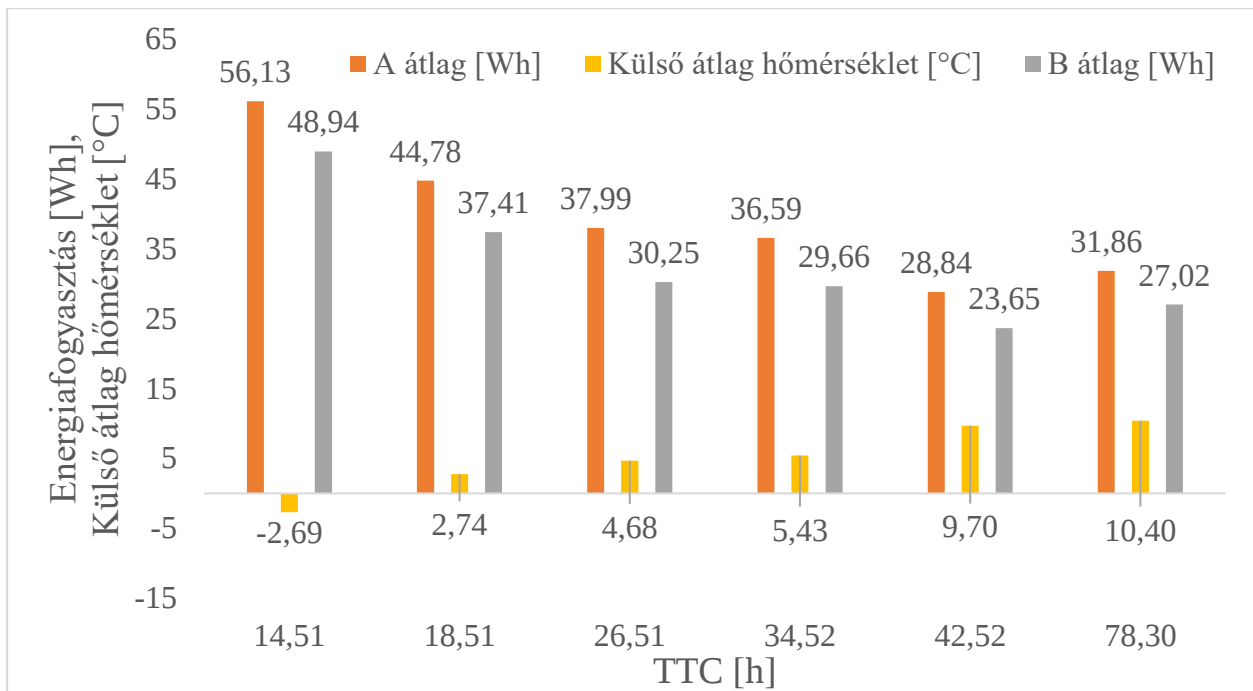
4.5. ábra Egy jellemző mérési nap hőmérséklet adatai

A 4.6. ábra mutatja be a napi összesített villamosenergia fogyasztásokat A és B kisminta modell esetében. Jól megfigyelhető a különbség a szabályozási mód függvényében.



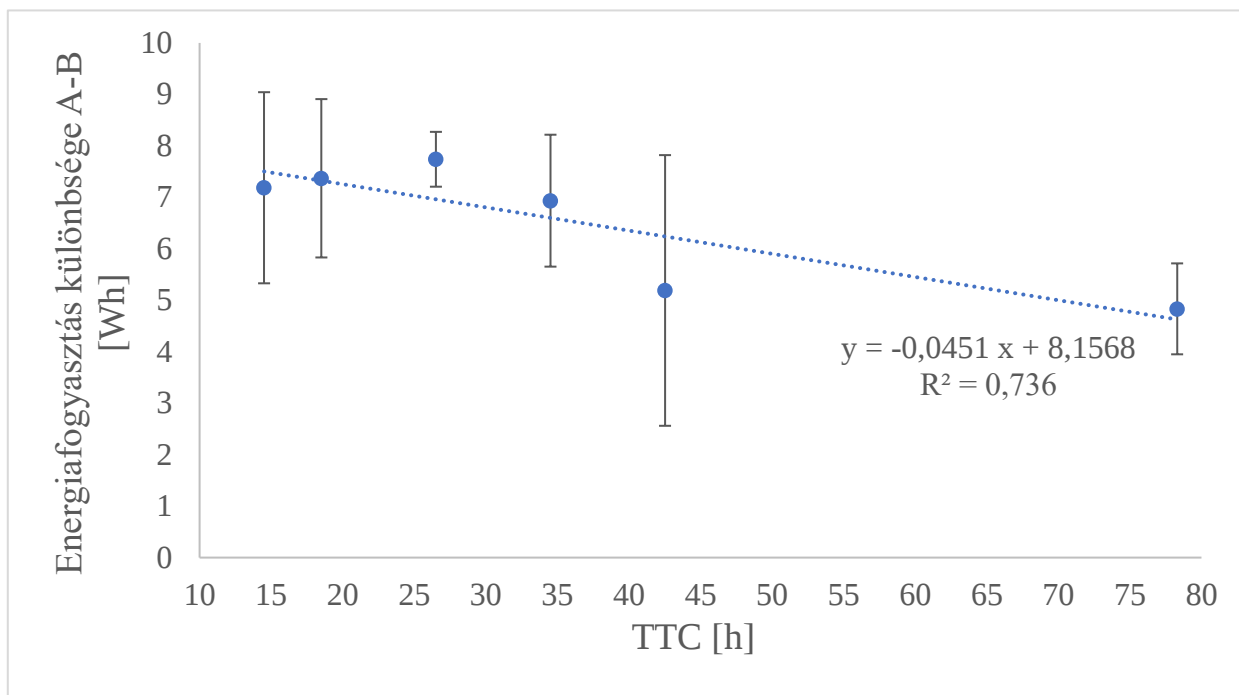
4.6. ábra A és B kisminta modell épületek napi összesített villamosenergia fogyasztása

A mérési adatok alapján megvizsgáltam és ábrázoltam az adott hőtároló tömeghez és a termikus időállandóhoz tartozó energiafogyasztásokat, ezt mutatja be a 4.7. ábra.



4.7. ábra A és B kisminta modell épületek villamosenergia fogyasztása termikus időállandó szerint

4.8. ábra mutatja a termikus időállandókhoz tartozó átlagos villamosenergia fogyasztás különbségét, a szórások értékével. Látható, hogy az energiafogyasztás mértékére hatással van az épület időállandója. A nagyobb időállandó kisebb energiafogyasztás különbséget eredményezett.



4.8. ábra A és B kisminta modell épületek villamosenergia fogyasztásának különbsége termikus időállandó szerint

A mérések alapján és az anyag és módszer fejezetben bemutatott modellel és eljárással végeztem el a szimulációkat. Az A B és C kisminta modellek szimulált és mért adatainak feldolgozását a 4.9. ábra mutatja be.

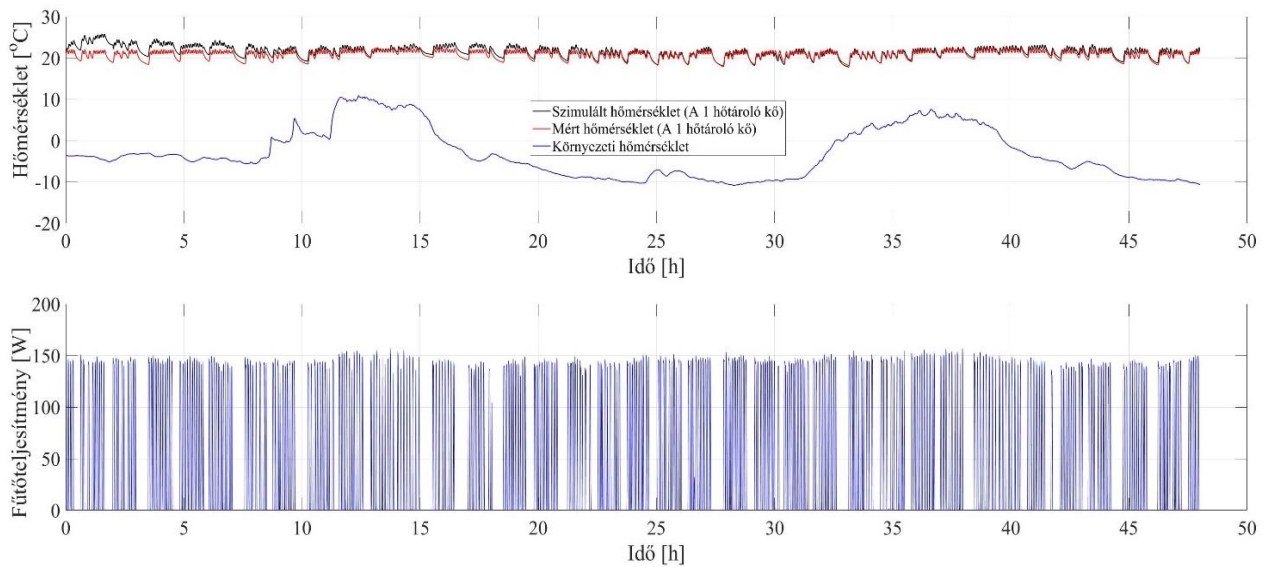


A 4.10. ábra a mért és szimulált eredmények vizuális megjelenítését és a kisminta modell épület mért és szimulált belső hőmérséklet különbségét feldolgozó modellrészletet mutatja be.

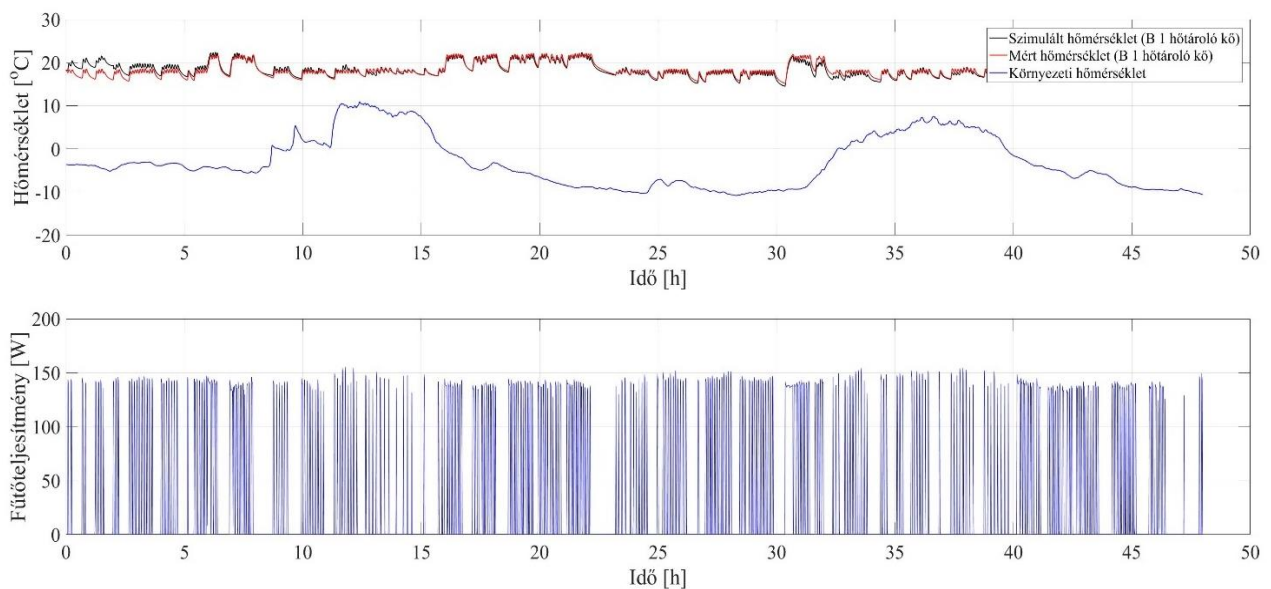


A kisminta modelleken végzett mérések eredményeit a melléklet tartalmazza. A 4.11. ábra az A modellépület mért, szimulált belső és mért külső hőmérsékleteit, a 4.12. ábra az időprogram szerint változó alapjelű B épületet eredményeit mutatja be. A kisminta modellekbe egy-egy hőtároló kő volt behelyezve. A mért fűtőteljesítmény is ábrázolásra került.

Eredmények



4.11. ábra A kisminta modell 1 hőtároló kő



4.12. ábra B kisminta modell 1 hőtároló kő

Az ábrákon jól nyomon követhető az állandó alapjel és az időprogram szerint változó alapjel működése közötti különbségek.

A kisminta modell identifikálása k_{wall} paraméterre történt 2023.02.01-2023.02.04-e között végzett környezeti-, belső hőmérsékletmérési és villamos energiafogyasztási adatok alapján. Az identifikált paraméter $k_{\text{wall}} = 0,535 \text{ W/m}^2\text{K}$ érték adódott. Az eljárás az anyag és módszer fejezet 3.3.3-ik fejezetében került bemutatásra. A 4.2. táblázat a kisminta modell épületek identifikálásának hibáit mutatja be az identifikált paraméterrel és az identifikációs időszakkal.

4.2. táblázat Kisminta modell épületek identifikálása

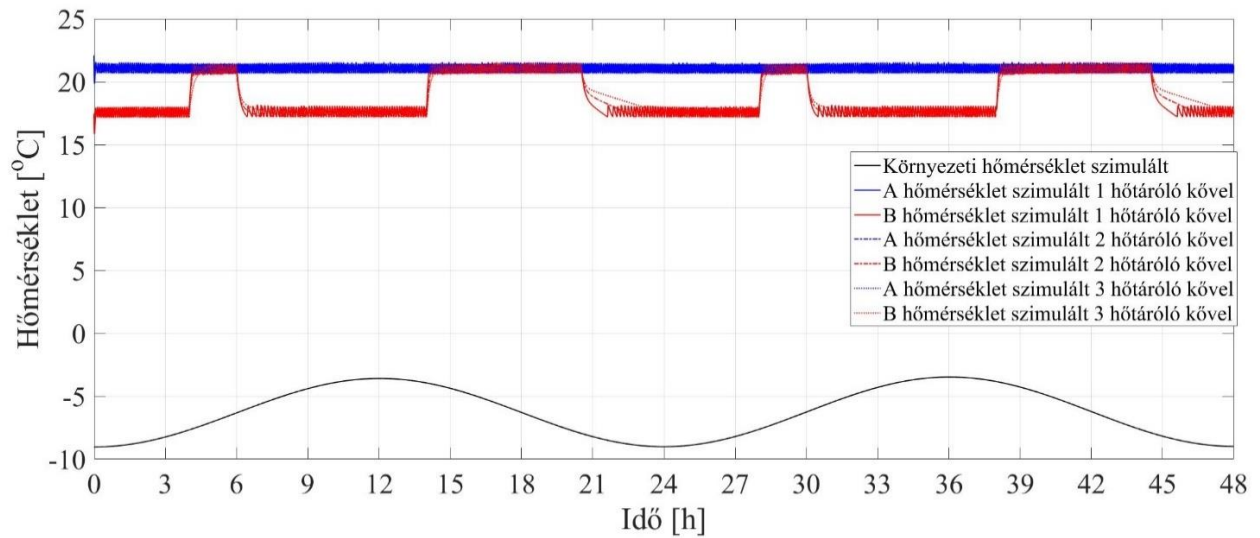
Modell és épület	Hiba			Identifikált paraméter	Identifikációs időszak
	Átlag [°C]	Maximum [°C]	Minimum [°C]		
A	1,4	4,2	-0,5	$k_{\text{wall}}=0,535 \text{ W/m}^2\text{K}$	2023.02.01- 2023.02.04.
B	0,8	2,5	-1,2		
C	1,1	1,9	0,0		

Az identifikált paraméterek alapján más mérési adatsorokkal validáltam a modellt. A 4.3 táblázatban mutatom be a validációs eredményeket. A melléklet M3.21-M3.50. ábrák mutatják be a validálásokat.

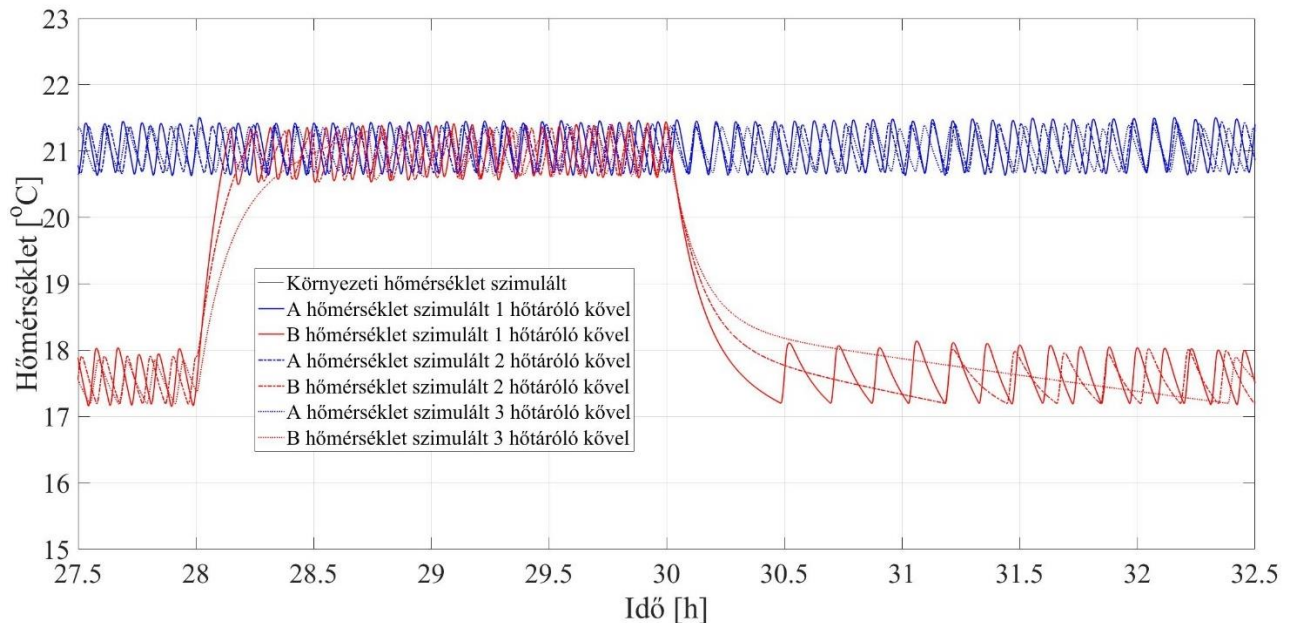
4.3. táblázat Kisminta modell épületek validálása

Modell és épület	Hiba			Validációs időszak
	Átlag [°C]	Maximum [°C]	Minimum [°C]	
A	0,6	4,5	-1,5	2023.02.05- 2023.02.12.
B	0,5	3,3	-2,0	
C	1,0	2,7	-3,6	
A	0,5	2,1	-1,4	2023.02.12- 2023.02.14.
B	0,5	1,2	-2,2	
C	1,6	2,9	-0,2	
A	0,6	1,9	-2,6	2023.02.15- 2023.02.18.
B	0,7	3,5	-2,1	
C	0,6	1,8	-0,9	
A	0,7	2,9	-1,4	2023.02.19- 2023.02.23.
B	0,5	1,8	-2,5	
C	1,0	2,1	-0,2	
A	0,3	1,3	-1,1	2023.03.08- 2023.03.11.
B	0,5	0,7	-2,7	
C	3,3	7,3	0,0	

A hőtároló tömegek módosításának hatását úgy vizsgáltam, hogy a szimulációban módosítottam a hőtároló elemek számát. Összehasonlítva különböző számú hőtároló elem behelyezésével a melléklet M3.5-3.17. ábrái mutatják be. sorozatok eredményeit külön-külön is. A 4.13. ábra a három szimuláció egy ábrában történő ábrázolását mutatja be 48 órás időtartamra. A 4.14. ábra egy rövidebb szakaszt mutat be, ahol nagytva jobban megfigyelhetőek az eredmények.

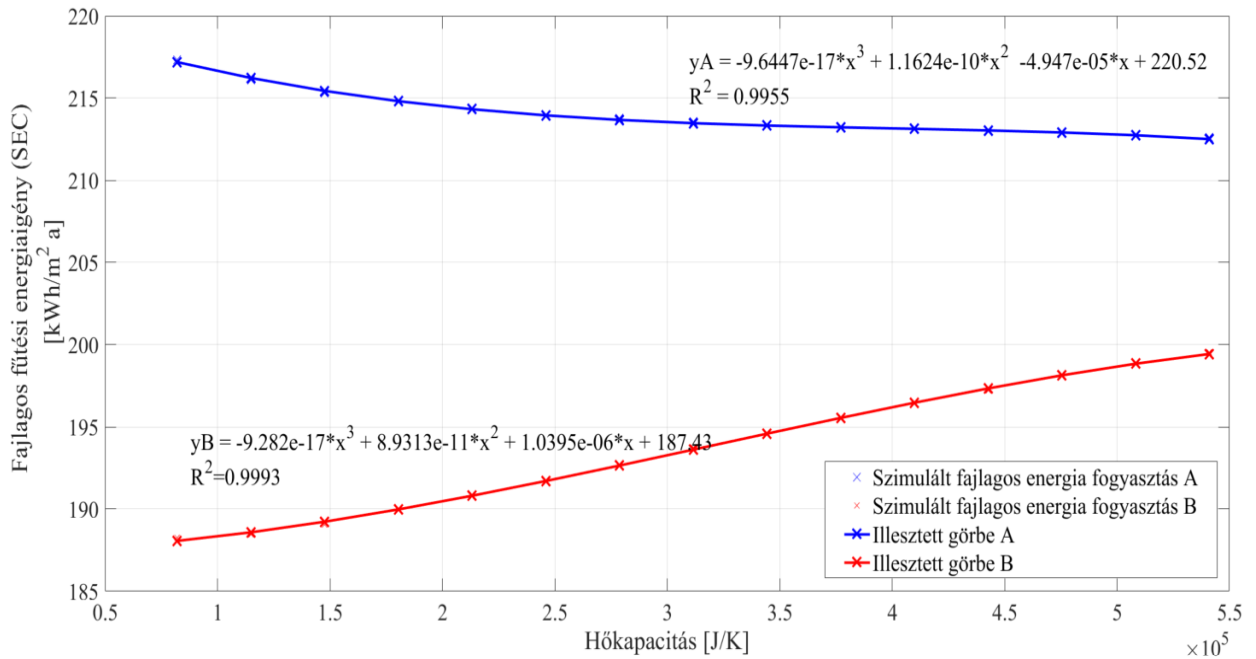


4.13. ábra A és B Kisminta modell épületek hőtároló tömeg módosítása szimulációval 48 óra



4.14. ábra A és B kisminta modell épületek hőtároló tömeg módosítása részlet

A kisminta modellek vizsgálatakor az eredmények alapján a hőtároló tömeg változtatásának megközelítőleg lineáris hatása van a jelenleg használatos épületszerkezet tartományon belül. Az állandó alapjel esetében a hőtároló tömeg növekedésével minimálisan növekszik a fűtési energiamegtakarítás mértéke, míg időprogram szerinti változó alapjel esetében a hőtároló tömeg növekedésével csökken a megtakarítás mértéke. A 4.15. ábrán kék színnel az állandó alapjel, piros színnel az időben változó alapjel szerint tanulmányozhatók a vizsgálat eredményei.

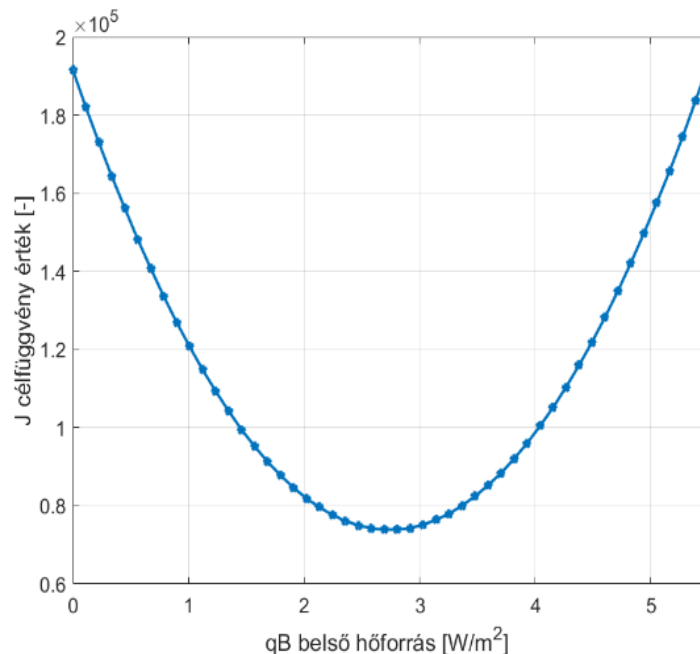


4.15. ábra Fajlagos fűtési energiaigény A és B kisminta modell épületekben

A következő szakaszban a valós épületek eredményeit mutatom be, különösen az új tudományos eredmények bemutatására fókuszálok.

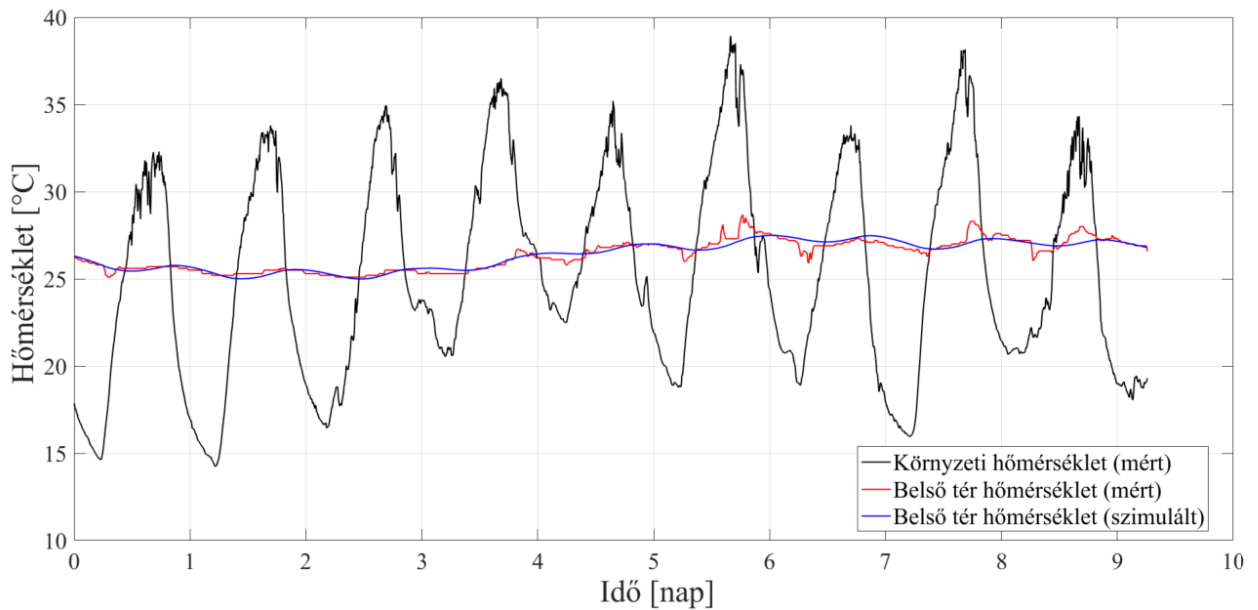
4.2. Valós épület mérési és részletes modell által szimulált eredmények

A paraméteridentifikáció során meghatározott fajlagos belső hőnyereség meghatározása az anyag és módszer fejezet 3.4.1 fejezetében ismertetett minimumkeresési eljárással történt. Ennek eredményét a 4.16 ábra mutatja be.



4.16. ábra J célfüggvény alkalmazása q_b meghatározására

A mért és szimulált eredményeket összehasonlítását a 4.17. ábra szemlélteti. A q_b értéke az eljárás alapján nyári időszakra 2,7473 W/m² értékre adódott. A

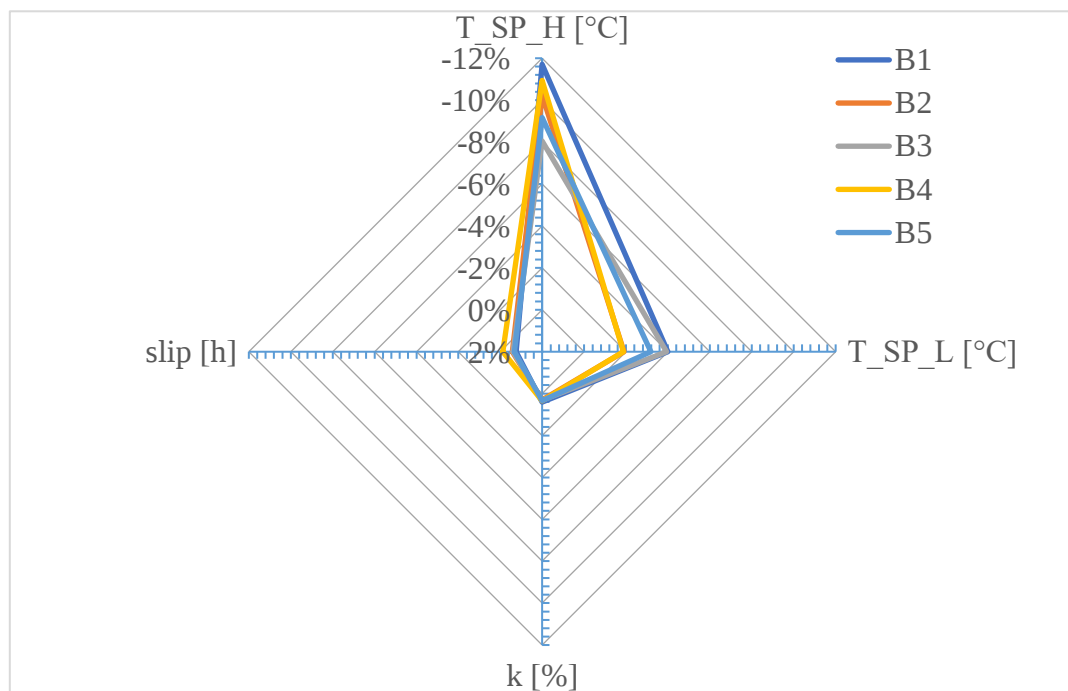


4.17. ábra Valós épület lakóterének- és a környezeti hőmérsékletének mért és szimulált értékei

A valós épület validált modelljének fogyasztási eredményeit a 3.27. ábra mutatja be a rendelkezésre álló 2021-es év gázfogyasztási adatai, valamint a szimulált gázfogyasztás megjelenítésével.

4.3. B1-B5 épületek paraméterérzékenységi vizsgálat

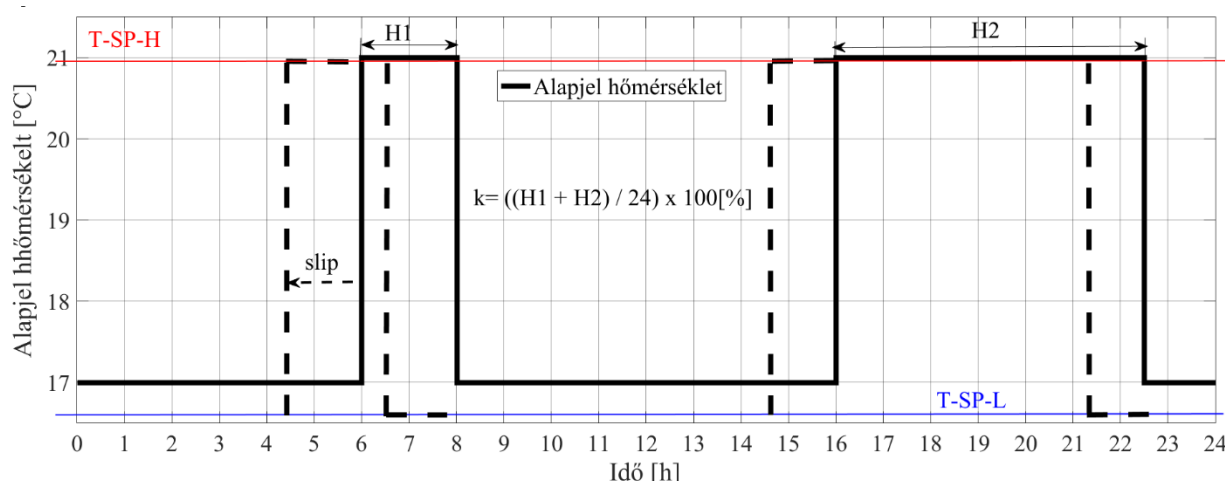
A valós épületekre is elvégeztem a paraméterérzékenységi vizsgálatot. A vizsgált paraméterek: fűtési alapjel felső hőmérséklet (T_{SP_H}), fűtési alapjel alsó hőmérséklet (T_{SP_L}), az időprogram kitöltési tényezője (k), az időprogram eltolása ($slip$). Megvizsgáltam a paraméterek 5 %-al történő változtatásának hatását a fajlagos fűtési energiaigényre, melyet a 4.18. ábra mutat be.



4.18. ábra B1-B5 épületek paraméterérzékenységi vizsgálata

A paraméterérzékenységi vizsgálat értékeit a melléklet tartalmazza.

A kitöltési százalék és az alapjel időprogram eltolás magyarázatát a 4.19. ábra szemlélteti.

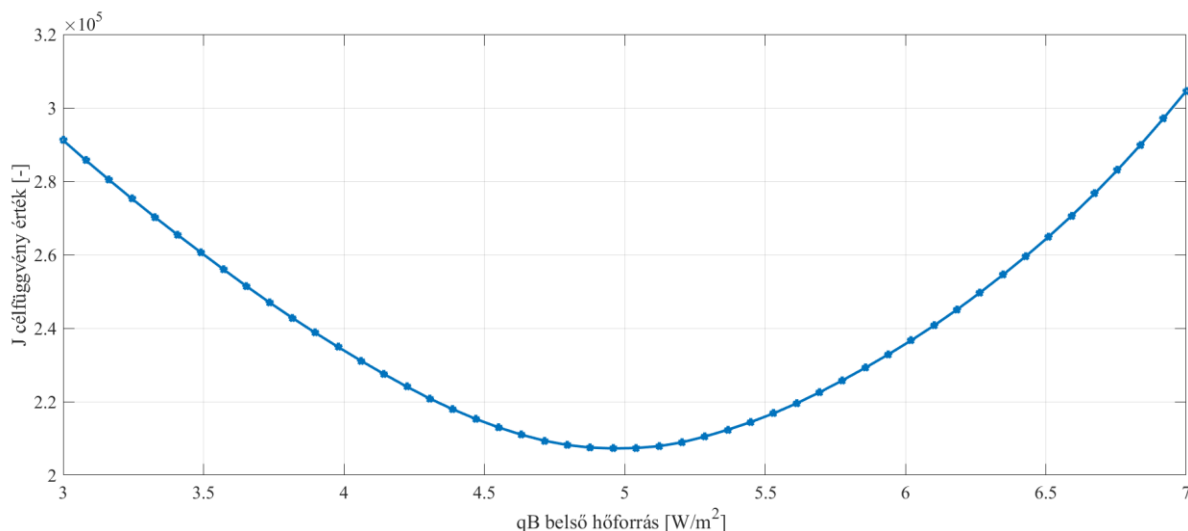


4.19. ábra A kitöltési tényező és az alapjelképzés időbeli eltolás (slip) változtatásának szemléltetése

4.4. B1-B5 épületek eredményei

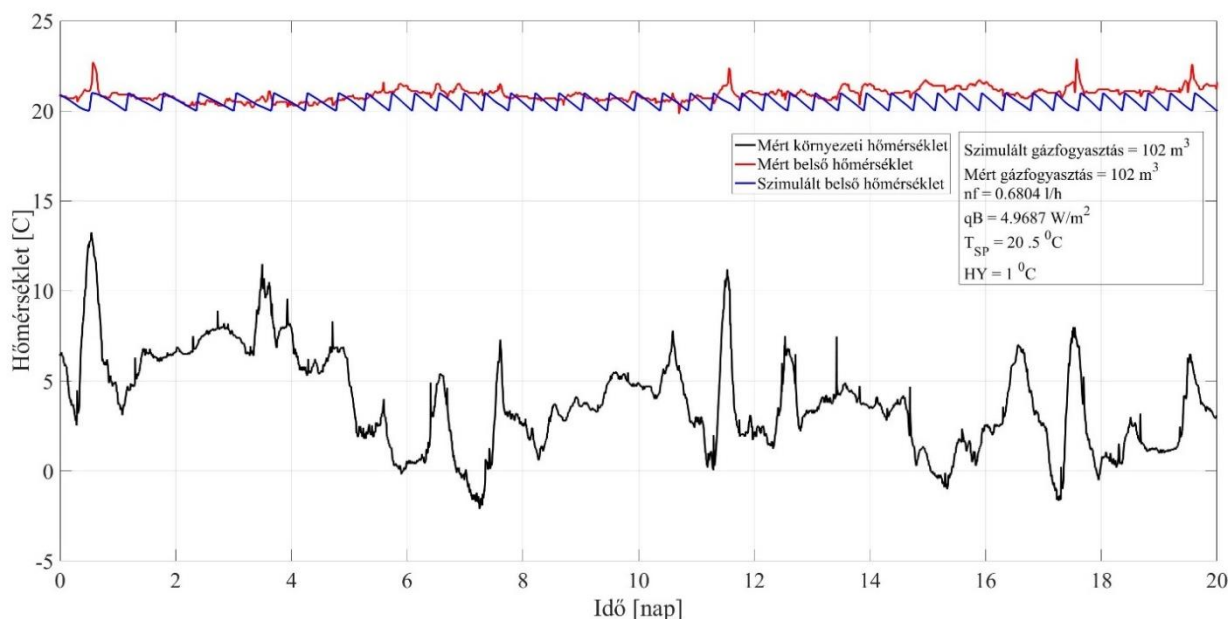
A paraméter identifikációt 2022.11.13-2022.12.04-e között zajlott hőmérsékletmérési adatsorokra végeztem el B2 jelű lakóépületre. A belső fajlagos hőtermelés értéke az eljárás alapján $q_b=4,968 \text{ W/m}^2$ értékre adódott. A részletes modell és az egyszerűsített modell belső fajlagos hőtermelésének különbsége abból adódott, hogy a részletes modell identifikációjánál végzett mérési adatoknál az épület használaton kívül volt, így a bent tartózkodó személyek hőleadása és használati szokásuk nem jelent meg a belső fajlagos hőtermelésben. Az érték a lakóépületben ezen időszakban is üzemelő eszközök és berendezések hőtermeléséből adódott.

A 4.20. ábra a minimumkeresési eljárással meghatározott belső fajlagos hőtermelést mutatja be.



4.20. ábra B2 épület 2022.11.13-2022.12.04 minimumkeresési eljárás

A 4.21. ábra B2 épületre elvégzett identifikáció során meghatározott q_b fajlagos belső hőtermeléssel lefuttatott szimulációs belső hőmérséklet értékek és a mérést belső és környezeti hőmérsékleteket mutatja be.



4.21. ábra B2 épület 2022.11.13-2022.12.04. mért és szimulált lakótér hőmérséklet

A 4.4. táblázat tartalmazza az identifikációhoz tartozó eltéréseket B2 épületre vonatkozóan 2022.11.13-2022.12.04 között végzett saját hőmérsékletmérési adatok alapján. A mérés módszerét az anyag és módszer fejezet 3.1 tartalmazza.

4.4. táblázat B2 épületen végzett paraméter identifikáció

Modell és épület	Hiba			Identifikációs időszak
	Átlag [°C]	Maximum [°C]	Minimum [°C]	
egyszerűsített B2	0,5	2,6	-1,1	2022.11.13-2022.12.04.

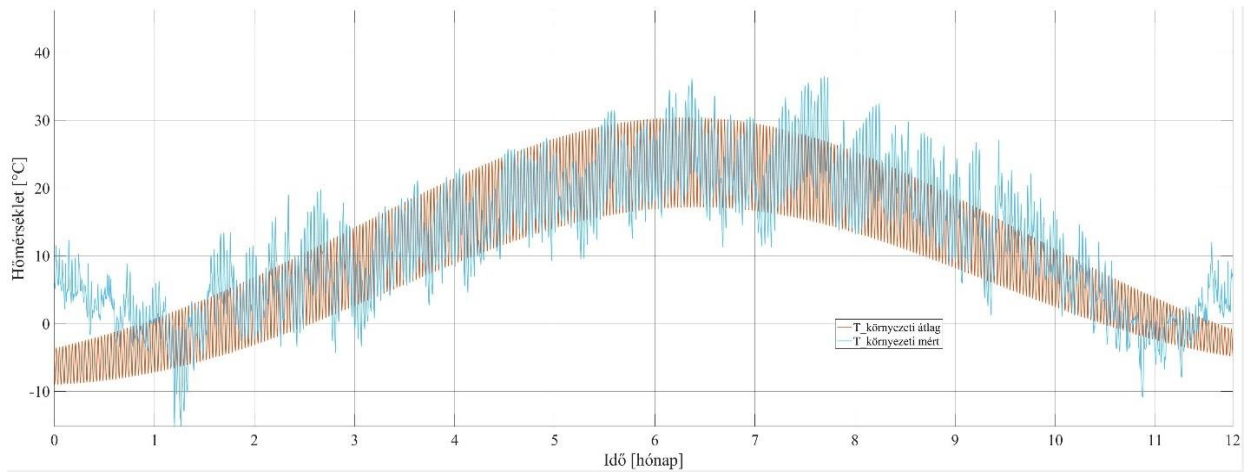
Az identifikáció során meghatározott fajlagos belső hőtermeléssel végeztem el az egyszerűsített modell validálását öt különböző lakóépületre, az anyag és módszer fejezet 3.4.2 bekezdésében bemutatott modellel. A validációs időszakok minden épület esetében egy évre végeztem el.

A különböző években és minőségben épült lakóépületek a 70-es évektől 2020-ig épültek. Ezekről az épületekről rendelkezésre állt dokumentáció és fűtési energia felhasználásukról mérési adatok. Az épületek adatait és alaprajzait a mellékletben helyeztem el. A modell alkalmas további épületekkel történő bővítésre is.

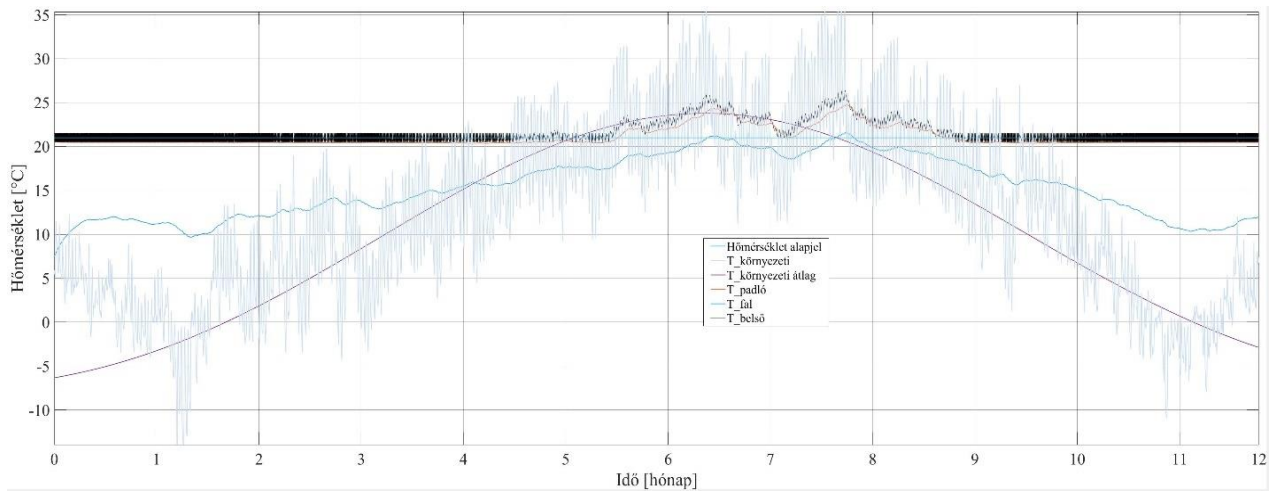
A B2 (3.27. ábra) épület esetében mért gázfogyasztás 1148 m³ volt, míg a szimulált gázfogyasztás 1152 m³ a 2021-es évben. Ez kevesebb, mint 0,35% eltérést jelent.

A 4.22. és 4.23. ábra a B5 épület esetében mutatja be a hőmérsékletek alakulását a szimuláció során 2023 évben.

Eredmények

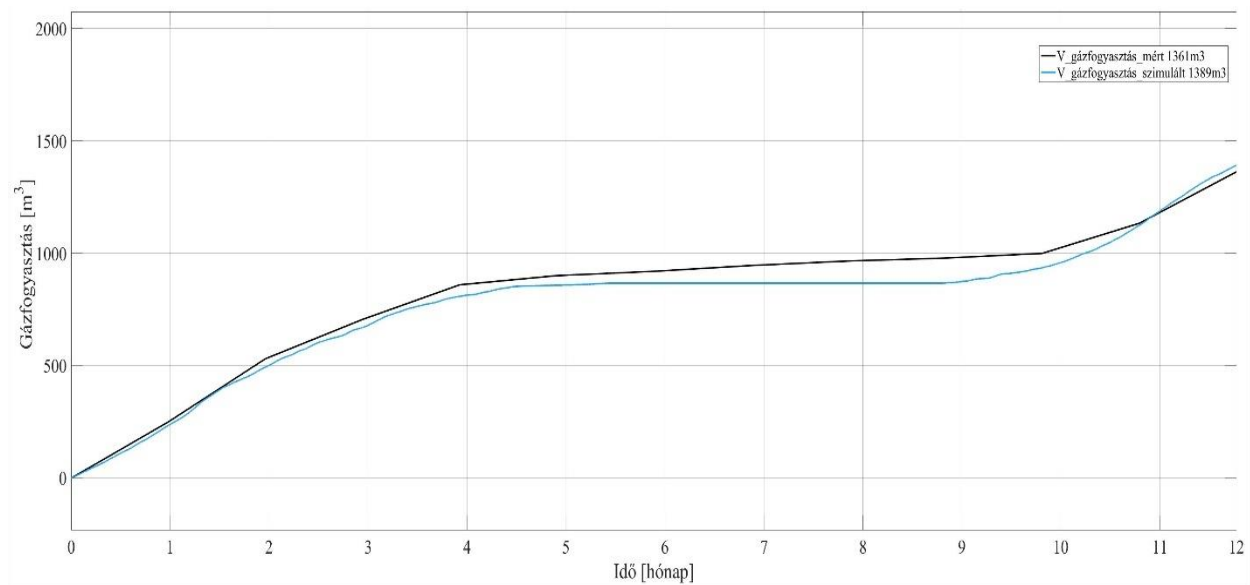


4.22. ábra B5 épület mért és átlagos környezeti hőmérséklete 2023 évben



4.23. ábra B5 épület jellemző hőmérsékletei 2023 évben

A 4.24. ábra a B5 épület esetében szemlélteti a mért gázfogyasztást, ami 1361 m^3 volt, míg a szimulált gázfogyasztás 1389 m^3 2023-ban. Az eltérés ebben az esetben 2% volt.



4.24. ábra B5 épület mért és szimulált gázfogyasztása 2023-ban

A 4.5 számú táblázat tartalmazza az öt különböző épületre elvégzett validációs eredményeket. A validációhoz tartozó további M5.17-M5.26. ábrákat a melléklet tartalmazza.

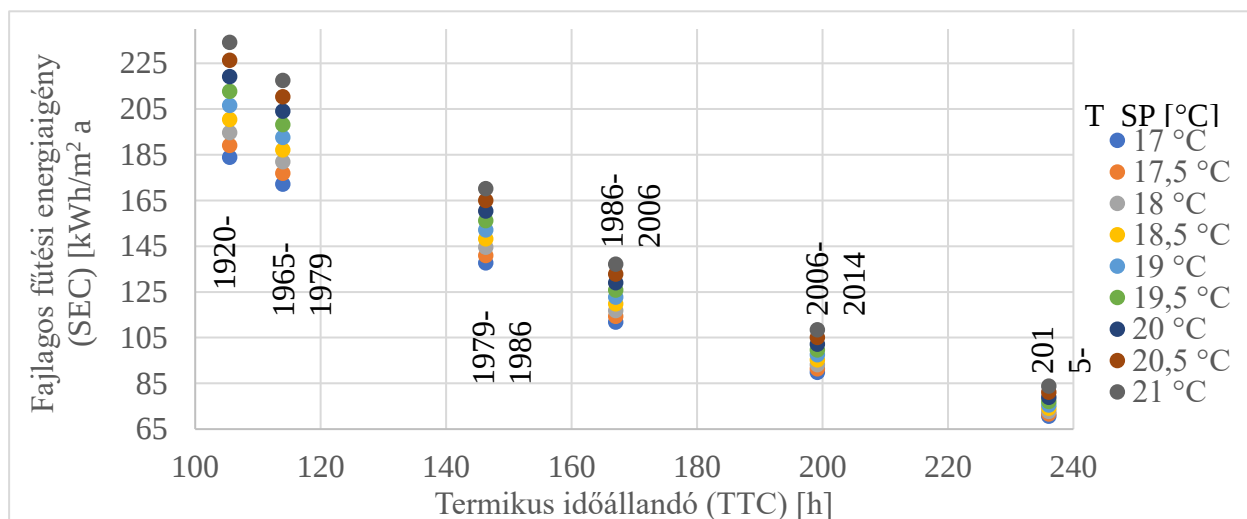
4.5. táblázat validáció B1-B5 épületek

Épület	A/V [m ² /m ³]	Hiba			Éves gázfogyasztás				Validált időszak
		Átlag [m ³]	Maximum [m ³]	Minimum [m ³]	Mért [m ³ /a]	Szimulált [m ³ /a]	Eltérés [m ³ /a]	Eltérés [%/a]	
B1	0,98	24,2	64,1	-24	1621,5	1621,7	-0,2	-0,01%	2021.08.20- 2022.08.20.
B2	1,11	25,8	24	-67,9	1148	1099,7	48,3	4,21%	2021.01.01- 2022.01.01.
B3	0,82	46,1	9,6	-18,7	1685	1657,5	27,5	1,63%	2022.01.01- 2023.01.01.
B4	0,59	66,2	42,8	-158,7	2831,8	2752,3	79,6	2,81%	2023.01.01- 2024.01.01.
B5	1,00	40,8	33,8	-111,4	1363	1391,5	-28,5	-2,09%	2023.01.01- 2024.01.01.

A kisminta modell épületekre és az egyszerűsített modell valós épületekre is elvégeztem az identifikációt, valamint a modell megfelelő működésére eltérő adatsorokkal is elvégeztem a validációt.

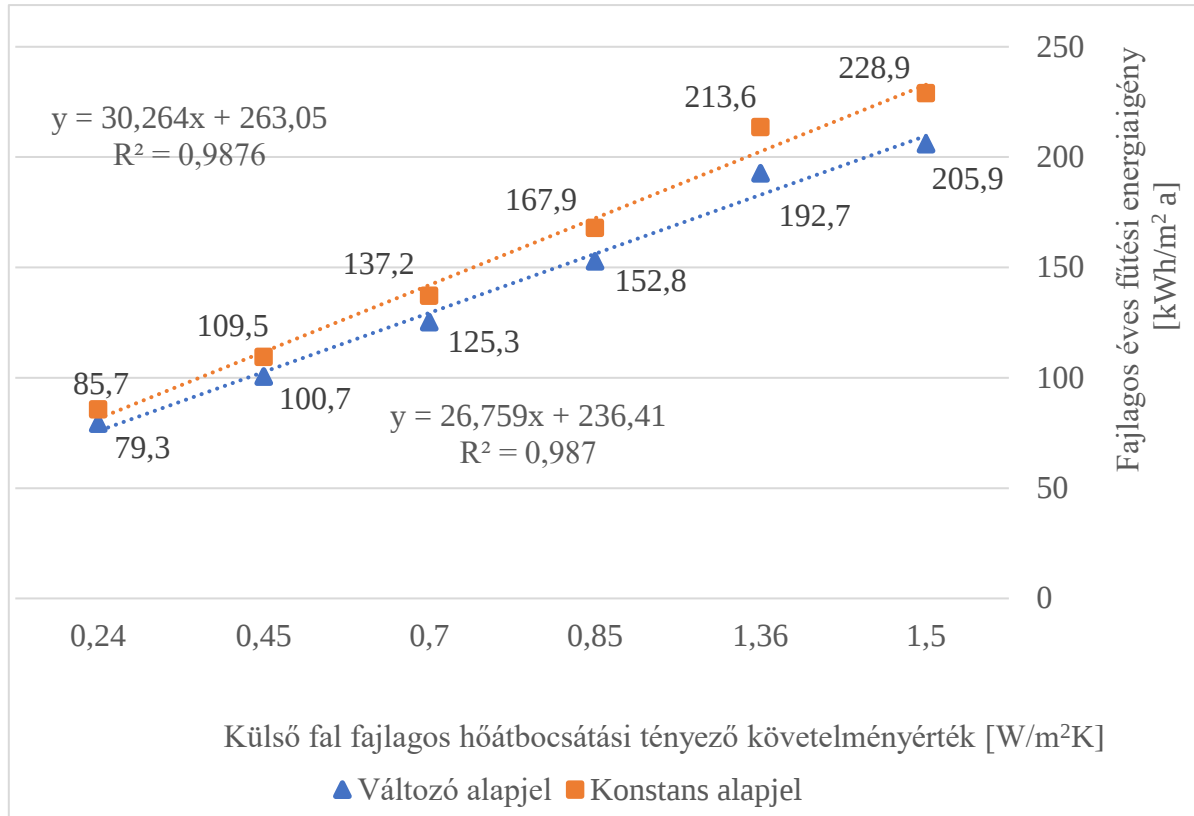
4.5. Külső határoló szerkezet U érték változtatásának hatása

A határoló szerkezetek hőátbocsátási tényezőjének megváltoztatásával végzett vizsgálatok során az egyes határoló szerkezetekre érvényben lévő követelményszintek szerinti szimulációkat végeztem el. Ennek során arról kaptam átfogó képet, hogy az adott épületek milyen fajlagos fűtési energiaigénnyel rendelkeznének, ha a geometriai kialakítása nem, csupán az adott időszakban jellemző határoló szerkezetekkel épült volna fel. Ez gyakorlati szempontból is hasznos, hiszen ez alapján az épület építési ideje (vagy felújítás ideje és szintje) szerint meg lehet becsülni a fajlagos fűtési energiaigényét, továbbá meg lehet határozni a várható energiamegtakarítást az elvégzendő felújítás függvényében. A 4.25. ábra B1 épület esetében mutatja be a falszerkezet változásának hatásait. A különböző hőmérséklet alapjelek (T_{SP}) módosítását a szimuláció során 17 °C-tól 0,5 °C-os lépésközzel 21 °C-ig jelölik az egyes színek.



4.25. ábra B1 épület fajlagos fűtési energiaigényének változása építési időszakok követelményei szerint

Az eredmények feldolgozását követően diagram formájában jelenítettem meg, a könnyebb feldolgozhatóság miatt csak a falszerkezet hőátbocsátási tényezője szerepel az ábrán. A 4.26. ábrán jól látható, hogy a határoló szerkezetek hőátbocsátási tényezői és a fajlagos fűtési energiaigény között lineáris összefüggés van. Az állandó alapjelű 21 °C hőmérséklet tartásának energiaigénye magasabb, mint a változó alapjelű fűtésé. Az ábrán az öt épület átlagértékei szerepelnek, az adott követelményértékek szerint.



4.26. ábra Időben állandó és változó alapjel összehasonlítása az épületek adott korra vonatkozó követelményértékei szerint

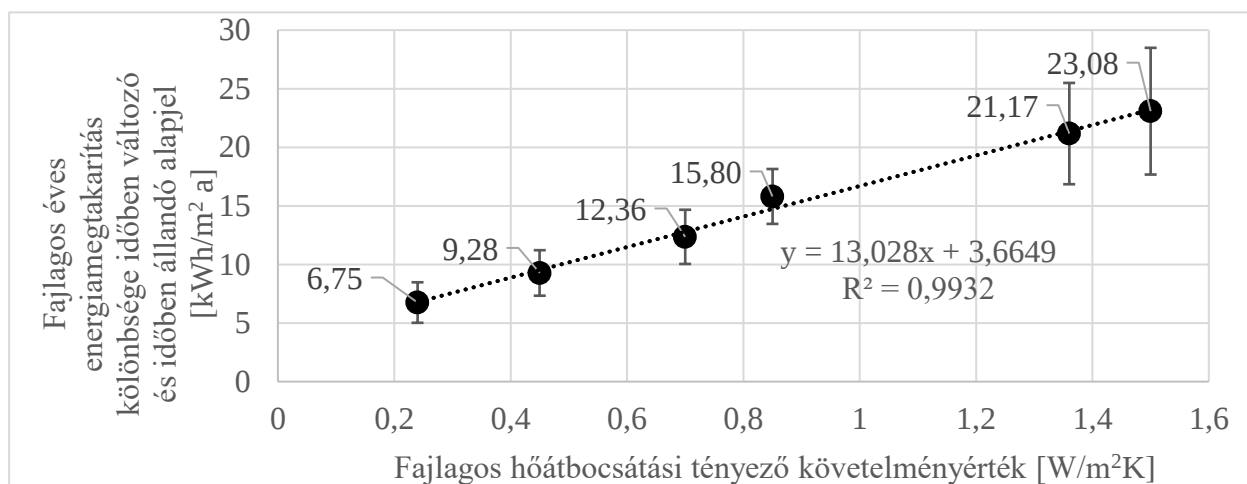
A 4.6. táblázat az egyes korszerűsítési potenciálokat mutatja be. Az elérhető megtakarítás mértéke szerepel az alacsonyabb szinteknek megfelelő épület magasabb szintű követelményeknek megfelelő fejlesztésével.

4.6. táblázat B1-B5 családi házak szimulált energiamegtakarításainak átlagos mértéke változó alapjel esetében

Határoló szerkezetek korszerűsítése változó alapjel mellett		Fajlagos fűtési energiaigény [kWh/m ² a]	Megtakarítás [kWh/m ² a]
Kiindulási állapot	Korszerűsített állapot		
k1	k2	228,95	6,85
	k3		34,73
	k4		64,34
	k5		104,51
	k6		159,72
k2	k3	213,57	26,09
	k4		53,8
	k5		91,4
	k6		143,07
k3	k4	167,89	21,98
	k5		51,8
	k6		92,78
k4	k5	137,17	24,44
	k6		58,04
k5	k6	109,53	27

Az adatokat megvizsgálva még egy viszonylag új építésű 2015-ös követelményszinteknek megfelelő lakóépületet felújítunk k6-os követelményszint szerint, a fajlagos fűtési energiaigény jelentősen, 27 százalékkal csökkenhet. Ez azt jelenti, hogy az épület energiahatékonysága lényegesen javul, aminek köszönhetően kevesebb energiát igényel a fűtésre, így hosszú távon jelentős megtakarítást érhetünk el az energiafelhasználás terén.

A 4.27. ábra az adott építési időszakban előírt követelményeknek megfelelő határoló szerkezetekre vonatkozó szimulációs eredmények átlagát szemlélteti, a mértékadó szórást is feltüntetve. A változó alapjel alkalmazása minden esetben energetikai megtakarítást eredményez, azonban minél korszerűbb egy épület határoló szerkezete, annál kisebb az elérhető megtakarítás.

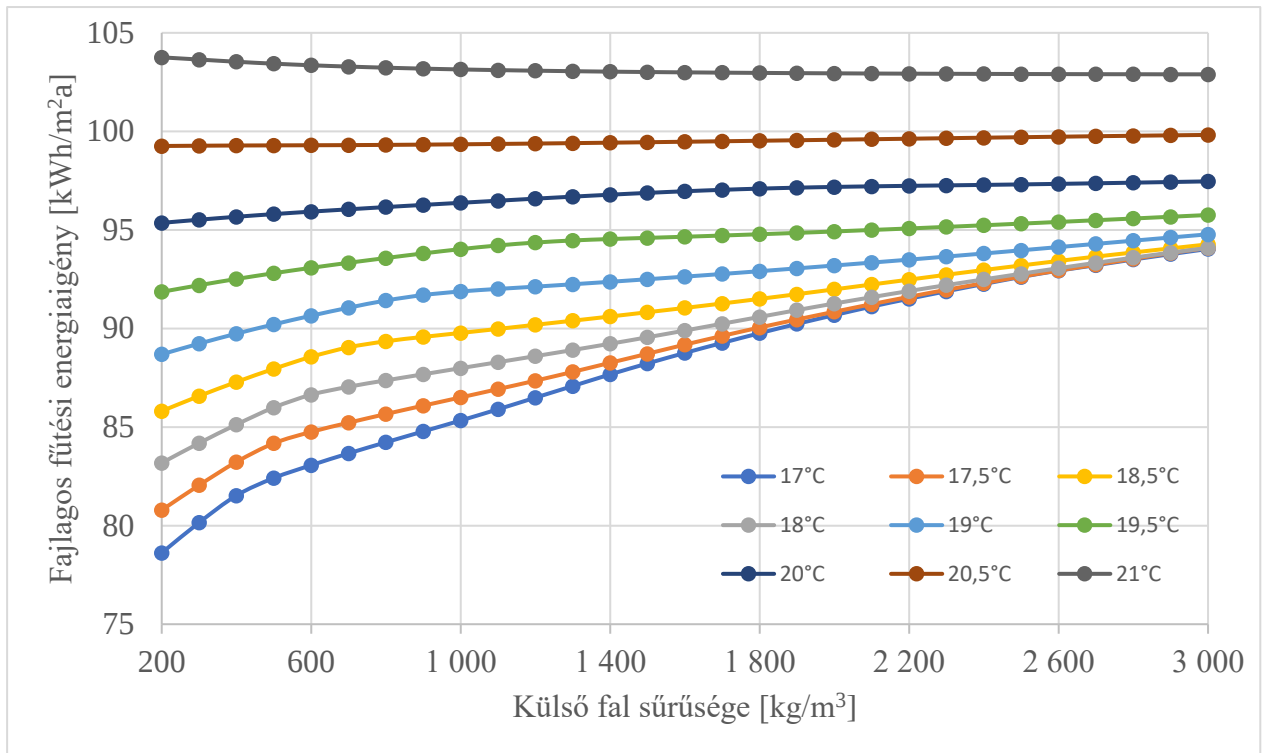


4.27. ábra Állandó alapjel és időprogram szerint változó alapjel közötti fajlagos éves energiamegtakarítás átlagértékei és szórása

4.6. Hőkapacitás befolyásoló hatása állandó és változó alapjel mellett

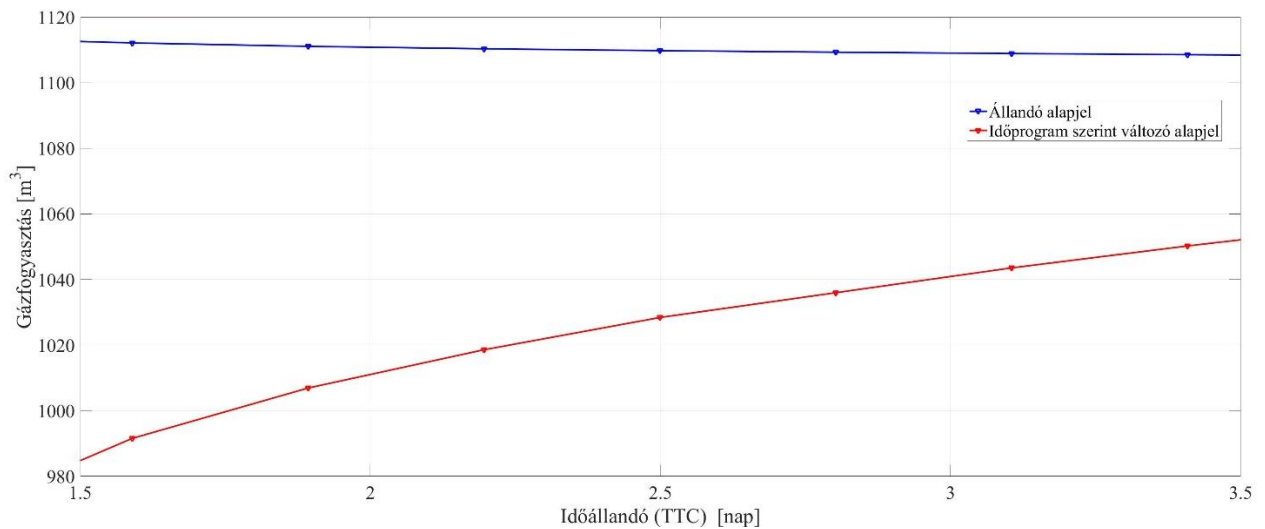
A szimulációs környezet lehetőséget biztosít nemcsak az épület hőszigetelésének (U érték általi) változtatására, hanem a hőkapacitás módosítására is. A hőkapacitás módosítását a B1-B5 épületek esetében nem a kisminta modell szerinti plusz hőtároló tömeg elhelyezésével biztosítottam, hanem a határoló szerkezetek sűrűségének változtatásával a szimulációs modellben. A külső fal sűrűségét 200 és 3000 kg/m³ között 100-as lépésközökkel változtattam, a fűtési hőmérsékletet pedig 17-21 °C között 0,5 °C-onként. Ezt mutatja be B1 épület esetében a 4.28. ábra. A könnyebb adatfeldolgozáshoz a változtatásokat script segítségével végeztem, a szimulációs eredményeket szintén ennek a scriptnek a segítségével mentettem el Excel fájlba.

```
step_size = 100; % Lépésköz mérete
Density_wall_start = 200;
Density_wall_end = 3000;
results_header = {'Density_wall', 'T_SP_L', 'Time_constant', 'Specific_energy_consumption',
'M_sum', 'k_A_sum', 'NF_Ro_c_air', 'k_wall_atm', 'k_dw_atm', 'nf_house'};
results = []; % Üres tömb inicializálása
index = 0;
for Density_wall = Density_wall_start:step_size:Density_wall_end
    for T_SP_L = 17:0.5:21 %17
        for k_wall_atm = 0.237%0.137:0.1:1 %0.237
            for k_dw_atm = 0.98189 %0.68189:0.1:1.2 %0.98189
                for nf_house = 0.63 %0.13:0.1:1.03 %0.63
                    index = index + 1;
                    fprintf('Nr.: %d / %d\n', index); % szimuláció sorszáma
                    Alapjel_idoprogram;
Adat_B1
% Eredmények kinyerése
[t, x, y] = sim('Modell_egyszerusített_20231116', 3600 * 24 * 365);
% Eredmények tárolása egy új struktúrában
result = struct();
result.Density_wall = Density_wall;
result.T_SP_L = T_SP_L;
result.Time_constant = max(y(:, 10));
result.Specific_energy_consumption = max(y(:, 12));
result.M_sum = M_sum;
result.k_A_sum = k_A_sum;
result.NF_Ro_c_air = (nf_house/3.6)*Ro_air_in*c_air;
result.k_wall_atm = k_wall_atm;
result.k_dw_atm = k_dw_atm;
result.nf_house = nf_house;
% Az eredmények hozzáadása a 'results' tömbhöz
results = [results; result];
                end
            end
        end
    end
end
% Eredmények táblázattá alakítása fejléccel
results_table = struct2table(results, 'AsArray', true);
results_table.Properties.VariableNames = results_header;
% Eredmények mentése Excel fájlba
writetable(results_table, 'eredmenyek.xlsx');
```



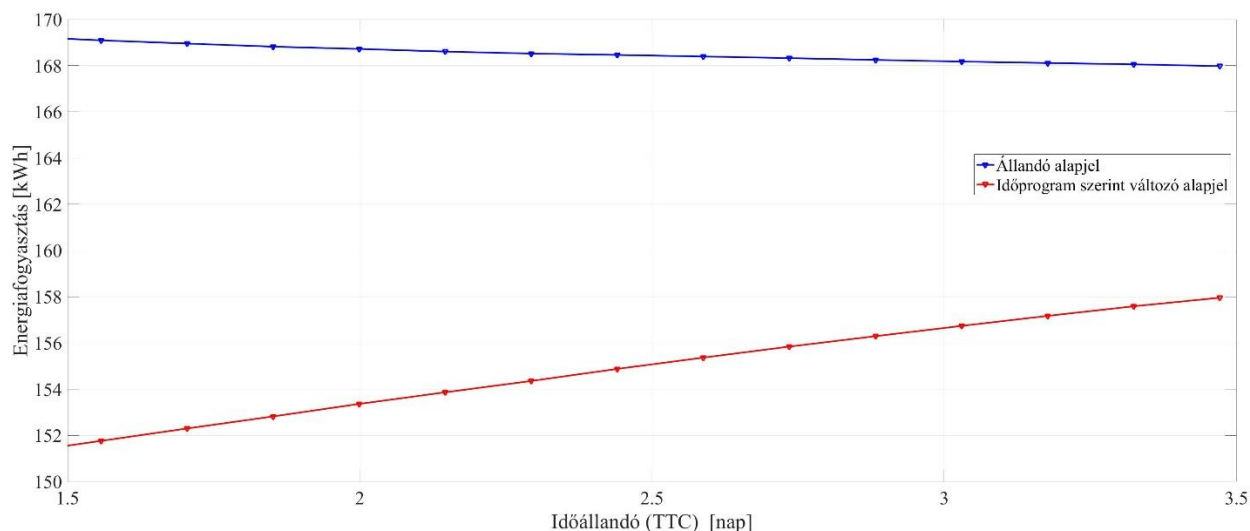
4.28. ábra B1 épület fal sűrűségének hatása a fajlagos fűtési energiaigényre

Megvizsgálva a B2 épület 4.29. ábrát, valamint a kisminta épületeket azonos időállandók mellett, azonos tendenciák figyelhetők meg. Az állandó alapjelű fűtés lineáris jellegű enyhén csökkenő trendet mutat, míg az időprogram szerint változó alapjelű fűtés emelkedő közel lineáris jellegű.



4.29. ábra B2 épületben a termikus időállandó függvényében ábrázolva a különböző alapjelű fűtési módok fajlagos fűtési energiaigényét

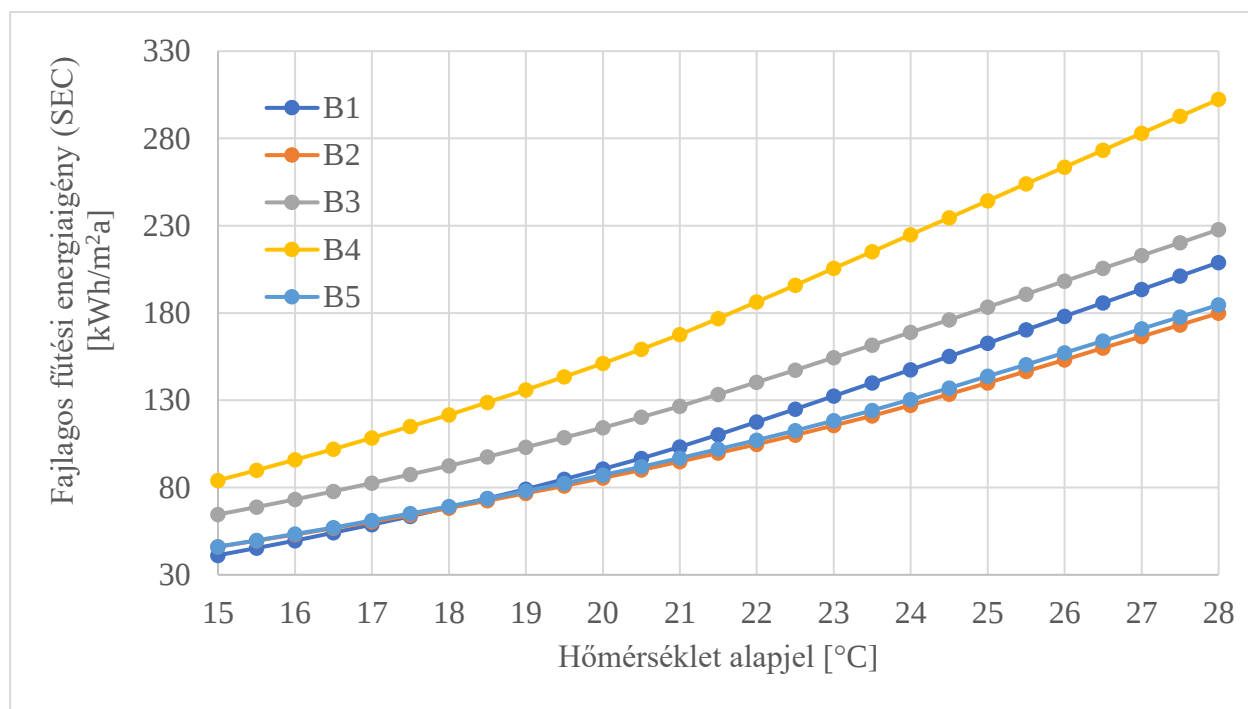
Ugyanez a jelleg figyelhető meg a 4.30. ábrán, ami a kisminta modell esetében mutatja be az időállandó hatását az alkalmazott két szabályozási mód szerint.



4.30. ábra Kisminta modellben a termikus időállandó függvényében ábrázolva a különböző alapjelű fűtési módok fajlagos fűtési energiaigényét

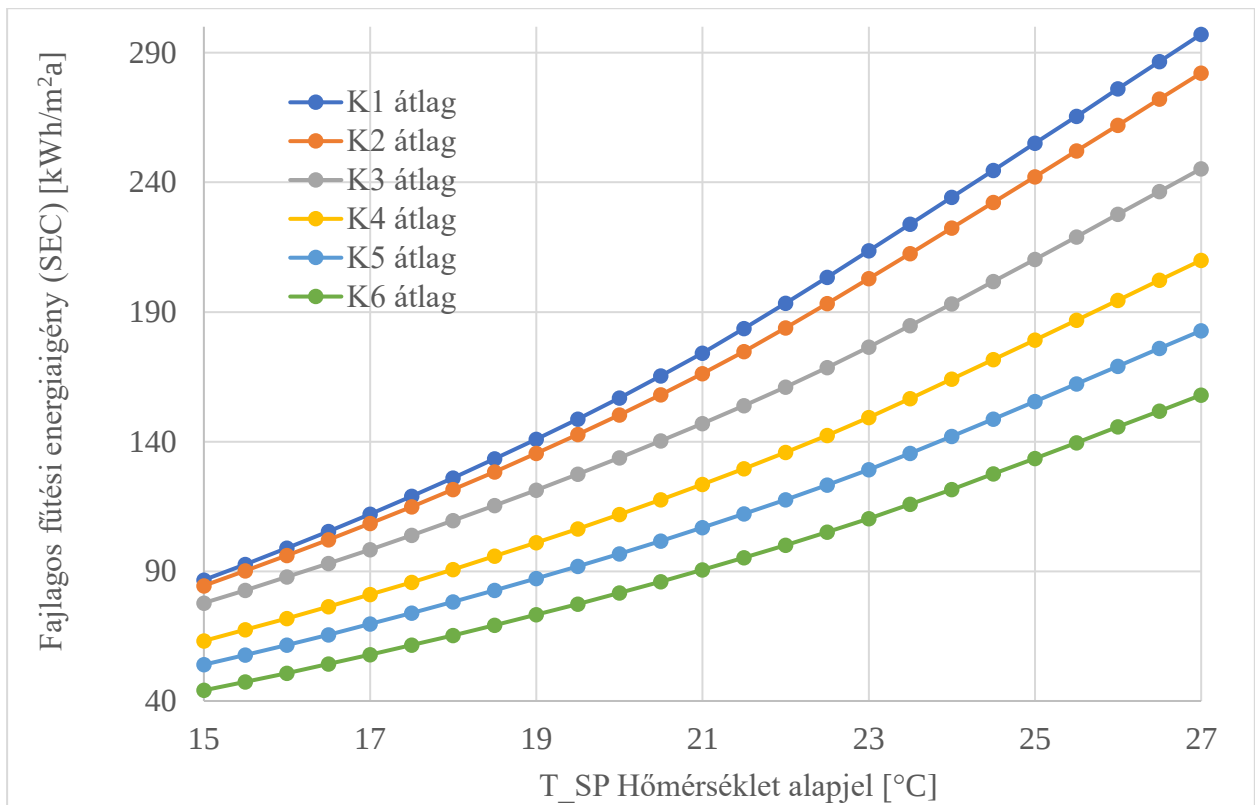
4.7. Belső hőmérséklet alapjel 1 °C-os változtatásának hatása

A nemzetközi és hazai szakirodalom egyaránt ökolétszámként az 1 °C-al történő belső hőmérséklet csökkentése megközelítőleg 5-6% energiamegtakarítást eredményez. A vizsgált tartomány 15 és 28 °C között volt, a 4.33. ábra a B1-B5 épületek esetében, míg a 4.31. ábra a B1-B5 valós épületre lefuttatva a különböző követelményszintek szimulációit, azok átlagait ábrázoltam.



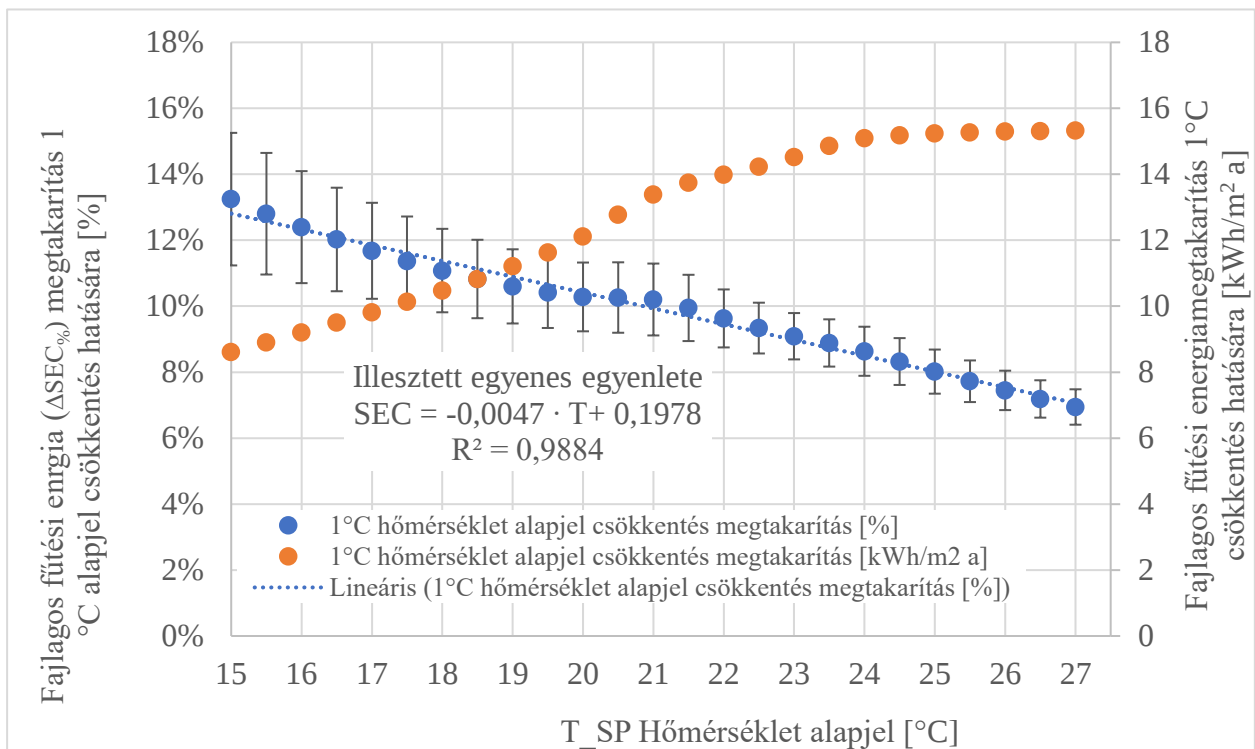
4.31. ábra B1-B5 épületek hőmérséklet alapjel és szimulált fajlagos fűtési energiaigény

A 4.32. ábra az épületek átlagára elvégzett megtakarítási potenciált mutatja be. Jól láthatóan magasabb hőmérséklet mellett 1 °C hőmérséklet csökkentésnek a százalékos hatása alacsonyabb, mint alacsonyabb alapjel mellett. Az is látható, hogy a megtakarítás mértéke nagyobb, mint a szakirodalomban megtalálható és elterjedt 5-6 % megtakarítás érhető el 1-1 °C csökkentése mellett. A vizsgált épületek esetében a kevésbé korszerű épületek esetében alacsonyabb a százalékos megtakarítás értéke. A vizsgált épületek adatai és diagramjai a mellékletben szerepelnek.



4.32. ábra B1-B5 épületek különböző követelményszintek szerinti átlagának hőmérséklet alapjel és szimulált fajlagos fűtési energiaigény

A 4.33. ábra szimulációs futtatások eredményét mutatja be, ahol a T_SP fűtési alap jelet csökkentettem 28 °C- 15 °C tartományon, ábrázolva a fajlagos fűtési energia megtakarítást %-ban és kWh/m² a-ban kifejezve.

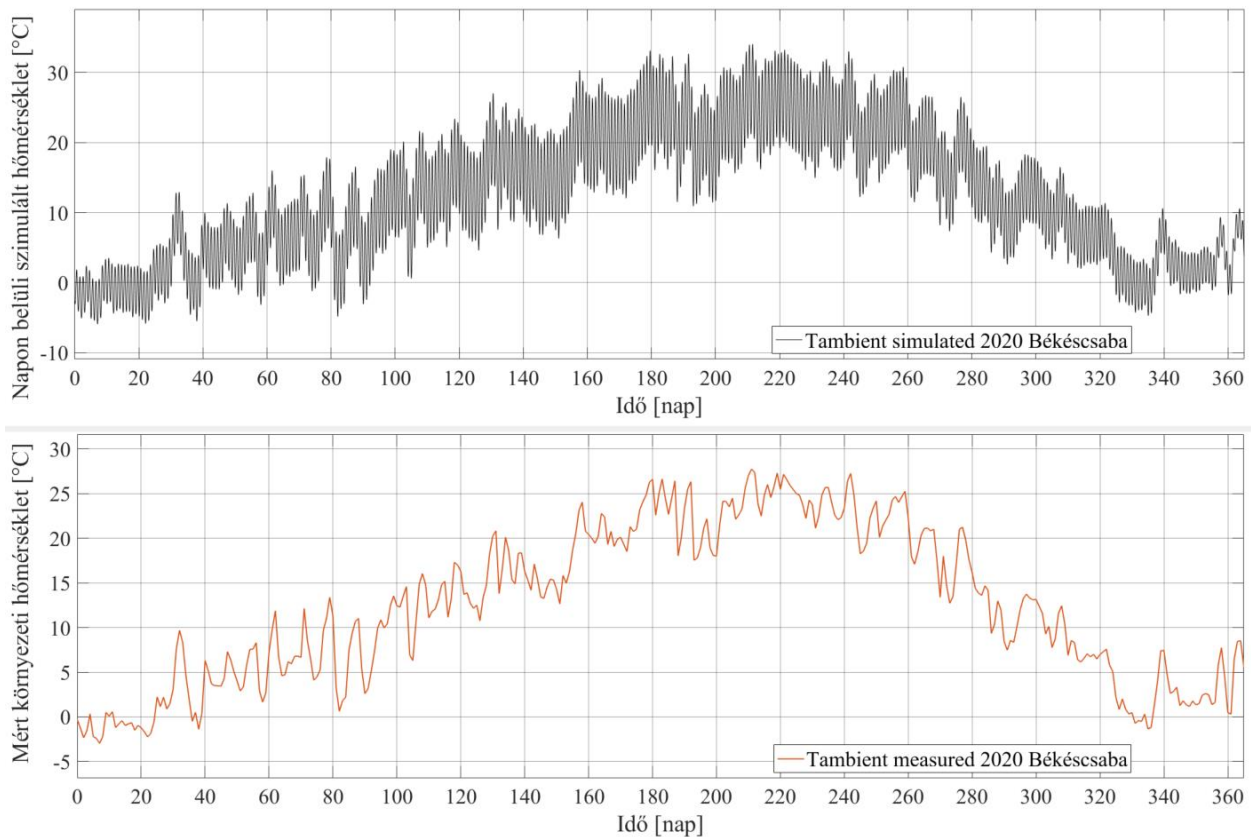


4.33. ábra B1-B5 épületek átlagának százalékos fajlagos fűtési energiamegtakarítása 1 °C hőmérséklet csökkentés mellett, szórásokkal

4.8. Fajlagos fűtési energiaigény meghatározásra alkalmazott közelítő összefüggés

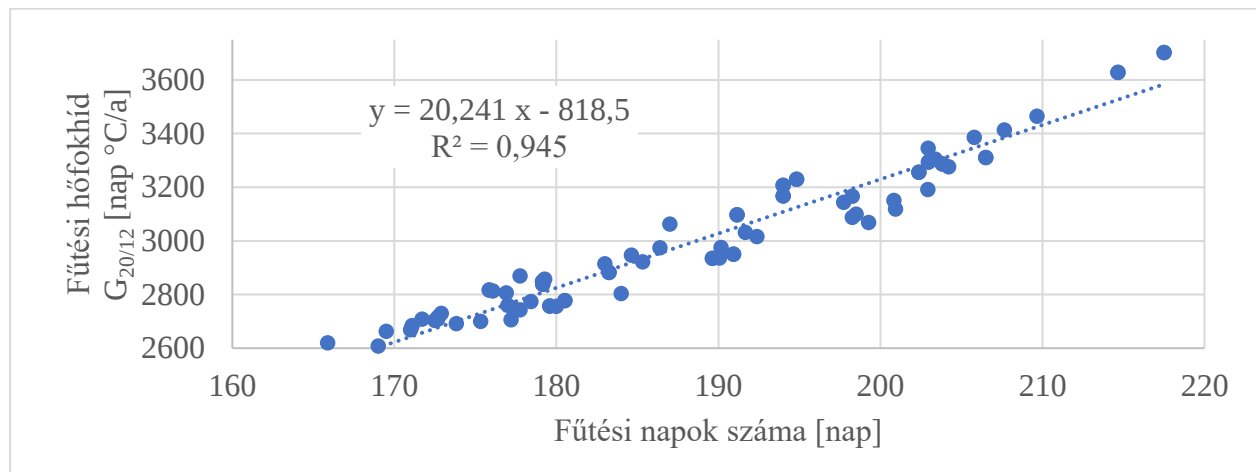
A fajlagos fűtési energiaigény meghatározásához feldolgoztam a vármegyék székhelyeinek napi átlaghőmérséklet adatait, meghatároztam a fűtési hőfokhidat és a fűtési napok számát melyet az anyag és módszer melynek ismertetését a 3.7. fejezet tartalmazza.

A hőmérséklet értékek szimulálása során MATLAB környezetben megvalósított napi átlaghőmérsékleteket és napon belüli szimulált hőmérsékletingadozást mutatja be a 4.34. ábra 2020 év adatait mutatja be Békéscsaba településre. A felső részen lévő görbesereg a napi ingadozást is tartalmazza, míg az ábra alsó része a környezeti hőmérsékletek NASA adatbázisból származó mérési eredmények szerinti napi hőmérséklet ingadozásokat mutatja be.



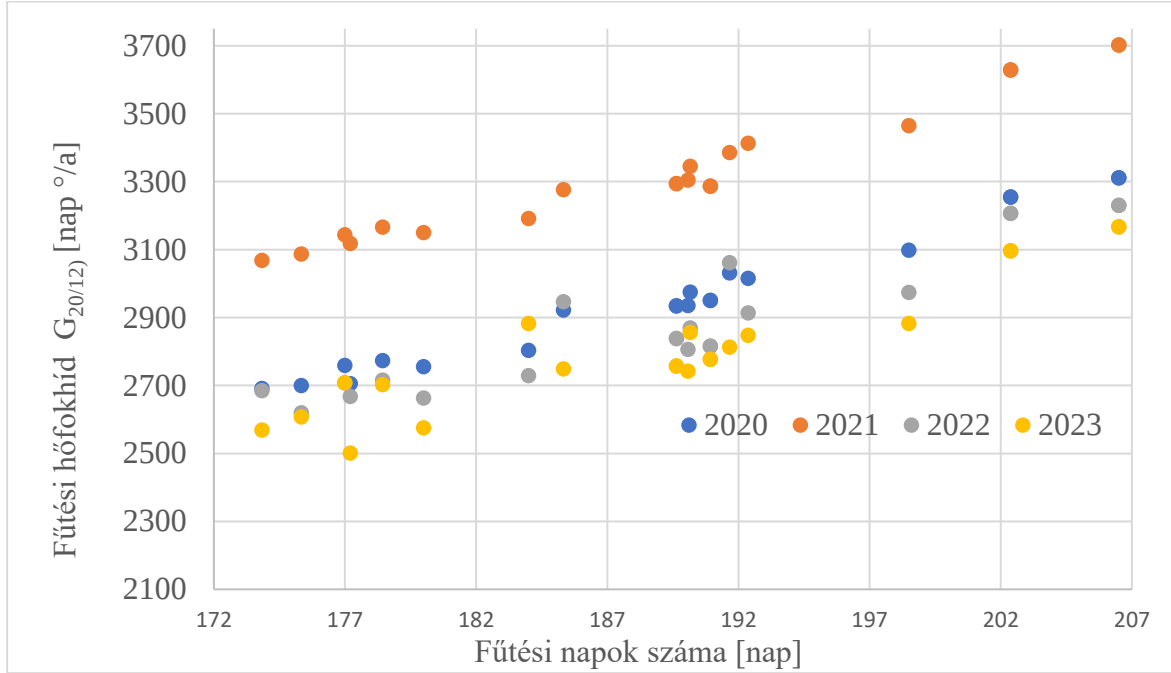
4.34. ábra Szimulált napon belüli és mért napi környezeti hőmérsékletek Békéscsaba 2020

A 4.35. ábrán látható, hogy a fűtési napok száma és a fűtési hőfokhid között közel lineáris összefüggés van.



4.35. ábra Magyarországi vármegye székhelyek éves fűtési hőfokhidjai 2020-2023 év

Ha megvizsgáljuk a 4.36. ábra eredményeit, akkor szembetűnő, hogy az egyes évek között igen jelentős hőmérsékleti eltéréseket tapasztalhatunk. Emiatt a mérnöki gyakorlatban alkalmazott részletes és közelítő összefüggések nem kellő pontossággal becsülik meg a lakóépület várható fajlagos fűtési energiaigényét.



4.36. ábra Magyarországi vármegye székhelyek éves $G_{20/12}$ fűtési hőfokhídjai 2020-2023 éves bontásban

A fajlagos fűtési energiaigény meghatározására alkalmazott közelítő összefüggés paraméter identifikációjához a könnyebb feldolgozhatóság miatt a fűtési hőfokhíd $H_{20/12}$ -re átszámított értékeit alkalmaztam mértékegysége [khK/a].

A mellékletben a B1-B5 épületek illesztett felületei is megtalálhatóak. Az illesztéshez használt változók: hőmérséklet alapjel T_{SP} , fűtési hőfokhad ezredrésze $H_{20/12}$, eredő hőátbocsátási tényező U_R , légszere n , belső fajlagos hőtermelés q_b .

A fajlagos fűtési energiaigény meghatározására alkalmazott közelítő összefüggés:

$$SEC_I(T_{SP}, H_{20/12}, U_R, n, q_b) = a \cdot T_{SP}^2 + b \cdot H_{20/12} + d \cdot T_{SP} \cdot H_{20/12} + c \cdot U_R + e \cdot nf_{house} + f \cdot q_b \quad (4.1)$$

A paraméterek meghatározásához alkalmazott célfüggvény, ahol m a vizsgált épületek száma, n a NASA adatbázisából származó hőmérsékleti adatok felhasználásával ellenőrzött modell szimulációjával előállított adatpontok száma. A szimulációhoz a 3.5. alfejezetben ismertetett egyszerűsített modell került felhasználásra.

$$J(a, b, c, d, e, f) = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n (SEC_m - SEC_I)^2 + \sum_{j=1}^m (SEC_{m \text{ határ}} - SEC_{I \text{ határ}})^2 \cdot 10^6 \quad (4.2)$$

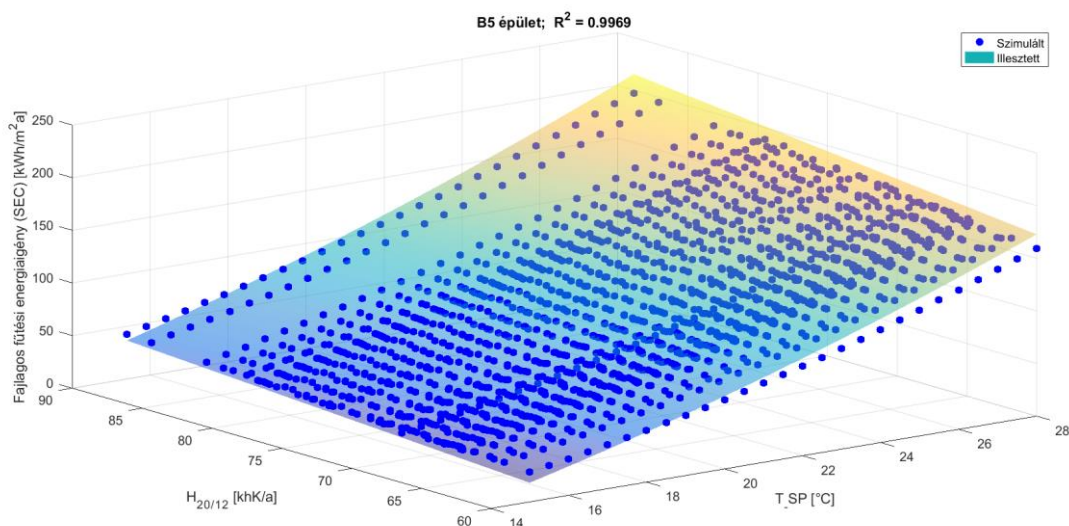
A (4.1) közelítő összefüggés az identifikált paraméterekkel megadott formátumban:

$$SEC_I(T_{SP}, H_{20/12}, U_R, nf_{house}, q_b) = 0.212 \cdot T_{SP}^2 + 0.183 \cdot H_{20/12} + 0.045 \cdot T_{SP} \cdot H_{20/12} + 113.621 \cdot U_R + 169.401 \cdot nf_{house} - 50.193 \cdot q_b \quad (4.3)$$

A határ a vizsgált tartomány határain NASA adatbázisából származó hőmérsékleti adatok felhasználásával ellenőrzött modell szimulációjával előállított fajlagos energiafogyasztás értékei. Ezeket az értékeket a vizsgált tartomány határain a szimulációval meghatározott és az illesztett

értékek közötti eltérést egy 10^6 -os büntető szorzóval lett figyelembe véve. Ezzel az eljárással a normál négyzetes eltérések alkalmazásánál pontosabb illesztett függvény határozható meg.

Az alkalmazott közelítő egyenlettel pontosabb fajlagos fűtési energiaigényt sikerült meghatározni, mint a mérnöki gyakorlatban alkalmazott TNM és ÉKM rendeletekben leírt egyszerűsített számítási- és részletes számítási módszerrel. Az illesztett felületet a 4.41. ábra szemlélteti B5 épület esetében. A többi épület illesztett felületeit a B3 épület a 4.37. ábra, B1, B2 és B4 épületek illesztett felületeit melléklet M6.1-M6.3. ábrái mutatják be.



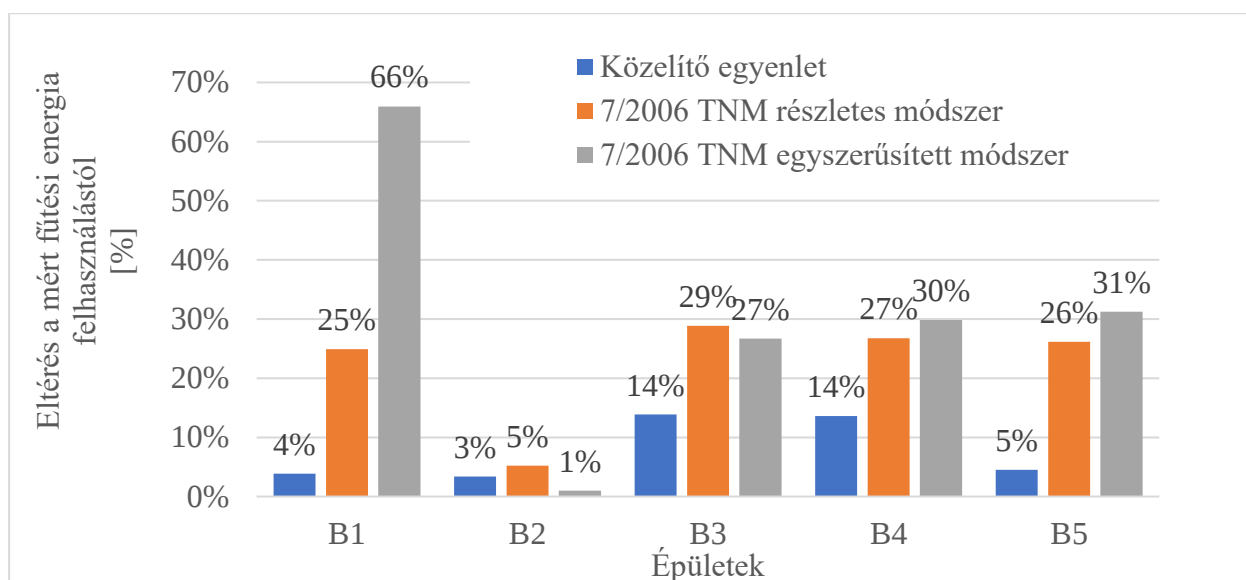
4.37. ábra Különböző fűtési hőfokhidakhoz és hőmérséklet alapjelekhez illesztett sík B5 épület

A 4.7. táblázatban kerül összefoglalásra a B1-B5 épületekre mérési adatok alapján szimulációs módszerrel elvégzett fűtési energiaigényének összehasonlítása: az ÉKM rendelet szerinti egyszerűsített- és részletes módszerrel, valamint az általam meghatározott közelítő egyenlettel.

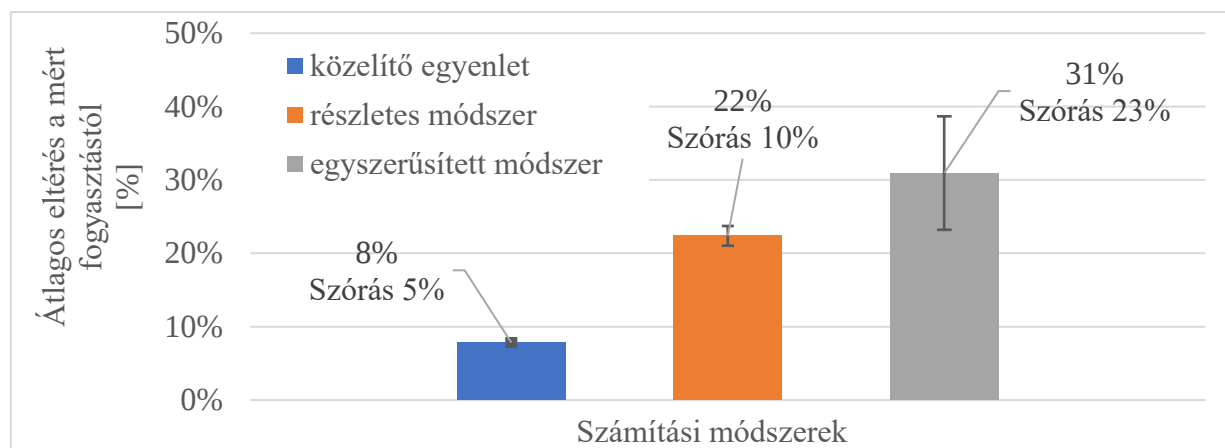
4.7. táblázat B1-B5 családi házak fajlagos fűtési energiaigény meghatározás különböző módszerekkel

Módszer	B1	B2	B3	B4	B5
	kWh/m ² a				
Mérési adatok alapján szimulált	95,97	100,48	104,77	153,08	86,45
Egyszerűsített módszerrel	159,25	101,48	132,72	107,38	113,44
Részletes módszerrel	119,89	105,72	134,99	112,12	109,08
$a \cdot T_{SP}^2 + b \cdot H_{20/12} + c \cdot U_R +$ $d \cdot T_{SP} \cdot H_{20/12} + e \cdot n_{f_{house}} + f \cdot q_b$	99,66	97,11	119,29	173,90	90,36

A különböző módszerekkel kapott fajlagos fűtési energiaigények eltérését a 4.38. ábra szemlélteti. Az ábrából látszik, hogy bizonyos épülettípusok esetében jó közelítést ad az egyszerűsített és részletes módszer is. Ez a B2 jelű épület esetében 1-3% értékű. Ez az épület a 2000-es évek elején épült az akkori előírások szerint. Míg a B1 (épület 2020) esetében 25-66% átlagos eltérést tapasztalható. Az átlagokat és a szórást a 4.39. ábra mutatja be.



4.38. ábra B1-B5 épületek mért fogyasztás összehasonlítása a számítási módszerek eredményeivel



4.39. ábra B1-B5 épületek mért fogyasztás összehasonlítása a számítási módszerek eredményeivel átlag és szórás

4.9. Új tudományos eredmények

1. Tézis

Kidolgoztam egy fizikai alapú matematikai modellt, ami közvetlenül alkalmazható lakóépületek termikus folyamatainak modellezésére. A modellt a lakóépületek határoló szerkezetein kialakuló hőtranszport folyamatait leíró differenciálegyenletek blokkorientált modelljével valósítottam meg. A modellt valós épülettel és kisminta modellekkel is mérések alapján validáltam.

A kidolgozott modell gyakorlati haszna, hogy pontos általánosan jól alkalmazható matematikai modell áll rendelkezésre, mely szimulációk futtatására alkalmas. Szemben más szimulációs eljárásokkal itt elegendő csak az épület fizikai jellemzőinek megadása. Gyorsan adaptálható további épületekhez.

2. Tézis

Megállapítom, hogy a fizikai alapú matematikai modell $R^2 > 0.99$ determinációs együtthatóval képes meghatározni az épület fajlagos fűtési energiafogyasztást, a külső környezeti paraméterek, a belső jellemzők és a határoló szerkezetek fizikai jellemzői alapján, 100-170 m² alapterületű, $U_R = 0,32-0,987$ W/m²K, $A/V = 0,59-1,1$ m²/m³ arányú magyarországi

lakóépületek esetén. A fizikai alapú matematikai modell szimulációs eredményeit, kisminta- és valós épületek mérési adatai alapján validáltam.

A modellt magyarországi időjárási körülmények között alkalmaztam. A figyelembe vett környezeti paraméterek: környezeti hőmérséklet, napsugárzás. Belső jellemzők: belső fajlagos hőtermelés, épületgépészeti rendszer és szabályozási módja, filtráció. Határoló szerkezetek jellemzői: sűrűség, fajhő, geometriai méretek, fajlagos hőátbocsátási tényező.

Az elkészített matematikai alapú blokkorientált modellezési keretrendszer lakóépületek fajlagos energiafogyasztásának, és különböző szabályozási algoritmusok vizsgálatára alkalmas MATLAB Simulink környezetben. A kialakított rendszerbe beépítettem a szakirodalomban található lakóépületek épületenergetikai folyamatait leíró matematikai modelljeit. Kidolgoztam azon eljárásokat, melyek alkalmasak a keretrendszeren belüli modulok szimulációjára és identifikációjára. Ezeket az eljárásokat próba-futtatásokkal igazoltam valós épületeken, valamint kisminta modelleken valós időjárási körülmények között is.

Az elkészült keretrendszer előnye a white-box alapú működése, bővíthetősége, a különböző forgatókönyvek szimulációs lehetősége. A modell felhasználásával további modellek és kísérleti szimulációk is létrehozhatóak. A modell kiterjeszthető más földrajzi környezetre is.

3. Tézis

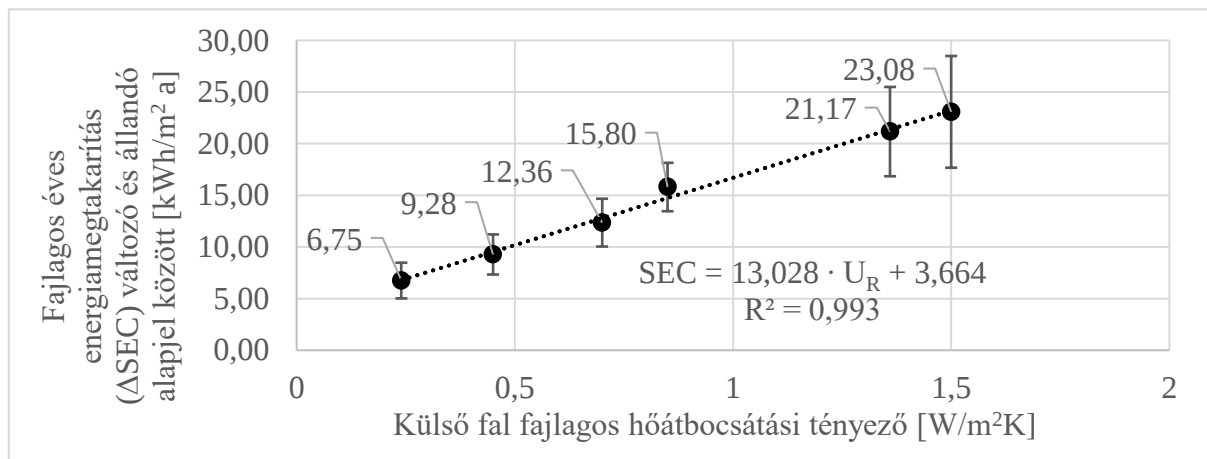
Szimulációs eredmények alapján igazoltam, hogy a lakóépületekre vonatkozó külső fal fajlagos hőátbocsátási tényezője és a változó alapjellel elérhető fajlagos éves fűtési energia megtakarítás között lineáris összefüggés van. A determinációs együttható $R^2=0,993$ $U_R=0,32-0,987$ W/m^2K tartományban vizsgálva.

A leíró egyenlet általános alakja: $\Delta SEC = m \cdot U_R + b$

a meredekség a hőmérséklet igény és időprogram alapján változik, a tengelymetszet pedig a belső hőterheléstől és a filtrációtól függ.

$\Delta SEC = 13,028 \cdot U_R + 3,665$ leíró egyenlet adódott. A $100-170$ m^2 alapterületű, $U_R=0,32-0,987$ W/m^2K , $A/V = 0,59-1,1$ m^2/m^3 arányú magyarországi lakóépületek esetén a változó alapjellel időprogram alkalmazásakor (6:00-8:00 és 16:00-22:30 időpontok között 21 $^{\circ}C$ (komfort), ezen kívüli időszakban 19 $^{\circ}C$ (csökkentett) hőmérséklet) a meredekség $m=13,028$. A tengelymetszet az átlagosnak tekinthető $q_b=4,968$ W/m^2 , $n_{fhouse}=0,5-0,8$ $1/h$ értékek mellett $b=3,665$.

A meghatározott egyenlettel gyorsan ellenőrizhető, számítható egy lakóépület várható energiamegtakarítása az állandó alapjellel és a fent ismertetett időprogram szerinti változó alapjellel használata esetén. A számításhoz elegendő az eredő U_R érték meghatározása, nem szükséges szimulációk és részletes számítások elvégzése.



4.40. ábra Lakóépületek ($A=100-170$ m^2 , $U_R=0,32-0,987$ W/m^2K , $A/V=0,59-1,1$ m^2/m^3) fajlagos éves megtakarítása

4. Tézis

Megállapítom, hogy lakóépületek fajlagos fűtési energiafogyasztása és az épületek szerkezeteinek hőkapacitása (C) között hatványfüggvénnyel leírható összefüggés van. Állandó alapjelű fűtés esetén csökkenő, időben változó alapjel esetén növekvő tendenciájú. Ezek alapján az épületek szerkezeteinek hőkapacitásának növekedésével csökken az éves fajlagos fűtési energiamegtakarítások közötti különbség.

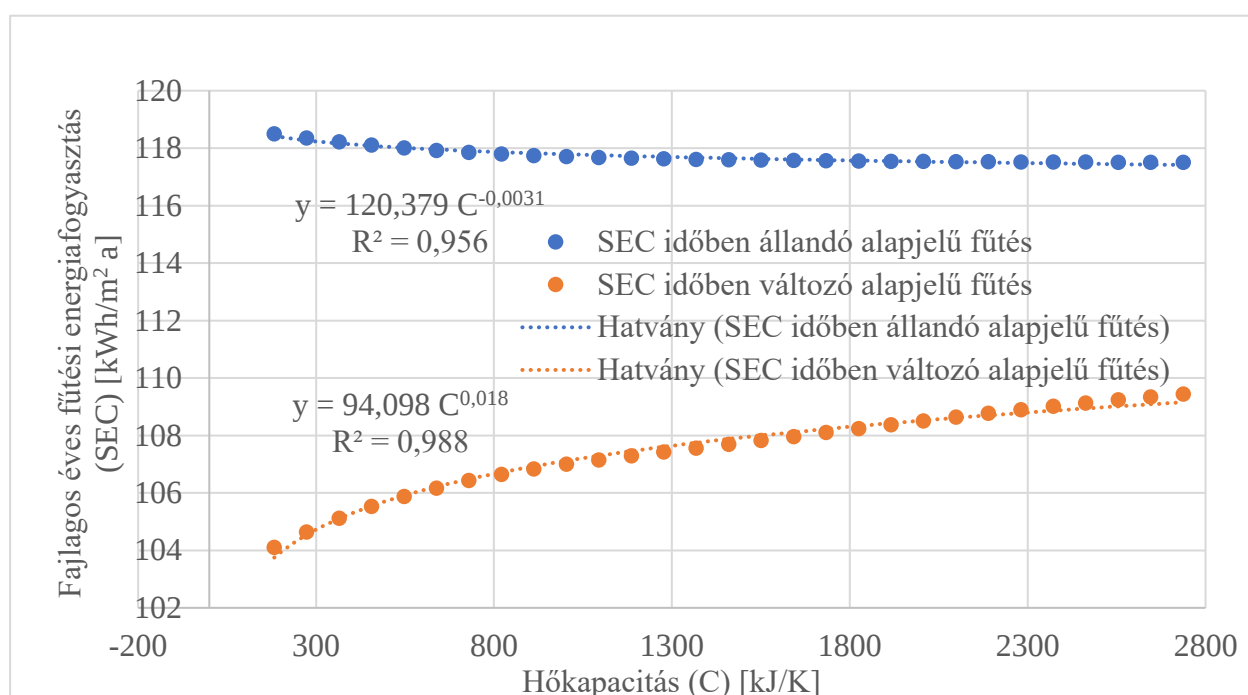
A 100-170 m² alapterületű, $U_R = 0,32-0,987 \text{ W/m}^2\text{K}$, $A/V = 0,59-1,1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ arányú magyarországi lakóépületek esetén, a falszerkezetek hőkapacitását 182,5-2737 kJ/K közötti tartományon a leíró egyenletek:

Állandó alapjel $\text{SEC} = 120,379 \cdot C^{-0,0031}$

$R^2 = 0,956$

Változó alapjel $\text{SEC} = 94,098 \cdot C^{0,018}$

$R^2 = 0,988$



4.41. ábra Lakóépületek ($A=100-170 \text{ m}^2$, $U_R = 0,32-0,987 \text{ W/m}^2\text{K}$, $A/V=0,59-1,1 \text{ m}^2/\text{m}^3$) fajlagos éves fűtési energiafelhasználása állandó és változó alapjel, a hőkapacitás függvényében

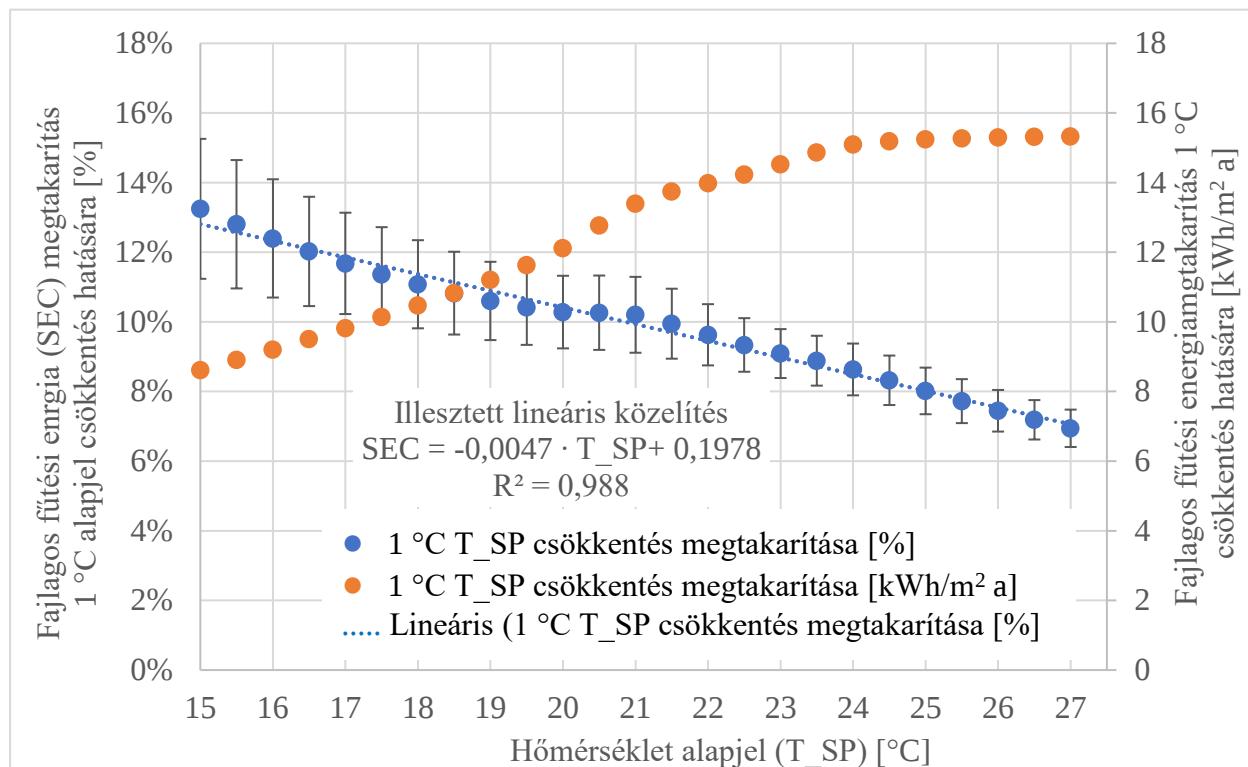
Az összefüggések ismeretében az épületek szerkezeteinek hőkapacitása alapján meghatározható, hogy mekkora a várható fajlagos fűtési energiaigény, állandó alapjel és változó alapjel mellett. A vizsgált épületek szerkezeteinek hőkapacitása lefedi a használatos építőanyagokat. A fenti megállapítás igazolja a gyakorlatból ismert jelenségeket, hogy a könnyűszerkezetes épületek gyorsabban felmelegíthetőek, de hajlamosabbak a hőmérséklet ingadozásra, míg a nehéz szerkezetű épületek a lomha reagálásuk miatt lassabban hűlnek ki, egyenletesebb a belső hőmérsékletük. Az is látható, hogy normál építőanyagok esetében nem metszi a két görbe egymást, azaz a változó alapjelű fűtés kevesebb energiát igényel.

5. Tézis

Szimulációs eredmények alapján igazoltam, hogy az adott hőmérsékleti alapjel és az 1 °C-os csökkentéssel elérhető százalékos fűtési energiamegtakarítás között lineáris összefüggés van, a leíró egyenlet determinációs együtthatója $R^2=0,988$. Megállapítom, hogy az elérhető százalékos megtakarítás 7-13% közötti, a 15-28 °C közötti hőmérséklet alapjel 1 °C-os

változtatása esetén, 100-170 m² alapterületű, $U_R = 0,32-0,987 \text{ W/m}^2\text{K}$, $A/V = 0,59-1,1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ arányú magyarországi lakóépületeknél.

A leíró egyenlet: $\Delta\text{SEC}\% = -0,0047 \cdot T_{\text{SP}} + 0,1978$



4.42. ábra Lakóépületek ($A=100-170 \text{ m}^2$, $U_R = 0,32-0,987 \text{ W/m}^2\text{K}$, $A/V = 0,59-1,1 \text{ m}^2/\text{m}^3$) fajlagos éves fűtési energia %-os, és abszolút megtakarítása 1°C hőmérséklet alapjel csökkentés esetén

A szimulációk alapján megállapítható, hogy alacsonyabb hőmérsékleten nagyobb mértékű százalékos megtakarítást eredményez 1 °C-al való hőmérséklet alapjel csökkentés, mint magasabb hőmérsékleten. Abszolútértéken véve a megtakarítás értéke csökken, de arányaiban a vizsgált tartományban magasabb százalékot eredményez.

6. Tézis

Szimulációs eredmények alapján felállítottam egy egyszerűsített öt paraméteres másodfokú függvényt, amely lakóépületek fajlagos fűtési energiafogyasztását határozza meg $R^2 > 0,99$ determinációs tényezővel a leíró egyenlet:

$$\text{SEC}(T_{\text{SP}}, H_{20/12}, U_R, n_{\text{fhouse}}, q_b) = a \cdot T_{\text{SP}}^2 + b \cdot H_{20/12} + d \cdot T_{\text{SP}} \cdot H_{20/12} + c \cdot U_R + e \cdot n_{\text{fhouse}} + f \cdot q_b$$

A közelítő függvény változói a lakóház esetében:

T_{SP} – belső hőmérséklet alapjel [°C]

$H_{20/12}$ – hőfok híd [khK/ a]

U_R – eredő hőátbocsátási tényező [$\text{W/m}^2\text{K}$]

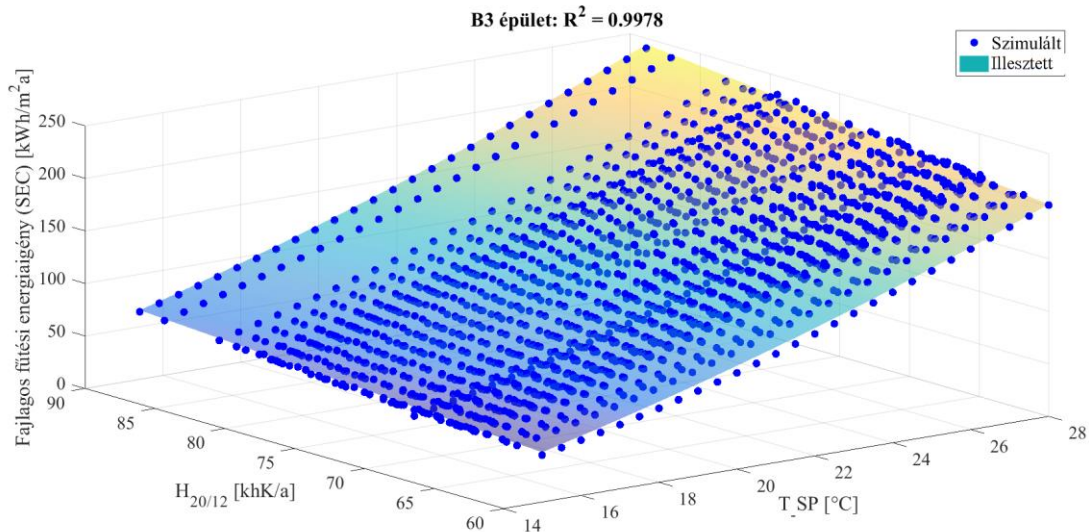
n_{fhouse} - filtrációs tényező [l/h]

q_b - belső hőforrás [W/m^2]

Vármegye székhelyekre, 2020-2023 években számított hőfokhíd $H_{20/12} = 60-88,8 \text{ khK/a}$ és 15-28 °C belső hőmérséklet alapjel esetén a paraméterek:

$$a=0,212; b=0,183; c=113,621; d=0,045; e=169,401; f=50,193$$

A szimulációs vizsgálatok négy évet fednek le 2020-2023 között a vármegyeszékhelyekre, valamint Gödöllőre és Zabarra lettek elvégezve a NASA adatbázisából származó adatok felhasználásával, 15-28 °C belső hőmérséklet alapjelre az öt lakóépület adataival ellenőrzött szimulációs modellel. A közelítő egyenlettel az adott évhez és földrajzi helyhez tartozó fűtési hőfokhid, belső hőmérséklet alapjel, belső fajlagos hőnyereség, valamint az eredő hőátbocsátási tényező megadásával számítható ki. Az eljárás sokkal gyorsabb, pontosabb és egyszerűbb, mint az eddigi megoldások. Például az épületek energiahatékonyságáról szóló törvényben ismerttetett egyszerűsített és részletes módszer, vagy szimulációval történő részletes adatbevitelt megkívánó módszerek. A modell további épületek és földrajzi helyekkel könnyen bővíthető, ez tovább kiterjesztésére ad lehetőséget.



4.43. ábra B3 épület szimulált és illesztett fajlagos éves fűtési energiafogyasztás különböző hőfokhidak és hőmérséklet alapjel mellett

5. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK

A kutatómunkám során a szimulációs és a mérési eredmények összehasonlítása alapján a fizikai alapú matematikai modellt készítettem el. Megvizsgáltam mely paraméterek vannak a legnagyobb hatással a fűtési energiafelhasználásra. A megfelelő működés igazolásához kisminta modellekkel végzett összehasonlító vizsgálatokat hajtottam végre, mérési eredmények alapján validáltam a modellt. Valós épületre, majd a későbbiekben további lakóépületekre is kibővítettem és gázfogyasztási, valamint hőmérsékleti adatok alapján alkalmaztam a modellt és validáltam azt. Következtetésként azt vontam le, hogy ezek a szimulációs eszközök alkalmasak a lakóépületekben lezajló hőtranszport folyamatok felhasználásával a fűtési energiafelhasználások meghatározására, optimalizációk elvégzésére. A blokkorientált és white-box modellezésnek köszönhetően könnyen alkalmazható más felhasználási területeken is. Ilyen pl. a hűtéssel kapcsolatos vizsgálatok elvégzése is. A bővíthetőség és a flexibilitás tette lehetővé, hogy több épületre is el tudjam végezni a szimulációkat, ezekből általános következtetéseket tudjak levonni. A szimulációs környezet további előnyeit is ki tudtam használni. Gyors eredményt lehet elérni az épületek költséges megépítése és átalakítása nélkül, vizsgálható más földrajzi környezetben is egy adott lakóépület, vagy akár csak a szabályozási módok közötti különbségek energiaigényre gyakorolt hatása is jelentős előny már a tervezés, üzemeltetés, de egy tervezett felújítás során is.

A kisminta modelleken valós időjárási körülmények között végeztem összehasonlító méréseket. A vizsgálat célja az állandó alapjelű és változó alapjelű szabályozási mód összehasonlítása volt. Ezeket a vizsgálatokat elvégeztem különböző hőtároló tömegek alkalmazásával. Itt következtetésként azt lehetett levonni, hogy anyagi és időkorlátok miatt nem lehet teljeskörű vizsgálatot lefolytatni, hiszen nem áll rendelkezésre kellő számú kisminta modell a mérések egymással párhuzamosan azonos körülmények közötti mérésekhez, valamint nagyon időigényes egy-egy éves ciklus teljes mérése. Erre is megoldást kínál a szimulációs keretrendszer. A kisminta modelleken végzett mérések alapján megállapításokat tettem, ami rávilágít az összefüggésekre a vizsgált szabályozási módok között, különböző hőtároló tömegek esetén. Ennek gyakorlati hasznosíthatósága az, ha ismerjük az épület viselkedését, alkalmazni tudjuk hozzá és az elvárt komfortszinteknek megfelelő szabályozási módot, csökkentve ezzel a lakóépület fűtési energiaigényét. Új épületek vagy korszerűsítéskor, pedig a hőtároló tömeg optimalizálásával érhetünk el a felhasználói szokásokhoz optimális megoldásokat. Ritkán használt lakóépületek vagy például nyaralók esetén megfontolandó az alacsonyabb hőtároló tömeg alkalmazása, mivel szakaszos üzemnél nagyobb megtakarítás érhető el. A hőtároló tömeg növekedésével csökken a megtakarítások különbsége az állandó és szakaszos szabályozási mód között, de minden esetben megtakarítást jelent a hőmérséklet alapjel csökkentése. A hőtároló tömeg növelése a belső hőmérsékleti ingadozásokat csökkenti, egyenletesebb belső hőmérsékleteket biztosít külső zavar hatására is. További kutatási cél lehet a vizsgálatok lefolytatása hűtési üzemmódra, és komfort paraméterekre.

Valós épületek esetében elvégzett mérések és a modell validációja után többféle szimulációt is elvégeztem. Megvizsgáltam a különböző paraméterek hatását a fűtési energiaigényre. A kisminta modellek alapján ezeket az épületeket is megvizsgáltam a falszerkezet változtatásával különböző hőkapacitásokra. Eredményként a kisminta modellekkel azonos hatásokat figyeltem meg. Megvizsgáltam az állandó és változó alapjel hatásait, az 1°C-os hőmérsékletcsökkentés hatására elérhető százalékos energiamegtakarítást. Az itt tapasztalt összefüggéseket megfogalmaztam a tézisekben is. A lakóépületekben a hőmérséklet szabályozással már 1-1°C alapjel csökkentéssel vagy időprogram alkalmazásával megtakarítások érhetőek el. Célszerű lenne a lakóépületek esetében a komfort és felhasználói szokások vizsgálata, illetve ösztönözni a végfelhasználókat az indokolatlan túlfűtés elkerülésére. Megvizsgáltam és kidolgoztam a fűtési hőfokhíd meghatározására szolgáló blokkorientált megoldást, ezen adatokat felhasználva elvégeztem a 2020-2023 évekre vármegyeszékhelyekre, Gödöllőre és Zabarra lefuttatva a vizsgált épületeket 15-28°C-os hőmérsékleti alapjelekre 0,5°C lépésközzel ez közel 3000 szimulációs futtatást

jelentett. Az így kapott eredményeket grafikusán feldolgoztam, aminek segítségével kidolgoztam egy közelítő egyenletet, ami a belső hőmérséklet alapjelekre, fűtési hőfokhíd és az épületfizikai jellemzők alapján alkalmas a fűtési energiafelhasználás meghatározására. Ennek gyakorlati haszna is jelentős, hiszen egy földrajzi adottságokkal (hőfokhíd) pontosított eljárást lehet alkalmazni akár az energetikai számítások során is. Gyors és egyszerű számítási megoldás, ami egy öt paraméteres másodfokú egyenlet. A kutatás folytatásaként bővíteni lenne célszerű más régiókra, valamint további lakóépületekkel, illetve más funkciójú épületekkel is. Fejleszthető lenne belőle egy energetikai auditok ellenőrzésére szolgáló módszer, amivel kiszűrhetők a hibás energetikai tanúsítványok.

A tézisekben ismertetett új tudományos eredmények mind kutatási mind gyakorlati szempontból jól hasznosíthatóak. A szimulációs modell szemben más energetikai szoftveres megoldásokkal könnyen és gyorsan adaptálható más épületekre. Kevesebb adat manuális bevitelével. Előnye, hogy akár az adott meteorológia adatok alapján is futtatható, egy adott pillanat eredményei és mért értékei is meghatározhatóak belőle, kipróbálható más szabályozási módokkal, mindezt matematikai alapon, átláthatóan.

Az elkészített matematikai alapú blokkorientált modellezési keretrendszer lakóépületek fajlagos energiafogyasztásának, és különböző szabályozási algoritmusok vizsgálatára alkalmas MATLAB Simulink környezetben. Az elkészült keretrendszer előnye a white-box alapú működése, bővíthetősége, a különböző forgatókönyvek szimulációs lehetősége. A modell felhasználásával további modellek és kísérleti szimulációk is létrehozhatóak. A modell kiterjeszthető más földrajzi környezetre is.

Az általam azonosított összefüggés segítségével egyszerűen meghatározható egy lineáris egyenlet segítségével a külső falak fajlagos U_R értékének ismeretében az állandó alapjel helyett változó alapjel szabályozás esetén mekkora megtakarítás érhető el a fűtési energiafelhasználásban. Gyors becslést tesz lehetővé méretezések és szimulációk futtatása nélkül.

A lakóépületek esetében a szabályozási mód és az épület hőkapacitása közötti lineáris összefüggések ismeretében a hőkapacitás alapján meghatározható, hogy mekkora a várható fajlagos fűtési energiaigény, állandó alapjel és változó alapjel mellett. A vizsgált hőkapacitás lefedi a használatos építőanyagokat. Ezek alapján gyakorlati haszna, hogy optimalizálható a lakóépületek használati szokása, komfortigénye és fogyasztása. A ritkán vagy szakaszosan használt épületek esetében célszerű az alacsonyabb hőkapacitású épületszerkezetek használata, magasabb komfortigény és folyamatos üzem mellett kisebb hőingadozás, valamint a nagyobb időállandók miatt kevésbé érzékenyek a nagyobb hőkapacitású épületek az időjárás szélsőségeire.

Szimulációs futtatások alapján megállapított eredmények azt mutatják, hogy lényegesen nagyobb százalékos energiamegtakarítás érhető el, mint a szakirodalomban hivatkozott 1°C alapjel csökkentés $\sim 5\text{-}6\%$ fűtési energiaigény csökkenést okoz. Ez a szimulációk alapján nem egységes, hanem az alapjel hőmérsékletének emelkedésével csökken. Az értéke alacsonyabb hőmérsékleteknél 13% , míg magasabb alapjel hőmérsékleteknél $\sim 6\%$ -os megtakarítást eredményez. Ez némileg ellentmondásnak tűnik, azonban, ha megvizsgáljuk az energiaigényeket akkor a magasabb alapjelnél magasabb energiamegtakarítás egy magasabb kiindulási értékhez tartozik emiatt a százalékos megtakarítás értéke alacsonyabb. Jövőben erre a területre érdemes lenne több figyelmet fordítani, megvizsgálni a hűtési rendszerek igényeit is. A végfelhasználók szokásainak megváltoztatásával, alacsonyabb (de még megfelelő komfortú) hőmérsékletek tartásával csökkenthető lenne a fűtési energiaigény és a károsanyag kibocsátás is.

Az energetikai tanúsítások során azonosított probléma mind a részletes mind az egyszerűsített számítási módnál, hogy nem veszi figyelembe a fűtési hőfokhidat. Ehhez szükséges az adott településre és évre jellemző fűtési hőfokhíd ismerete. Az általam alkalmazott módszertan erre lehetőséget kínál. Első lépésként meghatározható a jellemző fűtési hőfokhíd nyilvánosan hozzáférhető adatbázisok alapján is, nem szükséges külön mérések végzése. Könnyen elvégezhető

a hőfokhíd számítása. Az adatok alapján a ÉKM rendeletben ismertetett módszernél pontosabb fűtési energiafelhasználás számítható. A módszer bővítése további lehetőségeket nyújt más földrajzi területekkel történő bővítése.

A kutatás folytatásaként célszerű lenne kibővíteni más rendeltetésű és méretű épületekre. Megvizsgálni mérési eredményekkel alátámasztva más földrajzi adottságokkal rendelkező épületek esetében. A kutatási terület bővítésével további energiamegtakarítás lenne elérhető pl. fázisváltó anyagok használatát vizsgálva, vagy a szabályozási módok optimalizálásával. Matematikai területen is tér nyílik további kutatásokra: az alkalmazott differenciálegyenletek egyszerűsítésével Laplace-transzformáció segítségével jelentősen gyorsítani lehetne a szimulációk elvégzését.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

Életünk során legtöbb időnket épített környezetben töltjük. Ezért különösen fontos lakóépületeink energiafelhasználása. Számítalan méretezési és szimulációs módszer áll rendelkezésre, amivel többnyire black-box elven végezhetünk összehasonlításokat. Ezek a szoftverek általános célra jól, míg kutatási célra nem alkalmasak. Ezért szükséges saját modellek fejlesztése, ami a kutatási célhoz leginkább alkalmazható. Így megvizsgálhatóak olyan paraméterek, szabályozási algoritmusok, amivel még széleskörűbben megvizsgálhatóak a lakóépületekben zajló energiatranszport folyamatok. Optimalizációk végezhetőek el, különböző forgatókönyvek vizsgálhatóak meg. Előnyös, hogy mérési eredményekkel validálhatóak és bővíthetőek a modellek, ezáltal pontosságuk tovább javítható.

A doktori disszertációmban a lakóépületek fűtési energiaigényének meghatározásával foglalkozom, kiemelt figyelemmel a hő- és energiatranszport jelenségek modellezésére. A szakirodalom áttekintése során különböző nemzetközi és hazai kutatásokat elemeztem, amelyek a hőátbocsátási tényezők, fajlagos hőveszteség, és fűtési hőfokhíd fontosságát tárgyalták. A szakirodalomban feltárt hiányosságok rávilágítottak arra, hogy a hőtároló tömeg, az időállandó és a fűtési hőfokhíd szerepe alulértékelt a jelenlegi kutatásokban.

A kutatásom során kidolgoztam egy fizikai alapú matematikai modellt, amely a lakóépületek termikus folyamatait írja le. A modellt blokkorientált modellezéssel valósítottam meg, amely az épületek határoló szerkezetein kialakuló hő- és energiatranszport folyamatokat írja le differenciálegyenletek formájában. A modellt valós és kisminta modellek mérési adatai alapján validáltam, melynek során a modell pontosságát és alkalmazhatóságát ellenőriztem. A kisminta modellek három egyforma kialakítású kicsinyített épületet jelentett, amiben összehasonlításra került: folyamatos fűtés és szakaszos fűtés, valamint egy referencia épület fűtés nélkül. Ezek a kisminta modellek érzékelőkkel voltak felszerelve. Az egyes mérések párhuzamosan több napig folytak. A mérések különböző hőtároló tömeg behelyezésével meg lettek ismételve. A kisminta modellekről készült MATLAB modell, validálva lett, ezekből a hőtároló tömegre tesztek megállapításokat, valamint a folyamatos és szakaszos fűtési üzemre. Valós épületekkel nincs lehetőség ezen vizsgálatok elvégzésére a magas költség és a hosszú mérési időszakok miatt. A kisminta modelleken végzett mérések megmutatták, hogy hatalmas adatmennyiség keletkezik egy-egy mérés során, melynek feldolgozása kidolgozott módszertant kíván.

Valós épületeken is végeztem méréseket. Készítettem egy összetett fizikai alapú white-box modellt MATLAB blokkorientált környezetben. Ennek validálása megtörtént mérési eredmények alapján. Mért értékek a külső-, belső hőmérséklet, napsugárzás és gázfogyasztás volt. A valós épület összetett modellje túl nagy gépigényű volt, ezért szükségessé vált annak egyszerűsítése. Az egyszerűsített modell validálása is megtörtént a mérési adatok alapján.

A modellt kiterjesztettem bővítettem és validáltam öt lakóépületre, amiknek rendelkezésre álltak a mérési adatai. A későbbiekben ezeken a modelleken végeztem kutatásokat. A kutatások jellemzően az energiamegtakarítást helyezték fókuszba. Paraméterérzékenységi vizsgálatokat végeztem a hőtároló tömegre, az időprogram változtatására és a falszerkezetek eredő hőátbocsátási tényezőjére vonatkozóan.

Elvégeztem szimulációkat az épületek egy adott korszakra jellemző paramétereivel lefuttatva, hogy az egyes épületek milyen fűtési energiaigénnyel rendelkeznének, ha az adott kor paramétereivel készültek volna el. Ebből az egyes építési időszakok és felújítással elérhető megtakarításokra vontam le következtetéseket. A fűtési energiaigény meghatározásánál kulcsszerepet játszik a hőfokhíd. Ezt 2020-2023 évekre meghatároztam a vármegyék székhelyeire, valamint Gödöllőre és Zabarra is. Ehhez szükséges volt egy blokkorientált modell létrehozása, ami a meteorológiai adatok alapján gyorsan és egyszerűen kiszámítja a hőfokhidak értékeit, és a hozzájuk tartozó fűtési napok számát. A modelleket lefutattam a meghatározott fűtési

hőfokhidakkal a különböző évekre és vármegye székhelyre 15-28 °C belső hőmérséklet alapjelre, majd az így kapott eredményeket elemeztem és vizuálisan megjelenítettem. Egy új egyszerűsített, de a TNM rendeletben lévő fűtési energiaigény meghatározásánál pontosabb összefüggést alkottam meg, ami figyelembe veszi az adott területre jellemző hőmérsékleti adatokat.

A kutatás során meghatároztam a fajlagos fűtési energiaigényt jelentősen befolyásoló tényezőket. Az eredmények alapján kimutattam, hogy a hőtároló tömeg növelése és a falazatok hőszigetelésének javítása jelentősen csökkentheti az energiaigényt. A szimulációs eredmények 95% feletti pontossággal egyeztek a valós mérési adatokkal, amely megerősítette a modellek pontosságát és megbízhatóságát. Az eredmények azt is kiemelték, hogy a szabályozási módok, mint az alapjel és a PID szabályozás, további energia-megtakarítást eredményezhetnek.

- Kidolgoztam egy fizikai alapú matematikai modellt, amely közvetlenül alkalmazható lakóépületek termikus folyamatainak modellezésére. A modellt kisminta és valós épületekkel végzett mérésekkel validáltam, bizonyítva annak gyakorlati hasznosságát és adaptálhatóságát.
- A blokkorientált modell $R^2 > 0.99$ determinációs tényezővel képes meghatározni az épületek fajlagos fűtési energiafogyasztását, figyelembe véve a környezeti paramétereket, belső jellemzőket és a határoló szerkezetek fizikai tulajdonságait. A modell magyarországi időjárási körülmények között tesztelt, kiterjesztve a modellezési keretrendszert különféle szabályozási algoritmussal.
- A külső fal fajlagos hőátbocsátási tényezője és a változó alapjellel elérhető éves fűtési energia megtakarítás közötti lineáris összefüggést igazoltam, ami gyakorlati alkalmazást tesz lehetővé a megtakarítások gyors becslésére.
- Lakóépületek esetén a hőkapacitás és a fajlagos fűtési energiafogyasztás közötti összefüggést állapítottam meg, alátámasztva az építőanyagok jelentőségét az energiagazdálkodásban.
- Az 1°C-os hőmérséklet csökkentésével elérhető fűtési energiamegtakarítás százalékos arányát igazoltam, amely segítséget nyújthat az energiafogyasztás optimalizálásában. Pontosítottam az értékeit, mely a szimulációk alapján 7-13% közötti tartományban található, a hőmérsékleti alapjeltől függően.
- Kifejlesztettem egy egyszerűsített öt paraméteres másodfokú függvényt, amely az épületek fajlagos fűtési energiafogyasztását számítja ki, lehetővé téve az energiahatékonysági intézkedések gyors értékelését. Ez gyorsabban elvégezhető és pontosabb eredménnyel szolgál, mint az energetikai tanúsításoknál alkalmazott számítási módszer.

Ezek a tudományos eredmények új megvilágításba helyezik a lakóépületek energetikai modellezését, lehetővé téve a tervezők számára, hogy pontosabban becsüljék meg a lakóépületek várható fűtési energiafogyasztását, optimalizálni tudják a tervezett felújításokat. A további kutatások során a modellek továbbfejlesztése mellett az eredményeket szélesebb körben kívánom alkalmazni, hozzájárulva az épületek globális energiahatékonyságának javításához.

7. SUMMARY

Throughout our lives, we spend most of our time in built environments. Therefore, the energy consumption of our residential buildings is particularly important. Numerous sizing and simulation methods are available that generally allow us to perform comparisons based on a black-box principle. These software tools are well-suited for general purposes, but not for research purposes. Hence, it is necessary to develop our own models, which are most applicable to research objectives. This allows for the examination of parameters and control algorithms that can more thoroughly investigate the energy transport processes in residential buildings. Optimizations can be carried out, and various scenarios can be examined. It is advantageous that the models can be validated and expanded with measurement results, thereby further improving their accuracy.

In my doctoral dissertation, I focus on determining the heating energy requirements of residential buildings, with special attention to the modeling of heat and energy transport phenomena. During the literature review, I analyzed various international and domestic research that discussed the importance of heat transfer coefficients, specific heat loss, and the importance of heating thermal bridges. The gaps identified in the literature highlighted that the role of thermal mass, time constant, and heating thermal bridges are undervalued in current research.

In my research, I developed a physics-based mathematical model that describes the thermal processes in residential buildings. I implemented the model using block-oriented modeling, which describes the heat and energy transport processes occurring in building envelopes in the form of differential equations. The model was validated based on real and small-scale model measurement data, during which the model's accuracy and applicability were verified. The small-scale models consisted of three identically designed miniature buildings in which continuous heating and intermittent heating were compared, along with a reference building without heating. These models were equipped with sensors. The measurements were carried out in parallel over several days. The measurements were repeated with different thermal mass insertions. A MATLAB model of the small-scale models was validated, making observations about the thermal mass and both continuous and intermittent heating modes. Real buildings are not feasible for these studies due to high costs and long measurement periods. The small-scale model measurements showed that a huge amount of data is generated during each measurement, requiring a developed methodology for processing.

I also conducted measurements on real buildings. I created a complex physics-based white-box model in a MATLAB block-oriented environment. Its validation was completed based on measurement results. Measured values included external and internal temperatures, solar radiation, and gas consumption. The real building's complex model was too demanding computationally, so simplification was necessary. The simplified model was also validated based on measurement data.

I extended, expanded, and validated the model for five residential buildings with available measurement data. Later research on these models typically focused on energy savings. I conducted parameter sensitivity studies on thermal mass, schedule adjustments, and the resulting heat transfer coefficients of the wall structures.

I ran simulations on the buildings with parameters characteristic of a specific era to determine what the heating energy requirements would be if they had been built with the parameters of that era. From this, I drew conclusions on savings achievable through construction periods and renovations. The determination of heating energy requirements plays a key role in the thermal bridge. I determined this for the years 2020-2023 for the county capitals, as well as for Gödöllő and Zabar. It was necessary to create a block-oriented model that quickly and easily calculates the thermal bridge values based on meteorological data, and the associated number of heating days. I ran the models with the determined heating thermal bridges for different years and county capitals for an

indoor temperature range of 15-28 °C, then analyzed and visually displayed the results. I developed a new simplified, but more accurate correlation than the one used in TNM regulations for determining heating energy requirements, taking into account the temperature data characteristic of the area.

During the research, I identified factors significantly influencing the specific heating energy demand. The results showed that increasing the thermal mass and improving the insulation of the walls could significantly reduce energy demand. The simulation results, with over 95% accuracy, confirmed the accuracy and reliability of the models. The results also highlighted that control modes, such as baseline and PID control, could yield further energy savings.

- I developed a physics-based mathematical model that can be directly applied to model the thermal processes of residential buildings. I validated the model with measurements from small-scale and real buildings, proving its practical utility and adaptability.
- The block-oriented model, with an $R^2 > 0.99$, can determine the specific heating energy consumption of buildings, taking into account environmental parameters, internal features, and the physical properties of the enclosing structures. The model was tested under Hungarian weather conditions, extending the modeling framework with various control algorithms.
- I verified the linear relationship between the specific heat transfer coefficient of the exterior walls and the achievable annual heating energy savings with a variable baseline, allowing for quick estimation of savings in practical applications.
- I established the relationship between heat capacity and specific heating energy consumption for residential buildings, supporting the significance of building materials in energy management.
- I confirmed the percentage of heating energy savings achievable by reducing the indoor temperature by 1°C, which can help optimize energy consumption. I refined its values, which, based on simulations, are found in the range of 7-13%, depending on the temperature baseline.
- I developed a simplified five-parameter quadratic function that calculates the specific heating energy consumption of buildings, enabling quick evaluation of energy efficiency measures. This can be performed more quickly and with more accurate results than the calculation methods used in energy certifications.

These scientific findings cast new light on the energy modeling of residential buildings, enabling designers to more accurately estimate the expected heating energy consumption of residential buildings and optimize planned renovations. In further research, I plan to apply the results more broadly, contributing to the global improvement of building energy efficiency.

8. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezúton szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek Dr. Géczi Gábor habilitált egyetemi docensnek és Dr. Földi László József egyetemi docensnek, akik irányt mutattak a kutatásom megtervezése és a következő lépések megtételében, bevezettek a tudományos életbe annak kihívásaiba és mélységébe. A kutatásom során folyamatos szakmai és emberi támogatásukkal segítettek munkámat. Biztosították a folyamatos haladáshoz szükséges célok és feladatok kijelölését, szabadidejüket feláldozva segítették munkámat. Köszönöm a kezdetekben nyújtott szakmai segítségét Dr. Veres Antalnak.

Külön köszönettel tartozom azoknak az ismerősöknek, akik lakóépületeikről adatokat szolgáltattak kutatásom során, segítve ezzel a mérések és szimulációk elvégzését.

Köszönetemet fejezném ki munkahelyem által tanúsított toleranciáért, hogy biztosították a lehetőséget kutatásom elvégzésére.

Végül de nem utolsó sorban köszönettel és hálával tartozom családomnak, feleségemnek és fiaimnak, akik mindvégig megértőek voltak és támogatásukról biztosítottak.

9. MELLÉKLETEK

M1. Irodalomjegyzék

1. 7/2006 TNM Rendelet, 2006. *Az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról.* hely nélkül.:ismeretlen szerző
2. 9/2023 ÉKM Rendelet, 2023. *Az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról.* hely nélkül.:ismeretlen szerző
3. Afram, A. & Janabi-Sharif, F., 2014. Theory and applications of HVAC control systems A review of model predictive control (MPC). *Building and Environment*, 72. kötet, pp. 343-355.
4. Afroz, Z., Shafiullah, G., Urmee, T. & Higgins, G., 2019. Tuning approach of dynamic control strategy of temperature set-point for existing commercial buildings. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 609(6).
5. Athienitis, A. & O'Brien, W., 2015. *Modeling, Design, and Optimization of Net-Zero Energy Buildings*. Germany: Wiley.
6. Baumann, M. és mtsai., 2016. *Épületenergetika segédlet*. 1, szerk. Budapest: MMK.
7. Beckman, W. A. és mtsai., 1994. The most complete solar energy system modeling and simulation software. *Renewable Energy*, 5(1), pp. 486-489.
8. Behrooz, F. és mtsai., 2018. Review of Control Techniques for HVAC Systems—Nonlinearity Approaches Based on Fuzzy Cognitive Maps. *energies*, 11(495).
9. Béni, E. & L. Szabó, G., 2023. A belső léghőmérséklet változásának hatása az energiaigényekre. *Magyar Épületgépészet*, 71(7-8), pp. 3-7.
10. Buonomano, A., Montanaro, U., Palomboa, A. & Santini, S., 2015. Adaptive control for building thermo-hygrometric analysis: a novel dynamic simulation code for indoor spaces with multi-enclosed thermal zones. *Energy Procedia*, 78. kötet, pp. 2190-2195.
11. Burnand, G., 1954. The study of the thermal behaviour of structures by electrical analogy. *BRITISH JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, pp. 50-53.
12. Butcher, J. C., 2016. *Numerical methods for ordinary differential equations*. Third Edition szerk. United Kingdom: John Wiley & Sons.
13. Buzás, J. & Kicsiny, R., 2014. Transfer functions of solar collectors for dynamical analysis and control design. *Renewable Energy*, 68. kötet, pp. 146-155.
14. Cengel, Y. A. & Ghajar, A. J., 2014. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. 5th edition szerk. New York: McGraw Hill.
15. Chalkley, J. N. & Cater, H. R., 1968. *Thermal environment for the student of architecture*. London: Architectural Press.
16. Coakley, D., Raftery, P. & Keane, M., 2014. A review of methods to match building energy simulation models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37. kötet, pp. 123-141.

17. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L. & Stein, C., 2001. *Introduction To Algorithms*. Second Edition szerk. Cambridge, Massachusetts London, England: MIT Press.
18. Crawley, D. B. és mtsai., 2001. EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *Energy and Buildings*, 33. kötet, pp. 319-331.
19. Csáky, I., Kalmár, T. & Kalmár, F., 2013. *Épülettechnikai rendszerek diagnosztikája és üzemeltetése*. Budapest: Terc Kft.
20. Csoknyai, T. és mtsai., 2016. Building stock characteristics and energy performance of residential buildings in Eastern-European countries. *Energy and Buildings*, 132. kötet, pp. 39-52.
21. Csoknyai, T. & Szalay, Z., 2023. Változott az épületenergetikai és a tanúsítási rendelet. *Magyar Épületgépészet*, 5-6. kötet, pp. 3-8.
22. Csoknyai, T. és mtsai., 2024. *Alkalmazott Épületenergetika*. Budapest: MMK.
23. D'Agostino, D., Cuniberti, B. & Bertoldi, P., 2017. *Energy consumption and efficiency technology measures in European non-residential buildings*. 153 szerk. hely nélkül.:ELSEVIER SCIENCE SA.
24. Danfoss, 2024. *Heating mats*. [Online]
Available at: <https://store.danfoss.com/en/Climate-Solutions-for-heating/Electric-heating/DEVI-electric-heating/Heating-mats/Heating-Mats%2C-DEVIheat%E2%84%A2-150S%2C-150-W-m%C2%B2%2C-0-50-m%C2%B2%2C-Supply-voltage-%5BV%5D-AC%3A-230/p/140F0328>
25. Dávid, L., György, K. & Galaczi, L.-A., 2020. Survey of Optimal Control and Model Predictive Control with state estimation and a real time application. *Műszaki Tudományos Közlemények*, 13. kötet, pp. 19-30.
26. Dong, B., 2010. Non-linear optimal controller design for building HVAC systems. *IEEE International Conference on Control Applications*, pp. 210-215.
27. Dormand, J. R. & Prince, P. J., 1980. A family of embedded Runge-Kutta formulae. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 6, pp. 19-26.
28. Dr. Möller, K., 1943. *Építési zsebkönyv*. Budapest: Kir. Magy. Egyetemi Nyomda.
29. Dreyfus, S., 2002. Richard Bellman on the Birth of Dynamic Programming. *Operations Research*, 50. kötet, pp. 48-51.
30. Elbeltagi, E. & Wefki, H., 2021. Predicting energy consumption for residential buildings using ANN through parametric modeling. *Energy Reports*, 7. kötet, pp. 2534-2545.
31. Eurostat, 2024. *ec.europa.eu/eurostat*. [Online]
Available at:
https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_chddr2_a/default/map?lang=en
[Hozzáférés dátuma: 15 12 2023].

32. Ezermeister, 2022. [ezermeister.hu](https://ezermeister.hu/cikk-9802/Energiatakarékos_futesszabalyozas). [Online]
Available at: https://ezermeister.hu/cikk-9802/Energiatakarékos_futesszabalyozas
[Hozzáférés dátuma: 25 11 2023].
33. Farkas, I., 2001. *Folyamatirányítás: Jegyzet*. Gödöllő: Szent István Egyetem.
34. Farkas, I., Biró, A., Buzás, J. & Lágymányosi, A., 1999. *Számítógépes szimuláció Egyetemi jegyzet*. Gödöllő: Szent István Egyetemi Kiadó.
35. Fehlberg, E., 1964. New High-Order Runge-Kutta Formulas with Step Size Control for Systems of First-and Second-Order Differential Equations. *ZAMM 44 Sonderheft*, pp. 17-29.
36. Fekete, I., 1985. *Épületfizika Kézikönyv*. Budapest: Műszaki Könyvkiadó.
37. Gonzalez-Vidal, A., Terroso-Saenz, F., Ramallo-Gonzalez, A. P. & Skarmeta, A., 2017. *Data driven modeling for energy consumption prediction in smart buildings*. Piscataway, NJ, USA, IEEE.
38. Gouda, M. M., Danaher, S. & Underwood, C. P., 2002. Building thermal model reduction using nonlinear constrained optimization. *Building and Environment*, 37. kötet, pp. 1255-1265.
39. Harb, H., Neven, B., Luis, H. & Streblow, R., 2016. Development and validation of grey-box models for forecasting the thermal response of occupied buildings. *Energy and Buildings*, 117. kötet, pp. 199-207.
40. Harish, V. & Kumar, A., 2016. A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56. kötet, pp. 1272-1292.
41. Harmati, N. L., Folic, R. J. & Magyar, Z., 2015. Energy Performance Modelling and Heat Recovery Unit Efficiency Assessment of an Office Building. *Thermal Science*, 19(3), pp. 865-880.
42. Hazyuk, I., Ghiaus, C. & Penhouet, D., 2014. Model Predictive Control of thermal comfort as a benchmark for controller performance. *Automation in Construction*, 43. kötet, pp. 98-109.
43. Hirsch, J. J., 2022. [doe2.com](http://www.doe2.com). [Online]
Available at: www.doe2.com
[Hozzáférés dátuma: 25 11 2021].
44. Homonnay, G., 2000. Fűtéstechika I.. In: *Fűtéstechika I.*. Budapest: Műegyetemi Kiadó.
45. Horváth, T., 2017. ÉPÜLETENERGETIKAI SZABÁLYOZÁSUNK KÖRVONALAI ÉS ELŐZMÉNYE. *Magyar Építőipar*, pp. 156-165.
46. HungaroMet, 2020. *HungaroMet Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt.* [Online]
Available at: https://www.met.hu/eghajlat/magyarorszag_eghajlata/eghajlati_adatsorok/
47. Hu, X., Miao, R., Yu, Y. & Megri, A. C., 2022. Development of a high-efficiency and cost-effective ground source heat pump system for hot-climate applications. *Indoor and Built Environment*, 32(2), pp. 387-407.

48. International Energy Agency, 2023. *Széndioxid kibocsátás szektronként Magyarországon 2021*. [Online]
Available at: <https://www.iea.org/countries/hungary/emissions>
[Hozzáférés dátuma: 12 08 2024].
49. Jain, N., Burman, E., Mumovic, D. & Davies, M., 2021. Managing energy performance in buildings from design to operation using modelling and calibration. *Building Services Engineering Research & Technology*, 42(5).
50. Kalmár, T., 2009. Családi házak fűtési energiaigényének elemzése. *Magyar Épületgépészet*, 58. kötet, pp. 4-8.
51. Karmacharya, S., Putrus, G., Underwood, C. & Mahkamov, K., 2012. Thermal modelling of the building and its HVAC system using Matlab/Simulink. *International Symposium On Environment Friendly Energies And Applications*, 2nd International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications. kötet, pp. 202-206.
52. Kassai, M., 2017. Prediction of the HVAC energy demand and consumption of a single family house with different calculation methods. *Energy Procedia*, 112. kötet, pp. 585-594.
53. Klein, S. A., 2017. *TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program*. Solar Energy Laboratory, Madison, USA: University of Wisconsin.
54. KSH, 2022. *15.9.2.1. Budapest időjárási adatai*. [Online]
Available at: https://www.ksh.hu/stadat_files/kor/hu/kor0070.html
55. KSH, 2023a. *15.1.1.37. Magyarország és Budapest időjárásának adatai*. [Online]
Available at: https://www.ksh.hu/stadat_files/kor/hu/kor0037.html
56. KSH, 2023b. *15.1.2.12. Időjárási adatok megfigyelőállomásonként*. [Online]
Available at: https://www.ksh.hu/stadat_files/kor/hu/kor0056.html
57. Kuczyński, T. & Staszczuk, A., 2020. Experimental study of the influence of thermal mass on thermal comfort and cooling energy demand in residential buildings. *Energy*, 195. kötet.
58. Lakatos, M., Bihari, Z., Izsák, B. & Szentes, O., 2021. Globális és hazai éghajlati trendek, szélsőségek változása: 2020-as helyzetkép. *Scientia et Securitas*, 2(2), pp. 164-171.
59. Laurain, V., Gilson, . M., Tóth, R. & Garnier, H., 2010. Refined instrumental variable methods for identification of LPV Box–Jenkins models. *Automatica*, 46(6), pp. 959-967.
60. Le Dréau, J. & Heiselberg, P. K., 2016. Energy flexibility of residential buildings using short term heat storage in the thermal mass. *Energy*, pp. 991-1002.
61. Levermore, G., 2019. Time constants for understanding building dynamics. *Building Serv. Eng. Res. Technol.*
62. Lindfield, G. & Penny, J., 2019. *Numerical Methods: Using MATLAB*. 4th edition szerk. hely nélk.: Academic Press.

-
63. Li, Y., Castiglione Rodríguez, J. I., Atroza, R. & Chen, Y., 2021. Real-time thermal dynamic analysis of a house using RC models and joint state-parameter estimation. *Building and Environment*, 188. kötet.
64. Loyola-González, O., 2019. Black-Box vs. White-Box: Understanding Their Advantages and Weaknesses From a Practical Point of View. *RESEARCH ADVANCES AND CHALLENGES*, 7. kötet, pp. 154096-154113.
65. Macskássy, Á., 1971. *Központi Fűtés I.*. Budapest: Tankönyvkiadó.
66. MathWorks, I., 2024. *MATLAB R2024a*. hely nélk.:ismeretlen szerző
67. Meng, Q. & Mourshed, M., 2017. Degree-day based non-domestic building energy analytics and modelling should use building and type specific base temperatures. *Energy and Buildings*, 155. kötet, pp. 260-268.
68. Meskin, N. és mtsai., 2011. Parameter Estimation of Biological Phenomena Modeled by S-systems: An Extended Kalman Filter Approach. *IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference*, pp. 4424-4429.
69. Mirinejad, H., Sadati, S. H., Ghasemian, M. & Torab, H., 2008. Control Techniques in Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC) Systems. *Journal of Computer Science*, pp. 777-783.
70. Moretti, E., Proietti, M. G. & Stamponi, E., 2021. A multiple Linear Regression Model to predict indoor temperature trend in historic buildings for book conservation: the case study of “Sala del Dottorato” in Palazzo Murena, Italy. *Journal of Physics: Conference Series*, 8th International Building Physics Conference (IBPC 2021). kötet.
71. Mourshed, M., 2012. Relationship between annual mean temperature and degree-days. *Energy and Buildings*, 54. kötet, pp. 418-425.
72. MSZ EN ISO 10211, 2017. *Hőhidak az épületszerkezetekben. Hőáramok és felületi hőmérsékletek. Részletes számítások*. hely nélk.:ismeretlen szerző
73. MSZ EN ISO 6946, 2017. *Épületszerkezetek és épületelemek. Hővezetési ellenállás és hőátbocsátás. Számítási módszerek*. hely nélk.:ismeretlen szerző
74. Naidu, D. S. & Rieger, C. G., 2011. Advanced control strategies for heating, ventilation, air-conditioning, and refrigeration systems—An overview: Part I: Hard control. *HVAC&R Research*, 17(1), pp. 2-21.
75. NASA, 2024. *NASA POWER Data Acces Viewer*. [Online] Available at: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>
76. Nishimwe, A. M. . R. & Reiter, S., 2022. Using artificial intelligence models and degree-days method to estimate the heat consumption evolution of a building stock until 2050: A case study in a temperate climate of the Northern part of Europe. *Cleaner and Responsible Consumption*, 5. kötet.
77. Ode45, 2023. *MathWorks*. [Online] Available at: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode45.html> [Hozzáférés dátuma: 26. 11. 2023.].

-
78. OMSZ, 2022. <https://odp.met.hu/>. [Online]
Available at: <https://odp.met.hu/>
79. Páger, S., Géczi, G. & Földi, L., 2024. A szakaszos fűtési üzem hatása az energiamegtakarításra különböző időszakban épült családi házak esetén. *Magyar Épületgépészet*, 3. kötet, pp. 9-17.
80. Patonai, Z., Kicsiny, R. & Géczi, G., 2022. Multiple linear regression based model for the indoor temperature of mobile containers. *Heliyon*, 8. kötet.
81. Perera, D. W. U., Pfeiffer, C. F. & Skeie, N.-O., 2014. Control of temperature and energy consumption in buildings - a review. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT*, 5(4).
82. Rahrooh, A. & Shepard, S., 2009. Identification of nonlinear systems using NARMAX model. *Nonlinear Analysis*, 71. kötet, pp. 1198-1202.
83. Reynders, G., Dirikin, J. & Saelens, D., 2014. Quality of grey-box models and identified parameters as function of the accuracy of input and observation signals. *Energy and Buildings*, 82. kötet, pp. 236-274.
84. Roberz, F., Loonen, R., Hoes, P. & Hensen, J., 2017. Ultra-lightweight concrete: Energy and comfort performance evaluation in relation to buildings with low and high thermal mass. *Energy and Buildings*, 138. kötet, pp. 432-442.
85. Rockett, P. & Elizabeth, A. H., 2017. Model-predictive control for non-domestic buildings: a critical review and prospects. *Building Research & Information*, 45(5), pp. 556-571.
86. Sivanandam, V. & Sundaram, S., 2012. Intelligent Humidity Control for Healthy Home to Wealthy Industry: A Review. *Research Journal of Information Technology*, pp. 73-84.
87. Stan Ivan, F. E. & Mircea, I., 2013. Determining the time constant of buildings. In: V. Marascu-Klein, M. Ciontu & V. Vali, szerk. Brasov: WSEAS, pp. 202-206.
88. Szalay, Z., 2016. Sok sebből vérzik az energetikai rendelet. *Magyar Épületgépészet*, 65(11), pp. 17-20.
89. Szalay, Z. & Kiss, B., 2017. Dinamikus paraméterek az energiaigény számításában 1. rész: Nettó fűtési energiaigény avagy szorozzunk-e hasznosítási tényezővel. *Magyar Épületgépészet*, LXVI.(9), pp. 20-27.
90. Tabasi, S., Aslani, A. & Forotan, H., 2016. Prediction of Energy Consumption by Using Regression Model. *Computational Research Progress in Applied Science & Engineering*, 2(3), pp. 110-115.
91. Tashtoush, B., Molhim, . M. & Al-Rousan, M., 2005. Dynamic model of an HVAC system for control analysis control analysis. *Energy*, 30(10), pp. 1729-1745.
92. Tóth, J., Erdélyi, V., Jánosi, L. & Farkas, I., 2019. Termikus napenergia hasznosító rendszer kismintamodelljének identifikációja. *Magyar Energetika*, 26. kötet, pp. 18-23.

93. Vadiée, A., Dadoo, A. & Gustavson, L., 2019. *A comparison between four dynamic energy modeling tools for simulation of space heating demand of buildings*. hely nélkül., Springer International Publishing, pp. 701-711.
94. Vajda, J., 2023. <https://epuletgepesz.hu/>. [Online]
Available at: <https://epuletgepesz.hu/2023/04/28/epuletek-lehulesi-folyamatarol-es-termikus-idoallandojarol/>
[Hozzáférés dátuma: 25 06 2023].
95. Verbai, Z., Lakatos, Á. & Kalmár, F., 2014. Prediction of energy demand for heating of residential buildings using variable degree day. *Energy*, 76. kötet, pp. 780-787.
96. Verma, A., Prakash, S. & Kumar, A., 2020. ANN-based energy consumption prediction model up to 2050 for a residential building: Towards sustainable decision making. *Sustainable Energy*, 40(3).
97. Wang, R., Lu, S. & Feng, W., 2022. The energy performance and passive survivability of high thermal insulation buildings in future climate scenarios. *Building Simulation*, 15. kötet, pp. 1209-1225.
98. Winkelmann, F. C. és mtsai., 1993. *DOE-2 SUPPLEMENT Version 2.1E*. Berkeley, California: Lawrence Berkeley Laboratory.
99. Witte, M. J., Henninger, R. H. & Glazer, J., 2001. *Testing and validation of a new building energy simulation program*. Rio de Janeiro, Brazília, IBPSA, pp. 353-359.
100. Xie, X. & Lam, J., 2018. Guaranteed cost control of periodic piecewise linear time-delay. *Automatica*, 94. kötet, pp. 274-278.
101. Xiong, W., Yang, X., Huang, B. & Xu, B., 2014. Multiple-Model Based Linear Parameter Varying Time-Delay System Identification with Missing Output Data Using an Expectation-Maximization Algorithm. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53. kötet, pp. 11074-11083.
102. Yang, X., Liu, X. & Han, B., 2018. LPV model identification with an unknown scheduling variable in the presence of missing observations – a robust global approach. *IET Control Theory & Applications*, 12. kötet, pp. 1465-1473.
103. Yang, Y., Hu, G. & Spanos, C. J., 2022. Stochastic Optimal Control of HVAC System for Energy-Efficient Buildings. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 30(1), pp. 376-383.
104. Yin, S., Yang, H. & Kaynak, O., 2017. Sliding Mode Observer-Based FTC for Markovian Jump Systems with Actuator and Sensor Faults. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 62(7), pp. 3551 - 3558.
105. Zamani, V., Abtahi, S., Li, Y. & Chen, Y., 2024. Heating and cooling supply estimation to control buildings temperature using resistor-capacitor thermal model, unscented kalman filter, and nonlinear least square method. *Building Serv. Eng. Res. Technol*, 45. kötet, pp. 135-160.

M2. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk

Lektorált cikk világhelyen

1. **Páger Sz.**, Földi L., Géczi G. (2023): Comparative temperature and consumption data measurement of model buildings with different thermal time constants, Thermal Science. Online first: 0354-98362300228P, 13 p. <https://doi.org/10.2298/TSCI230604228P>, ISSN 2334-7163
2. **Páger Sz.**, Földi L., Géczi G. (2022): Creation and validation of simplified mathematical model for residential building energy analysis in matlab environment. Mechanical Engineering Letters: R and D: Research And Development, Vol. 22, pp. 26-41., 16 p., ISSN 2060-3789
3. **Páger Sz.**, Veres A., Géczi, G, Földi L. (2021): Energy Simulation Based on a Mathematical Model of a Residential Building, Scientific Bulletin Series C: Fascicle Mechanics, Tribology, Machine Manufacturing Technology Vol. 35 pp. 67-70., 4 p., ISSN: 1224-3264
4. **Páger Sz.**, Földi L., Géczi G., (befogadva, lektorálás alatt 2024): Increasing heat capacity – in temperature-controlled accommodation - increases energy use, Thermal Science.

Lektorált cikk magyar nyelven

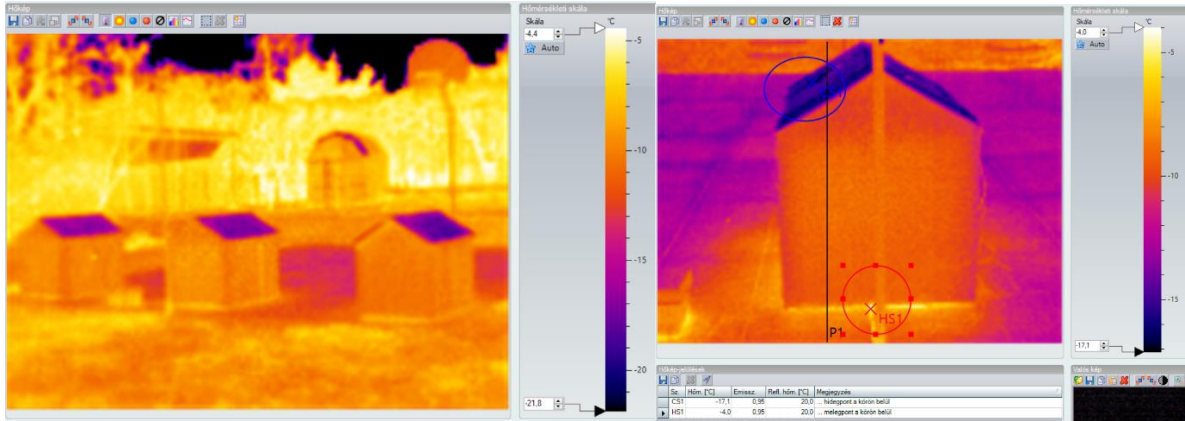
5. **Páger Sz.**, Földi L., Géczi G. (2022): Matematikai modell fejlesztése és validálása lakóépületek energiaigényét befolyásoló hidraulikai kapcsolások vizsgálatára, Magyar Energetika 29: 3 pp. 14-21., 8 p., ISSN 1216-8599
6. **Páger Sz.**, Géczi G., Földi L. (2023) Energiahatékonyság igazolása lakóépület fűtési rendszer szabályozási módjának a függvényében, MATLAB SIMULINK környezetben modellezve, Journal of Central European Green Innovation 11: 2 pp. 49-58. Paper: 4850, 10 p., ISSN 2064-3004
7. **Páger Sz.**, Géczi G., Földi L. (2024): A szakaszos fűtési üzemi hatása az energiamegtakarításra különböző időszakban épült családi házak esetén, Magyar Épületgépészet LXXIII: 3 pp. 9-17. Paper: LXXIII. évfolyam, 2024/3. szám, 9 p. ISSN 1215 9913

Nemzetközi konferencia kiadvány

Nemzetközi konferencia abstract

8. **Páger Sz.**, Géczi G., Földi L. (2021): Modelling of buildings with a mathematical approach, 27th Workshop on Energy and Environment, December 9-10, 2021, Gödöllő, Hungary: Book of Abstracts 38, pp., 30 p, 1p.: Gödöllő, Magyarország: Hungarian University of Agriculture and Life Sciences, ISBN 978-963-269-972-1
9. **Páger Sz.**, Földi L., Veres A., Géczi G. (2021): Family house energy balance modeling, Efficiency, solar and thermal energy for the human comfort, Book of Abstracts 47 p. pp. 41-42., 2 p.: Gödöllő, Magyarország: Hungarian University of Agriculture and Life Sciences, ISBN 978-963-269-958-5

M3. Kisminta modell



M3.1. ábra Kisminta modell hőkamerás felvételek



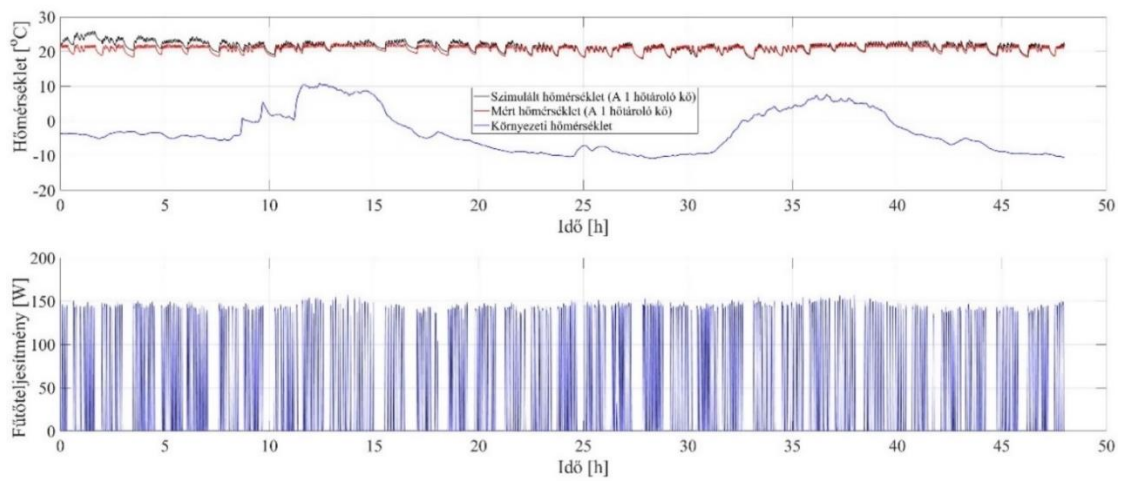
M3.2. ábra Kisminta modell mérőeszközök és szabályozás



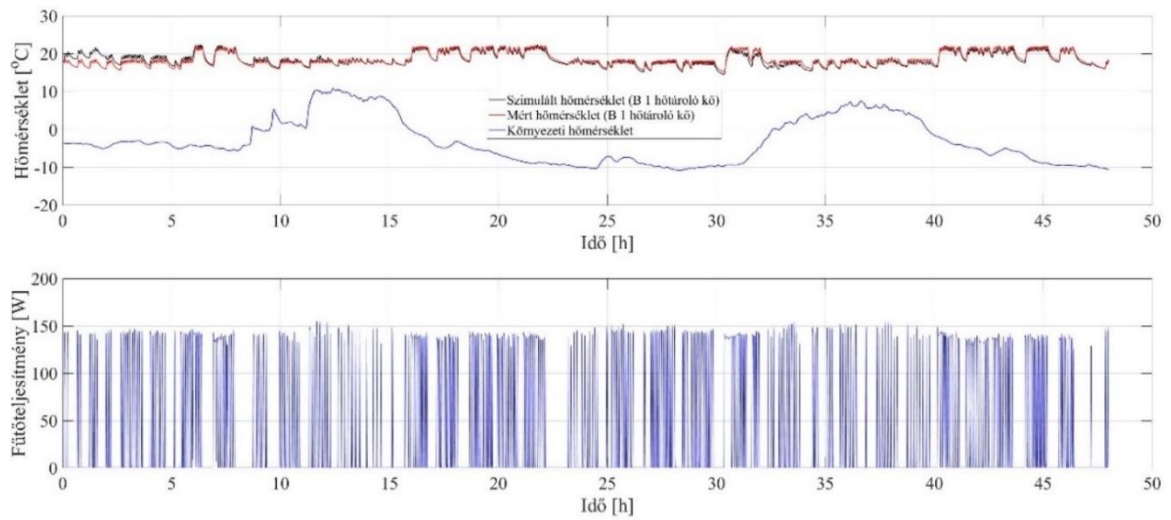
M3.3. ábra Kisminta modell mérés közben



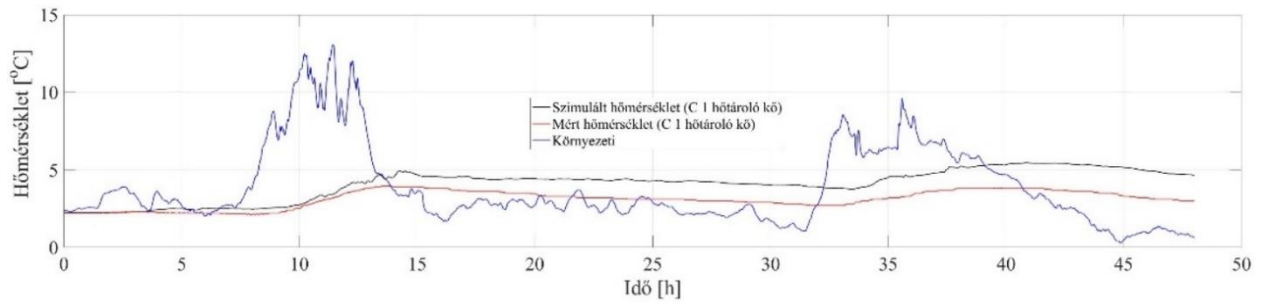
M3.4. ábra Kisminta modell a mérés helyszínén



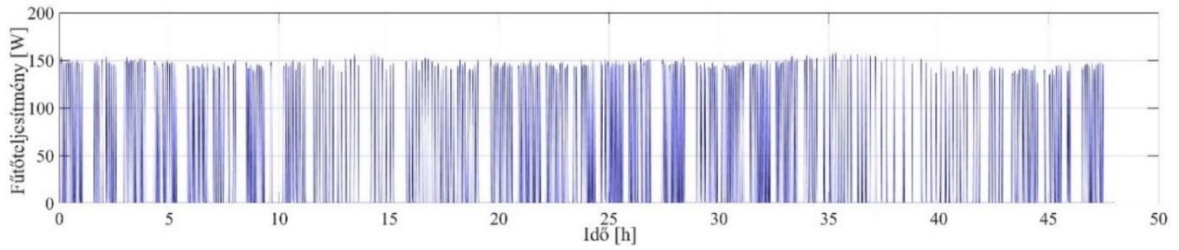
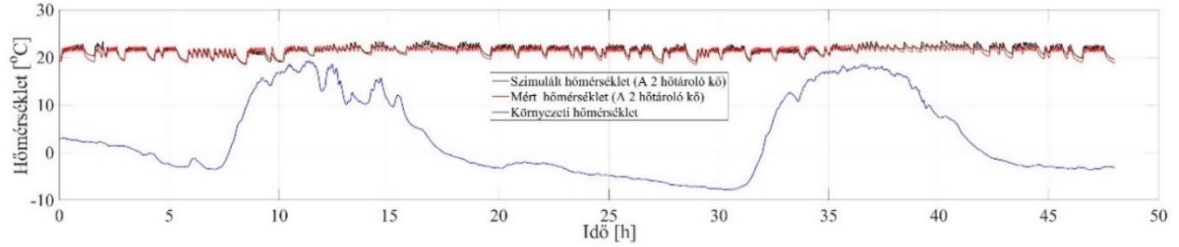
M3.5. ábra A kisminta modell 1 hőtároló kő



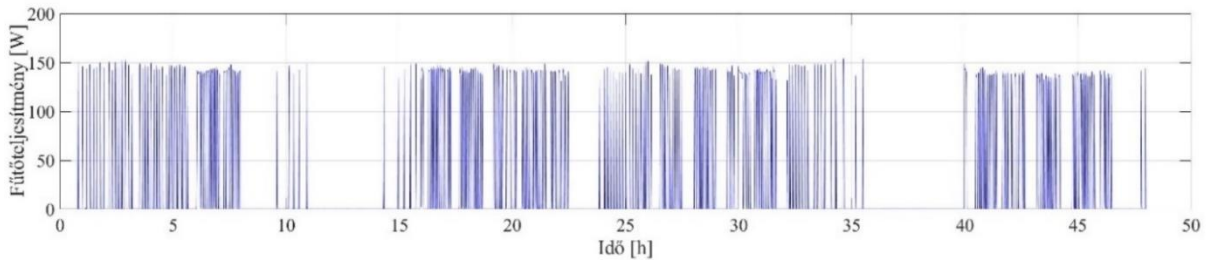
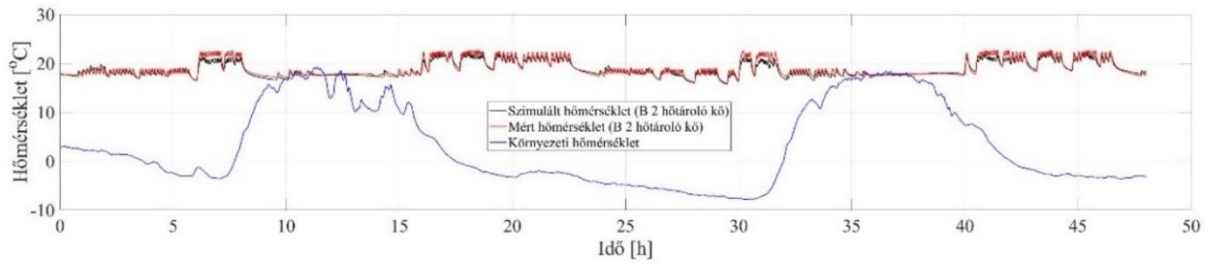
M3.6. ábra B kisminta modell 1 hőtároló kő



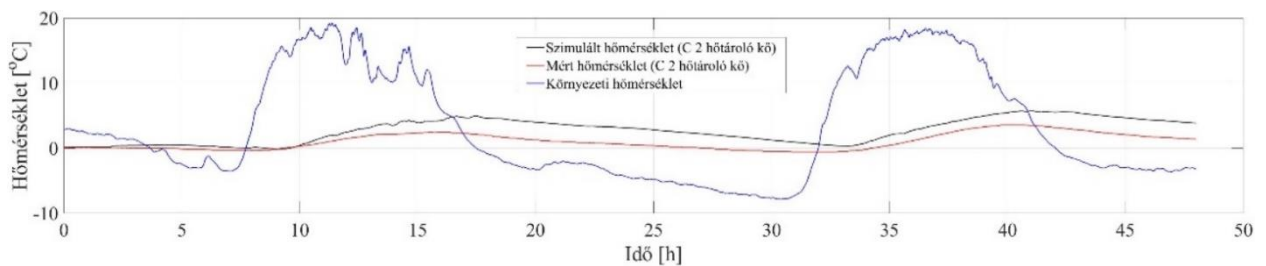
M3.7. ábra C kisminta modell 1 hőtároló kő



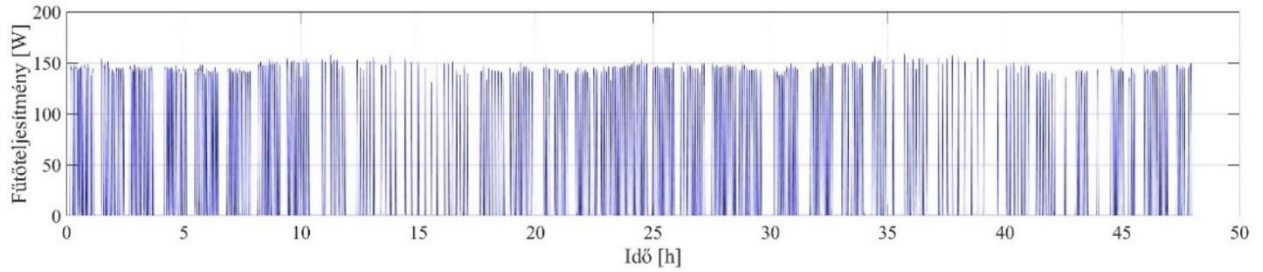
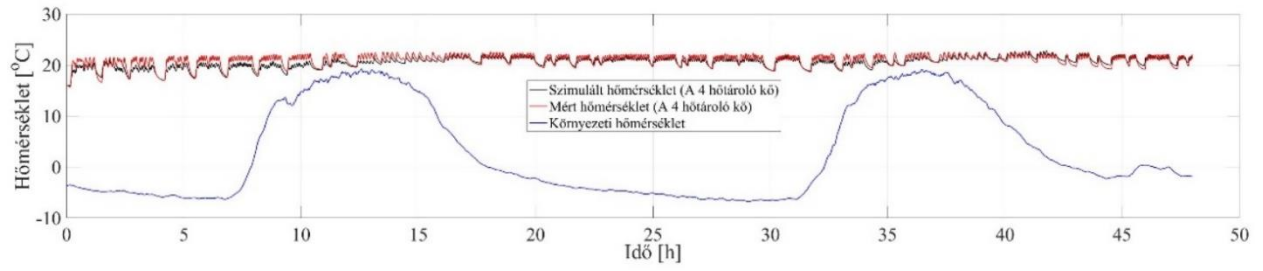
M3.8. ábra A kisminta modell 2 hőtároló kő



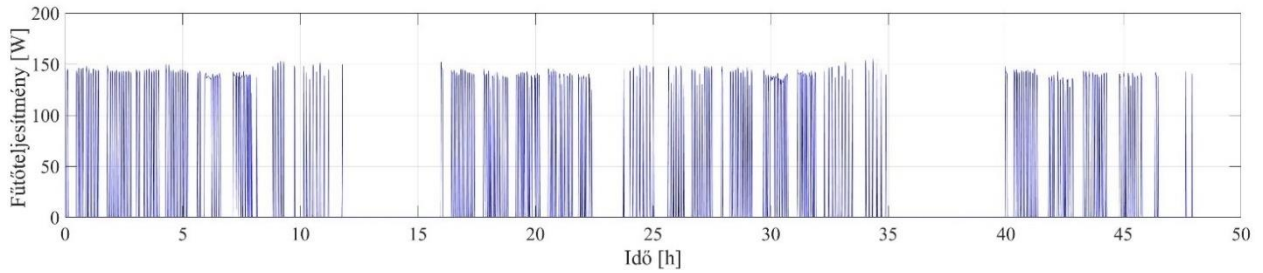
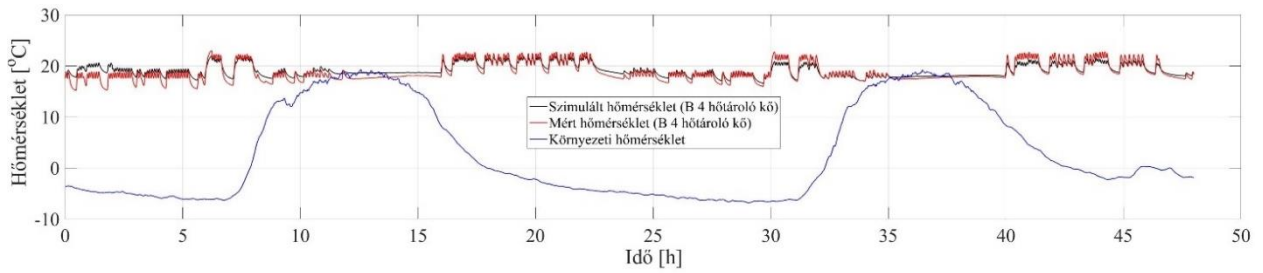
M3.9. ábra B kisminta modell 2 hőtároló kő



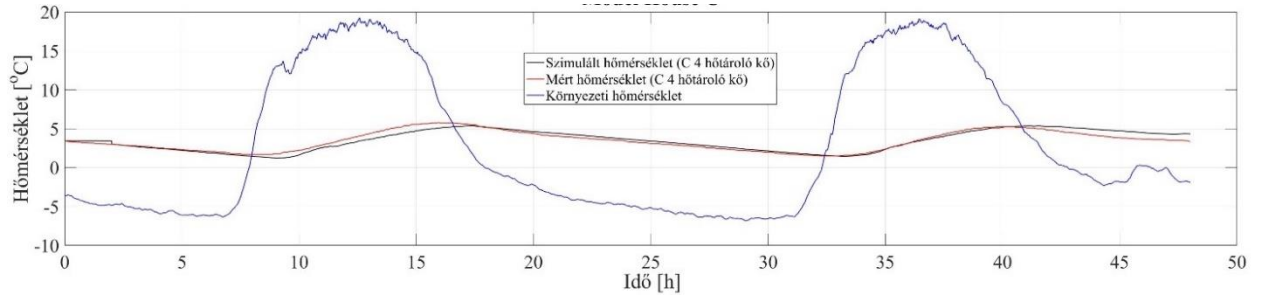
M3.10. ábra C kisminta modell 2 hőtároló kő



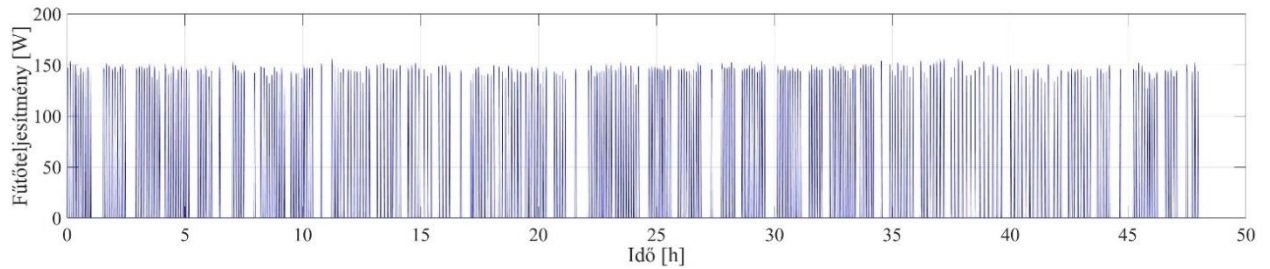
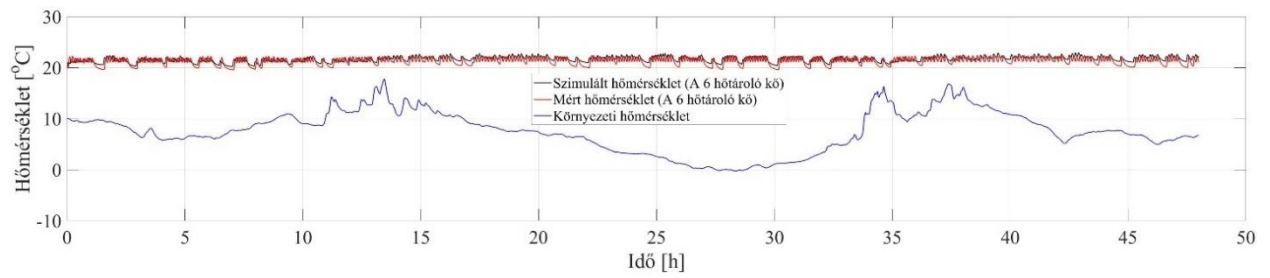
M3.11. ábra A kisminta modell 4 hőtároló kő



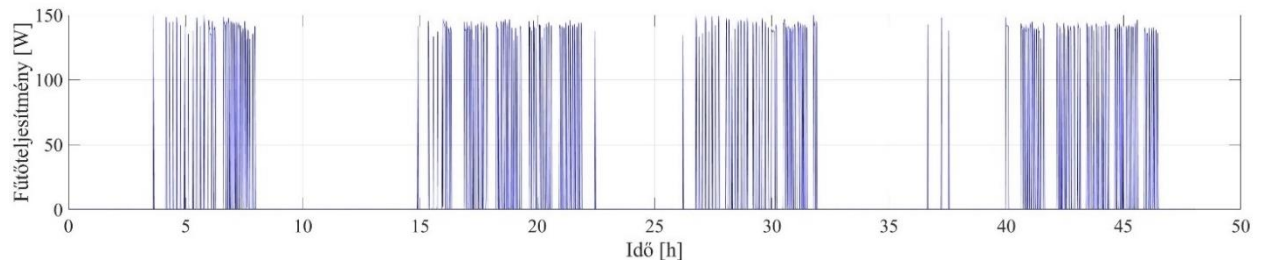
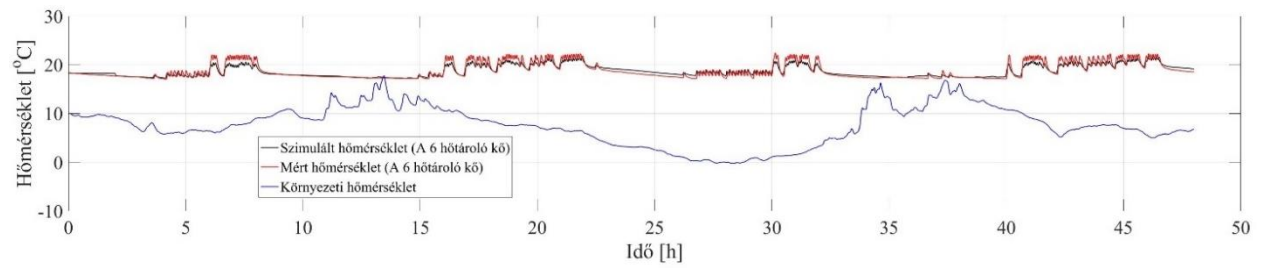
M3.12. ábra B kisminta modell 4 hőtároló kő



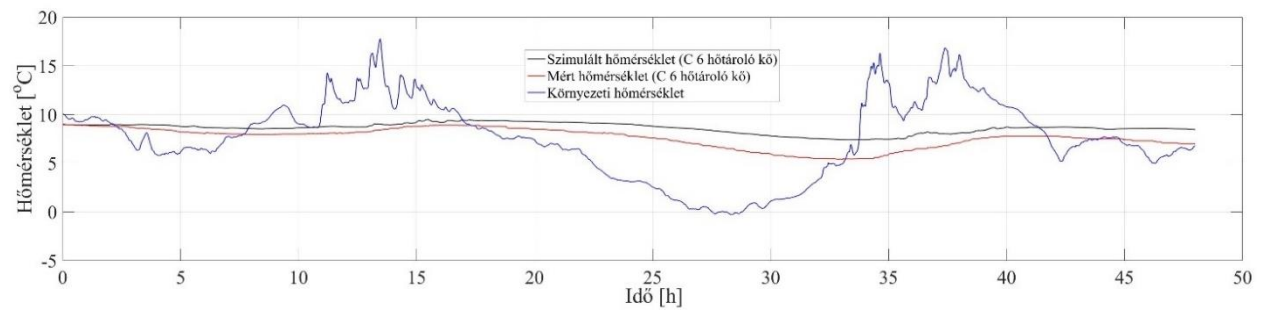
M3.13. ábra C kisminta modell 4 hőtároló kő



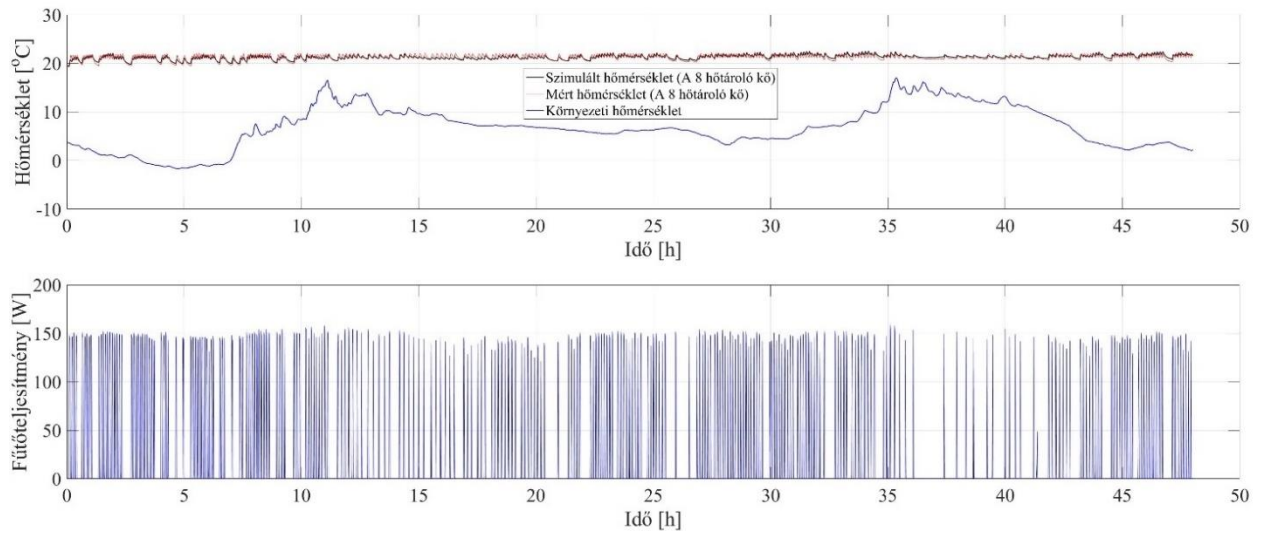
M3.14. ábra A kisminta modell 6 hőtároló kő



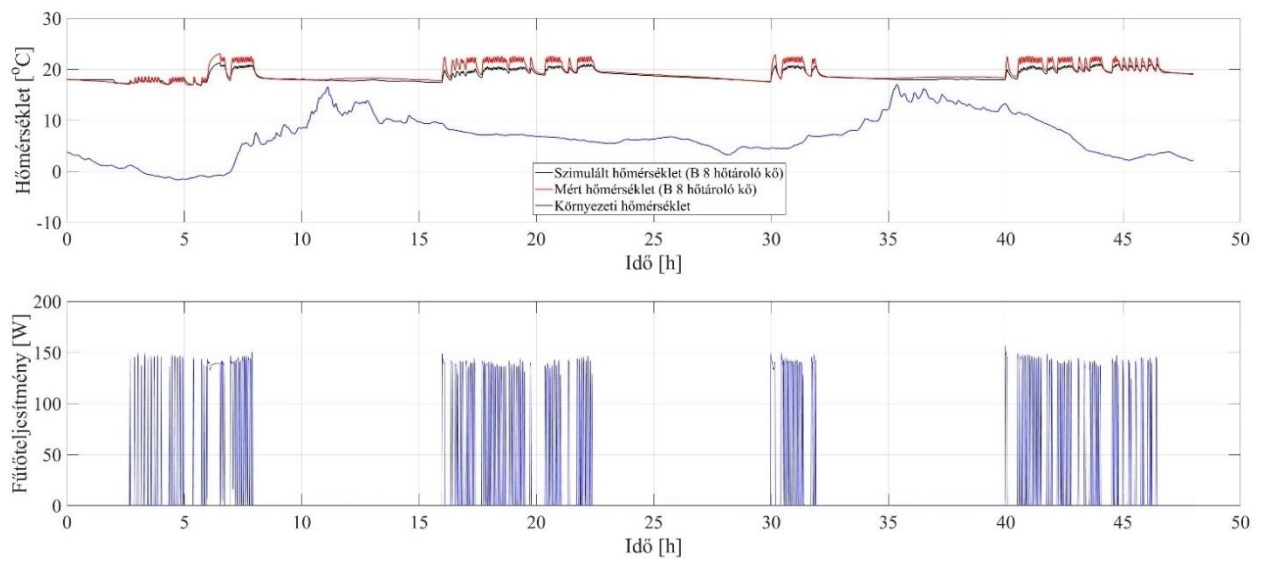
M3.15. ábra B kisminta modell 6 hőtároló kő



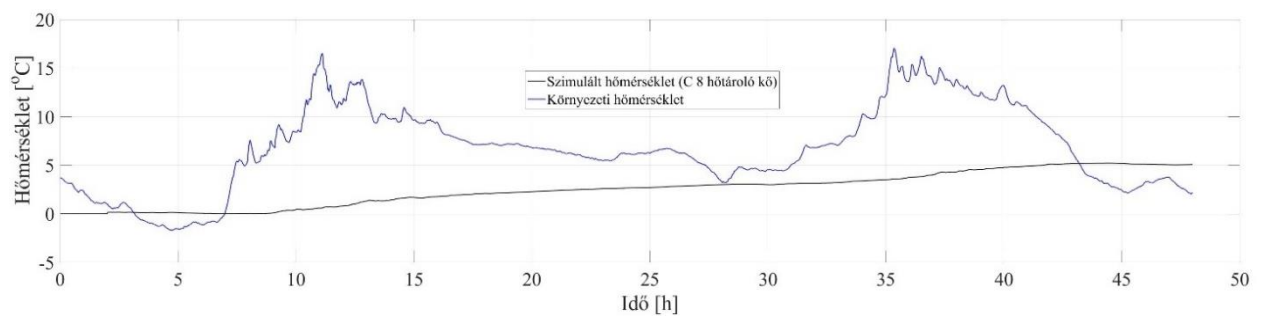
M3.16. ábra C kisminta modell 6 hőtároló kő



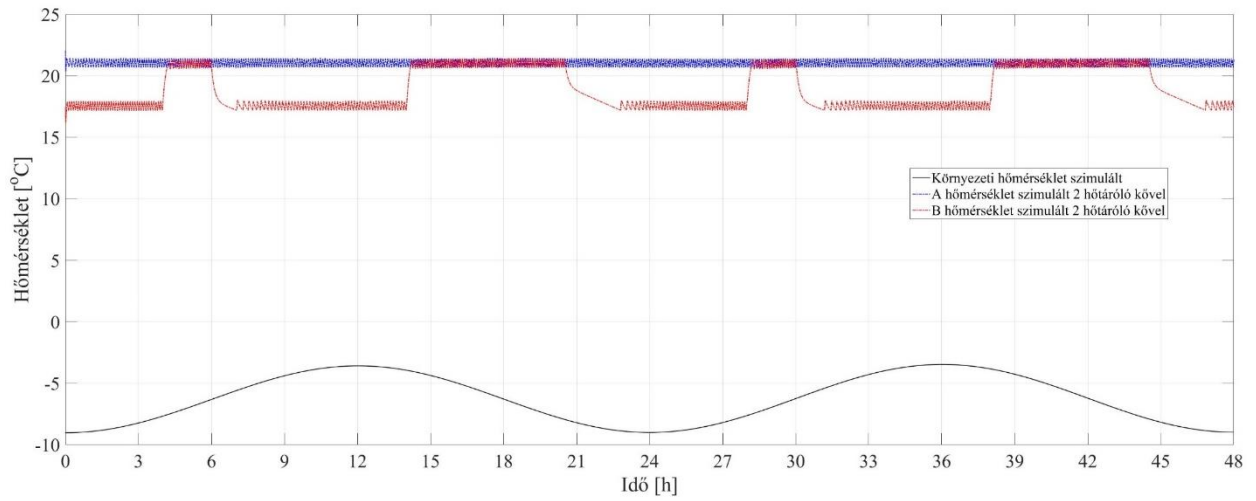
M3.17. ábra A kisminta modell 8 hőtároló kő



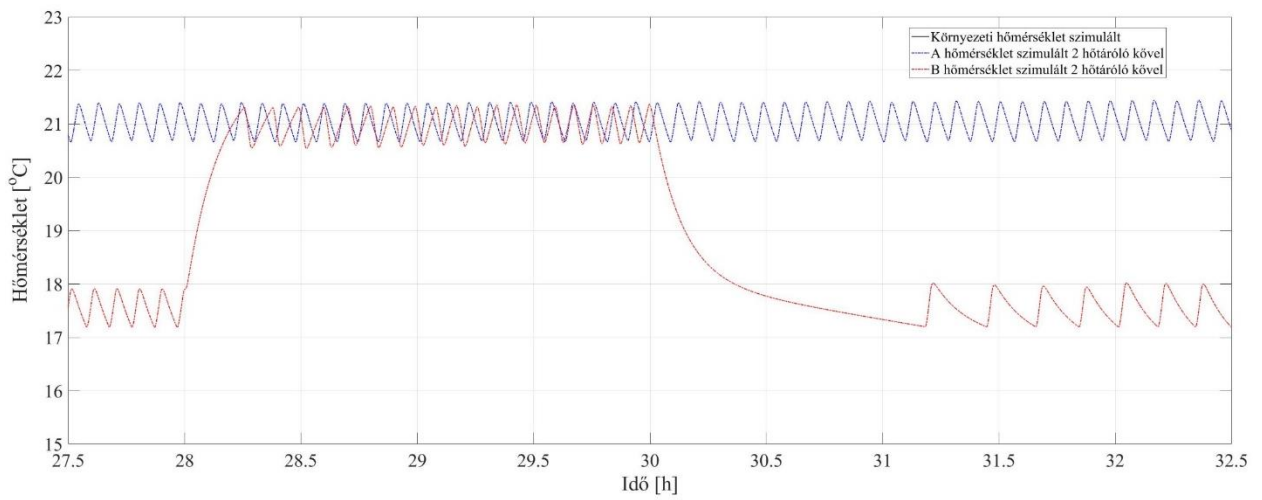
M3.18. ábra B kisminta modell 8 hőtároló kő



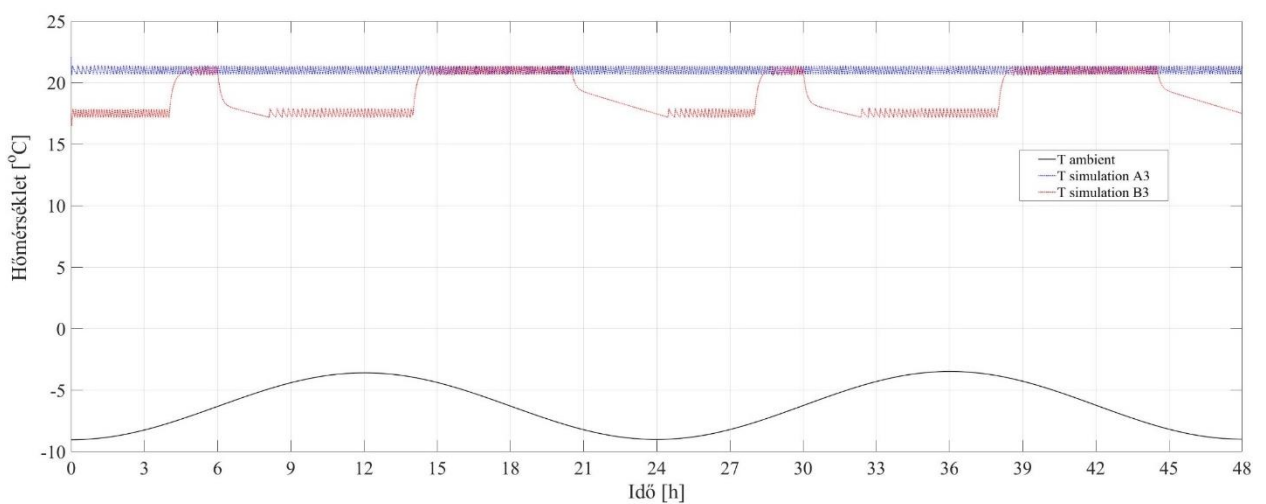
M3.19. ábra C kisminta modell 8 hőtároló kő



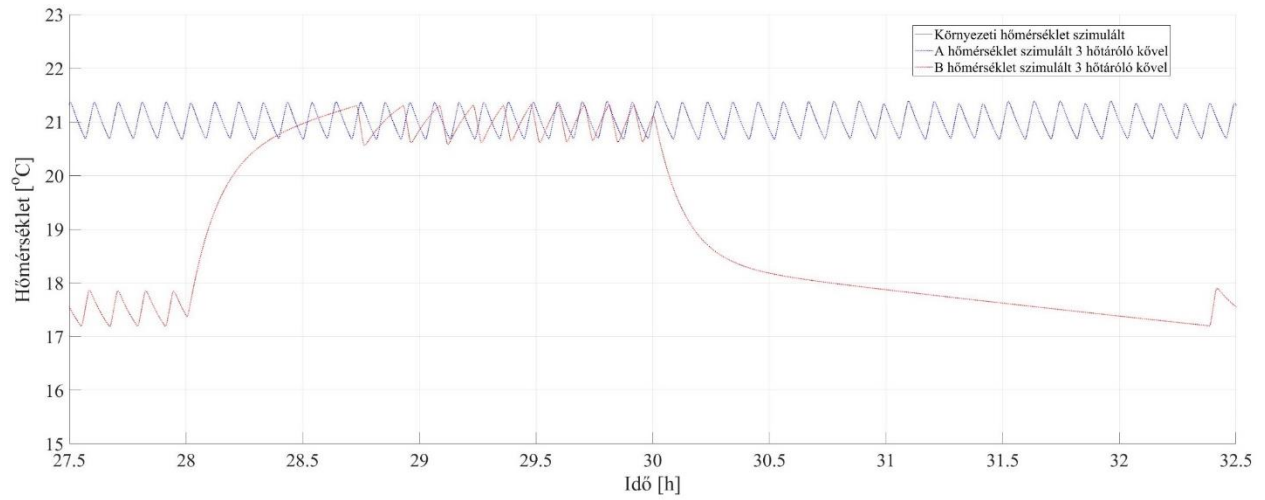
M3.20. ábra A és B kisminta modell hőtároló tömeg szimuláció 2.



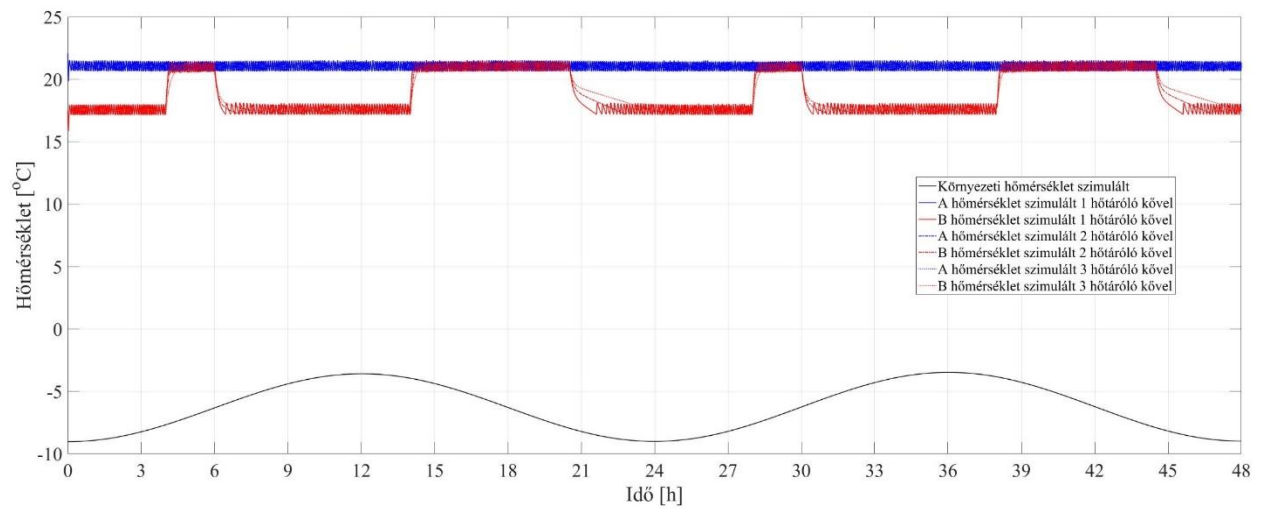
M3.21. ábra A és B kisminta modell hőtároló tömeg szimuláció 2. részlet



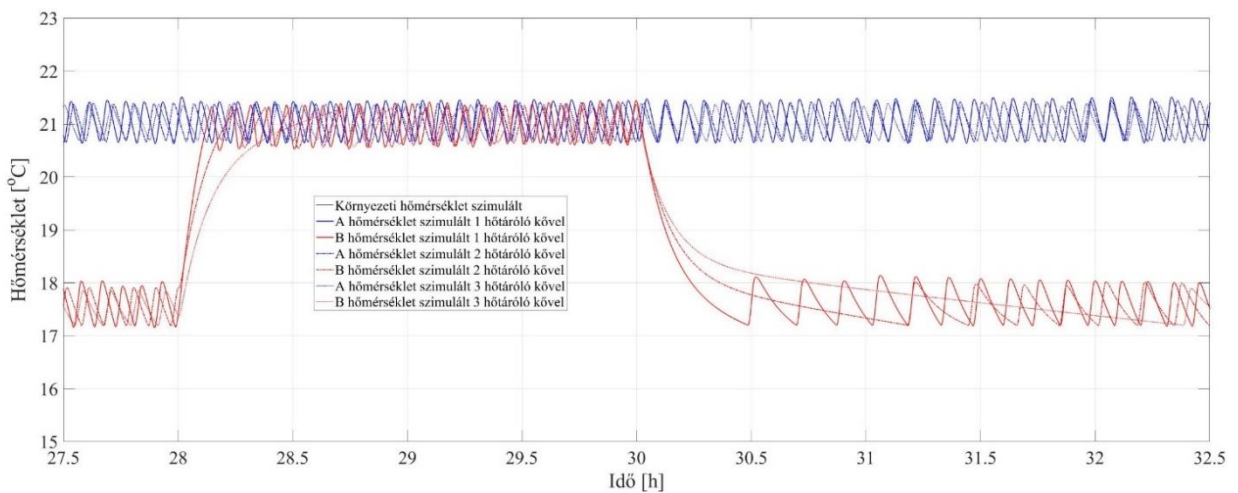
M3.22. ábra A és B kisminta modell hőtároló tömeg szimuláció 3.



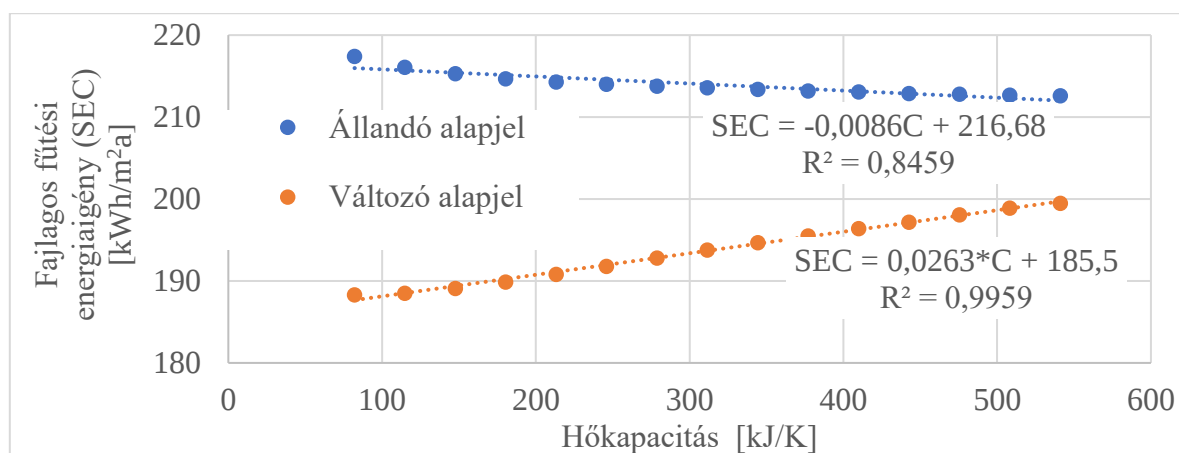
M3.23. ábra A és B kisminta modell hőtároló tömeg szimuláció 3. részlet



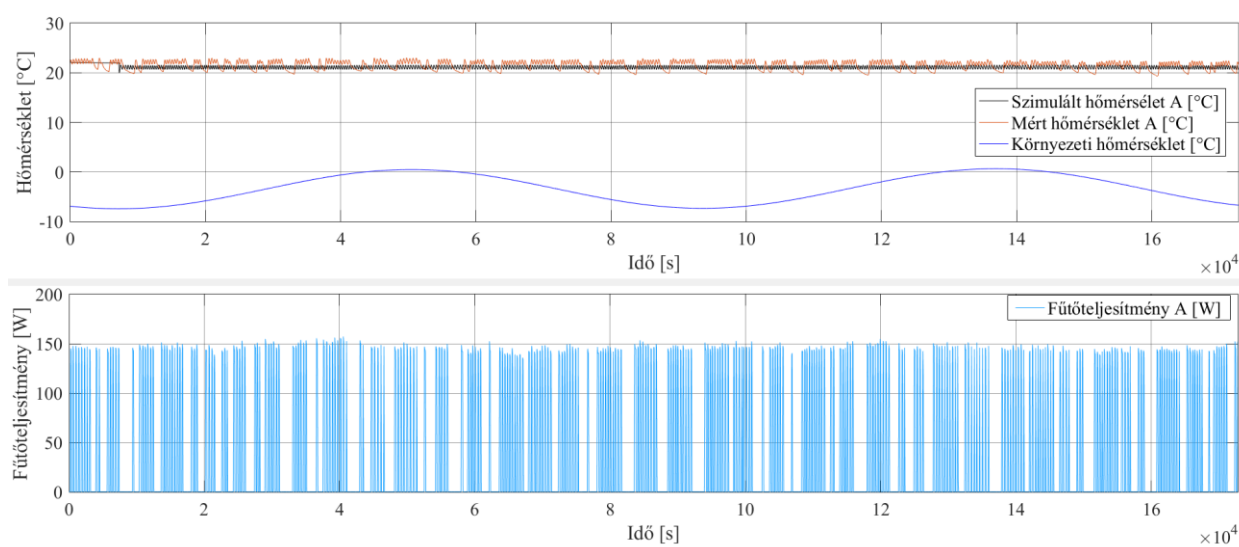
M3.24. ábra A és B kisminta modell hőtároló tömeg szimuláció 1., 2., 3.



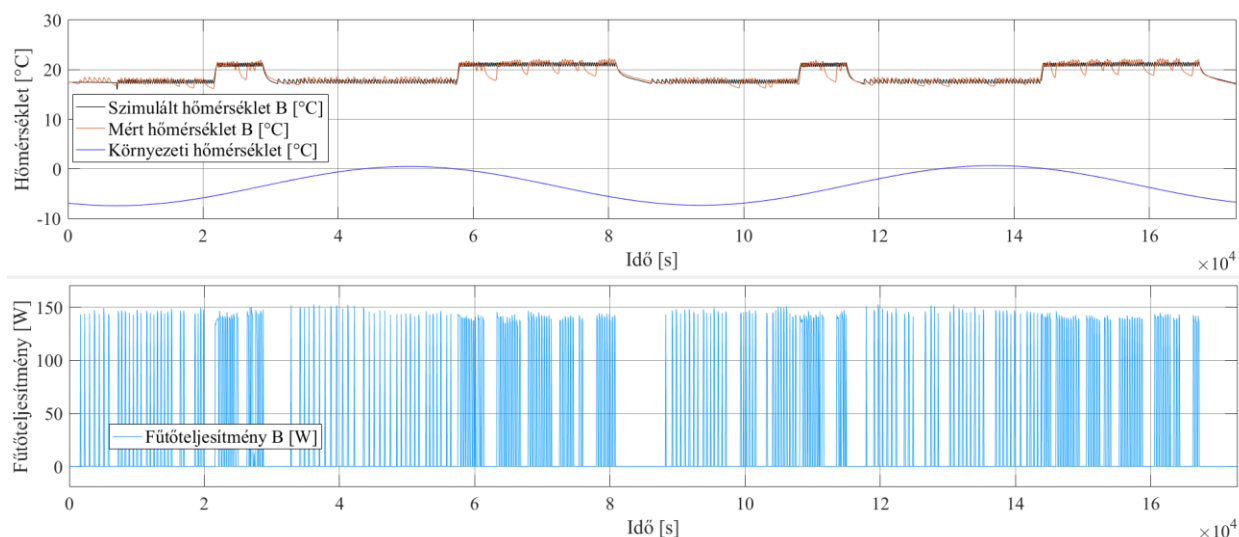
M3.25. ábra A és B kisminta modell hőtároló tömeg szimuláció 1.,2.,3. részlet



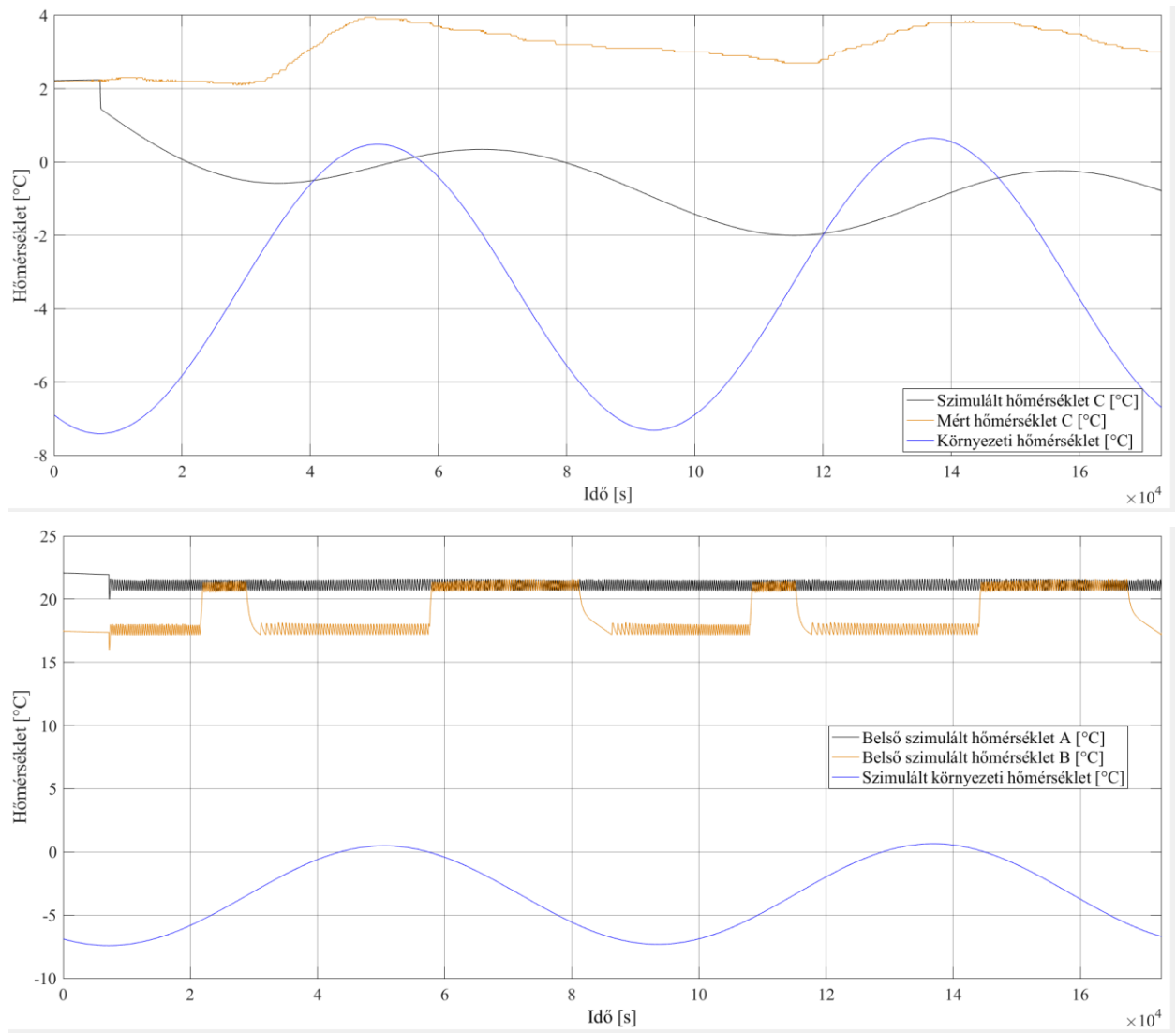
M3.26. ábra kisminta modellek állandó és időben változó alapjel fajlagos fűtési energiaigény különböző hőkapacitások esetén



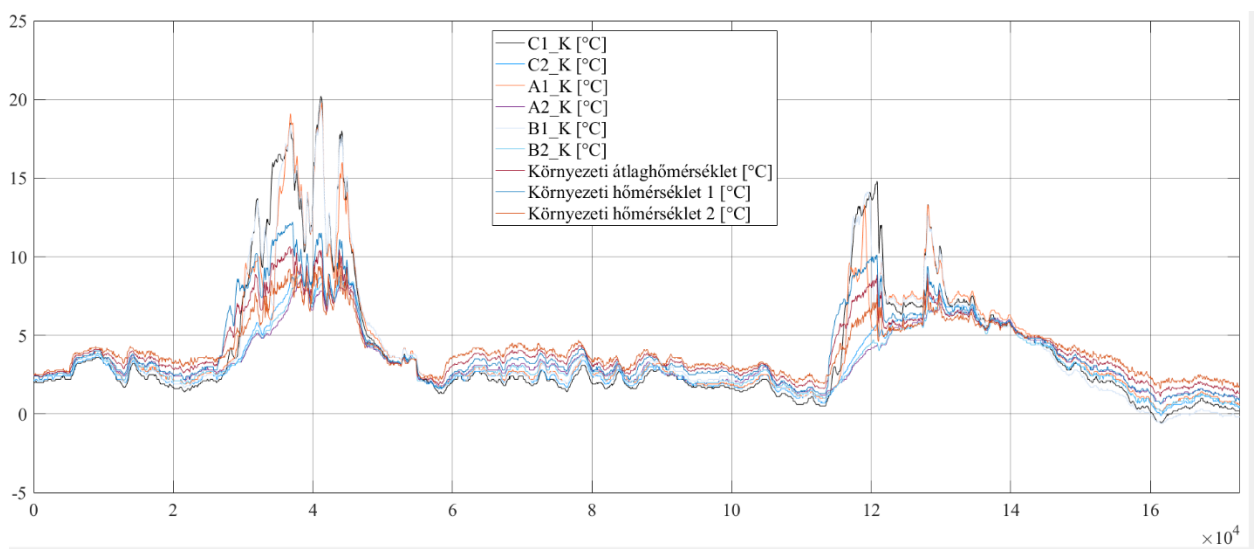
M3.27. ábra A kisminta modell identifikáció 2023.02.01-2023.02.04.



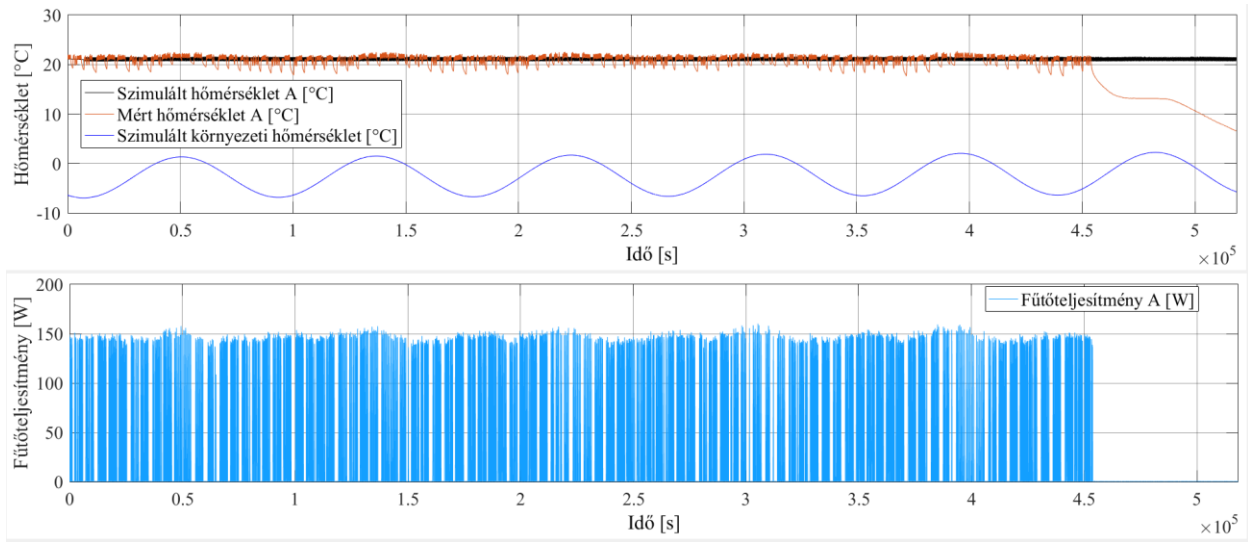
M3.28. ábra B kisminta modell identifikáció 2023.02.01-2023.02.04.



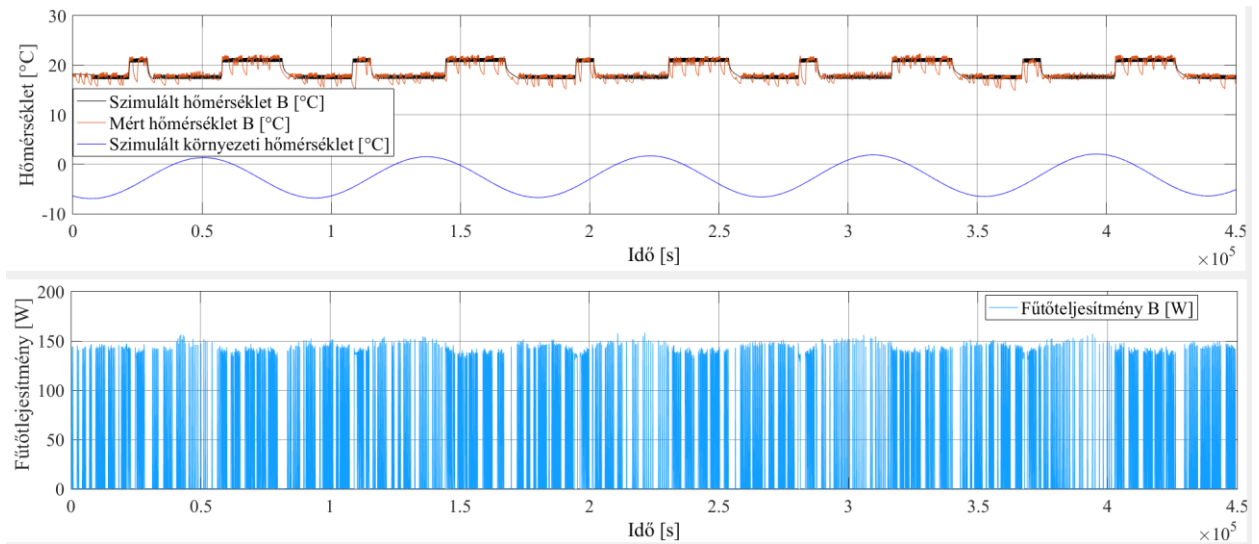
M3.29. ábra C kisminta modell identifikáció 2023.02.01-2023.02.04.



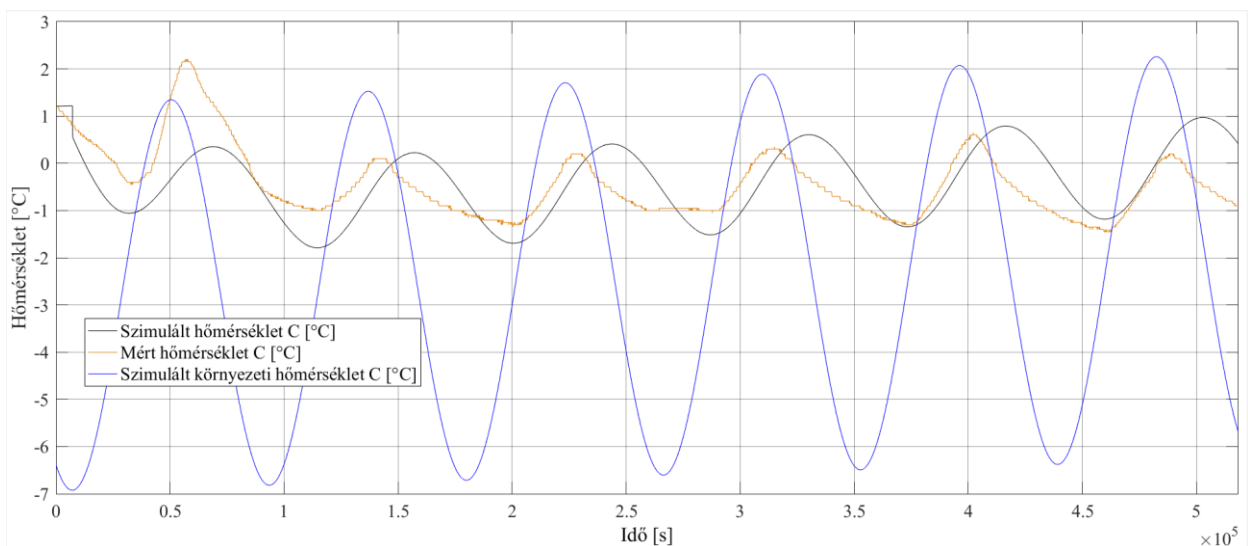
M3.30. ábra kisminta modell identifikáció 2023.02.01-2023.02.04. hőmérsékletek



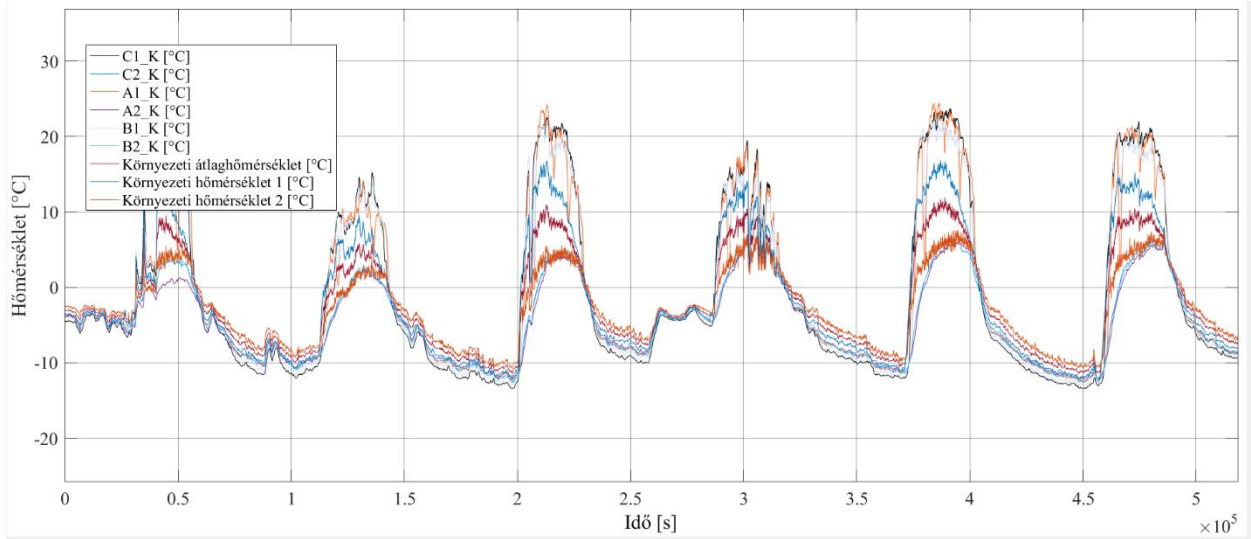
M3.31. ábra A kisminta modell validáció 2023.02.05-2023.02.12.



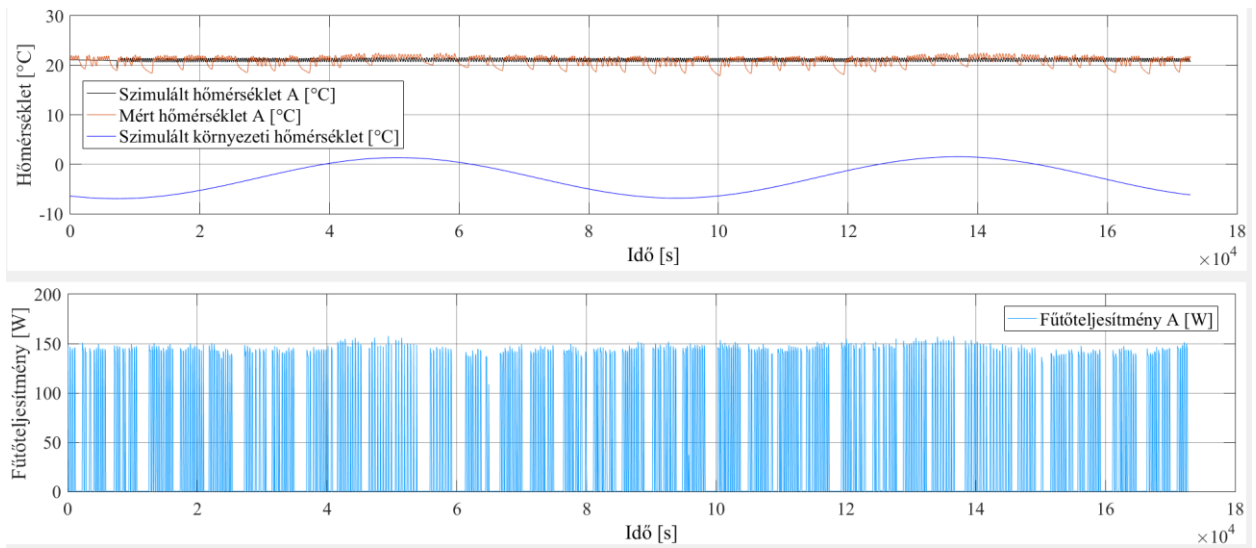
M3.32. ábra B kisminta modell validáció 2023.02.05-2023.02.12.



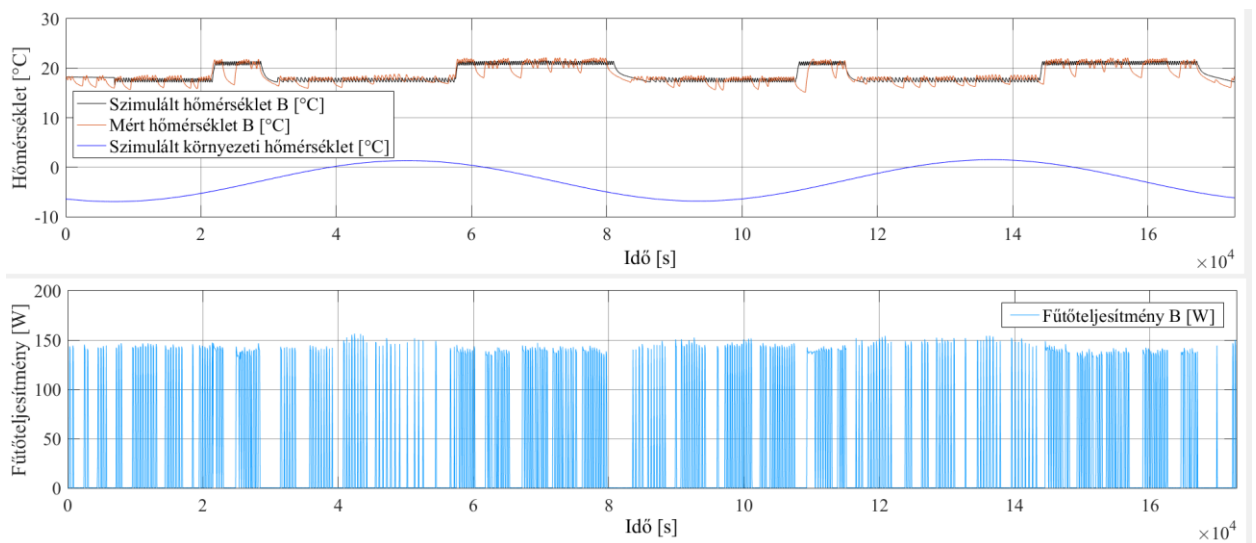
M3.33. ábra C kisminta modell validáció 2023.02.05-2023.02.12.



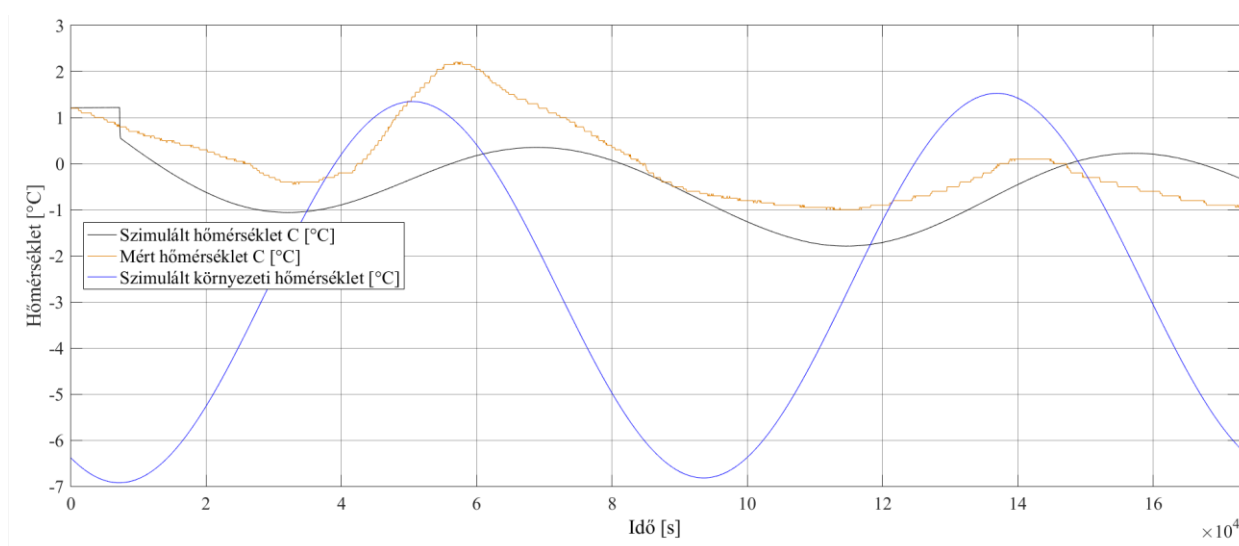
M3.34. ábra kisminta modell validáció hőmérsékletek 2023.02.05-2023.02.12.



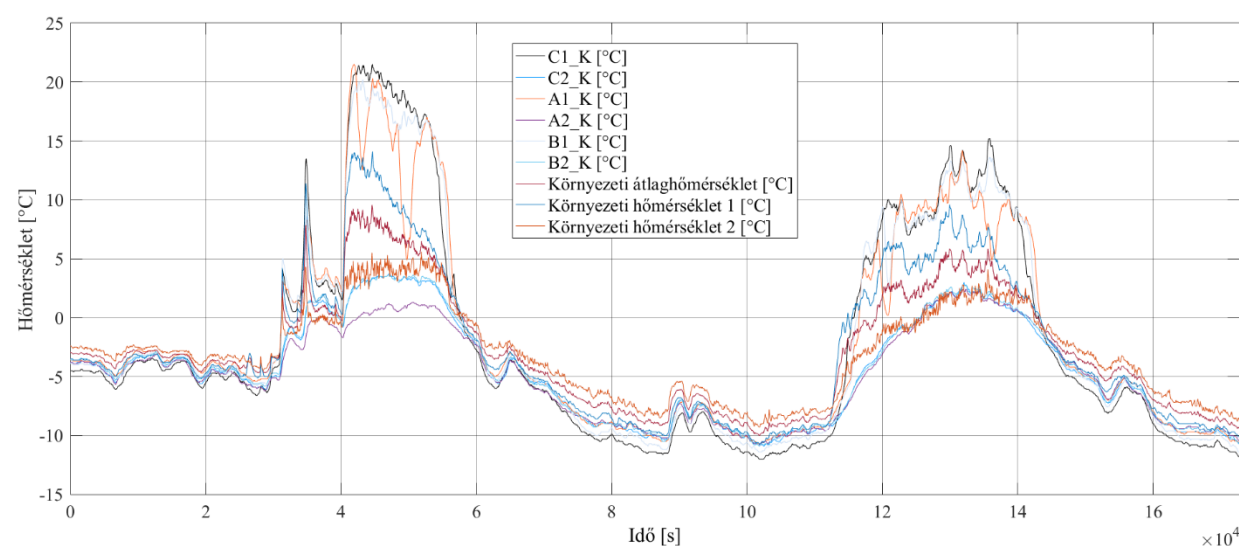
M3.35. ábra A kisminta modell validáció 2023.02.12-2023.02.14.



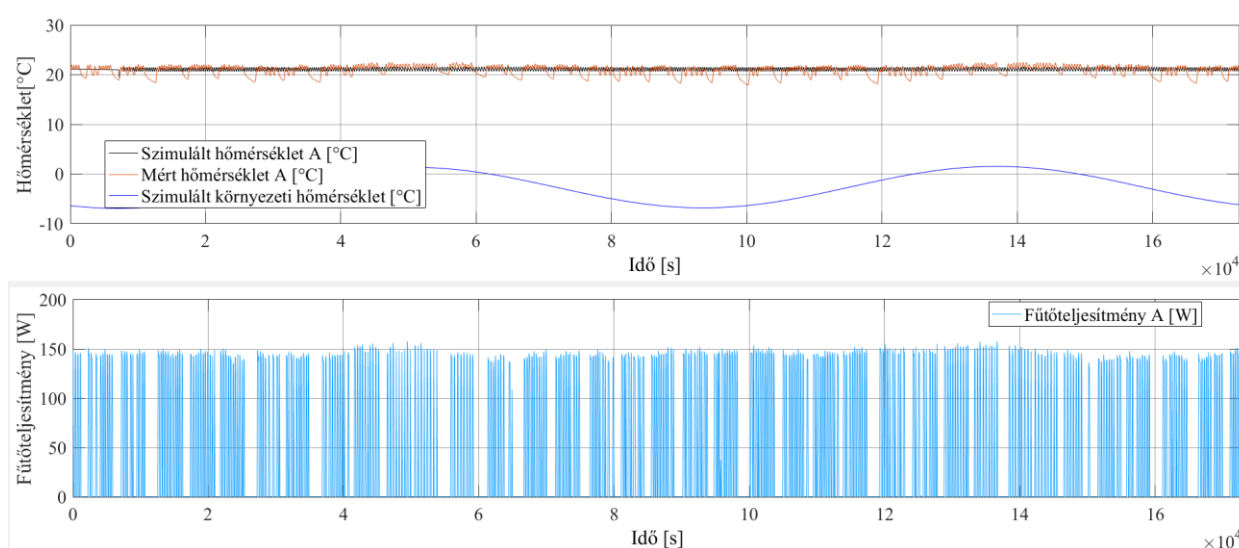
M3.36. ábra B kisminta modell validáció 2023.02.12-2023.02.14.



M3.37. ábra C kisminta modell validáció 2023.02.12-2023.02.14.

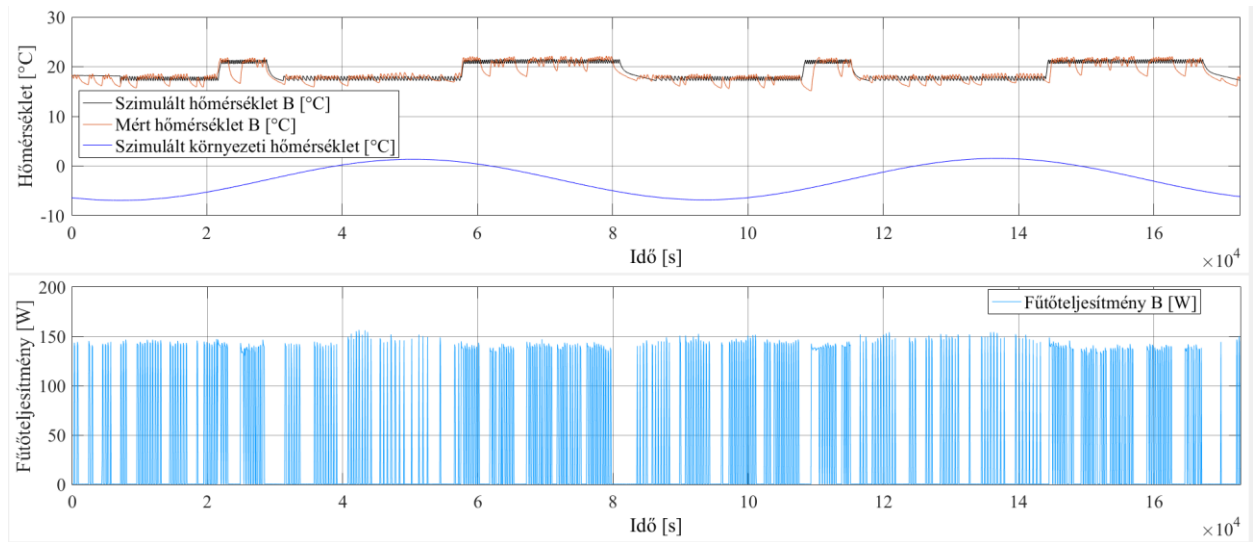


M3.38. ábra kisminta modell validáció hőmérsékletek 2023.02.12-2023.02.14.

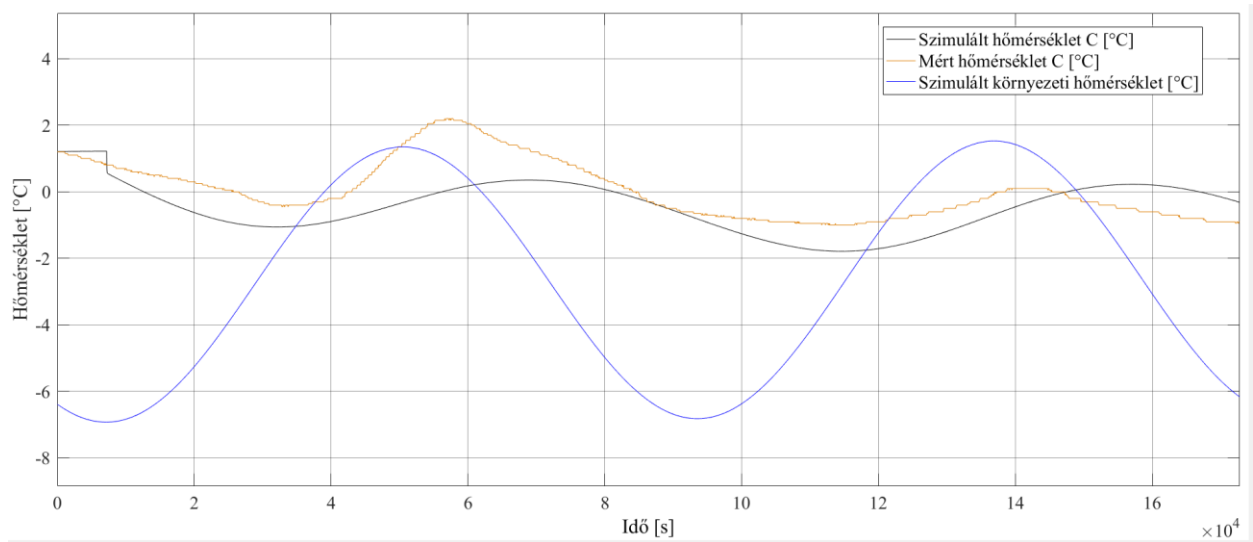


M3.39. ábra A kisminta modell validáció 2023.02.15-2023.02.18.

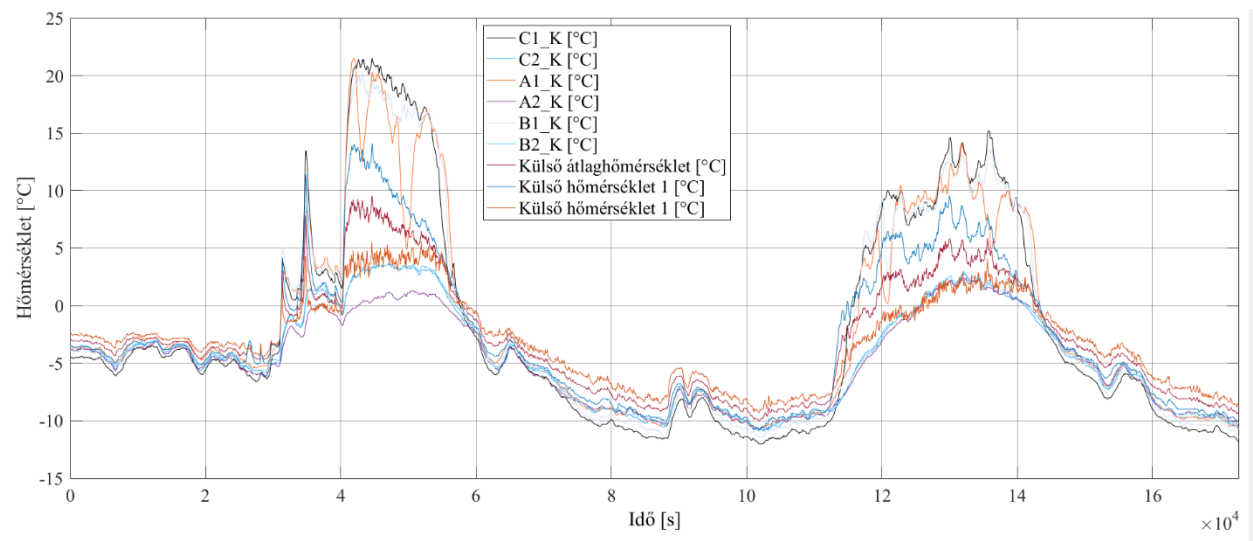
Mellékletek



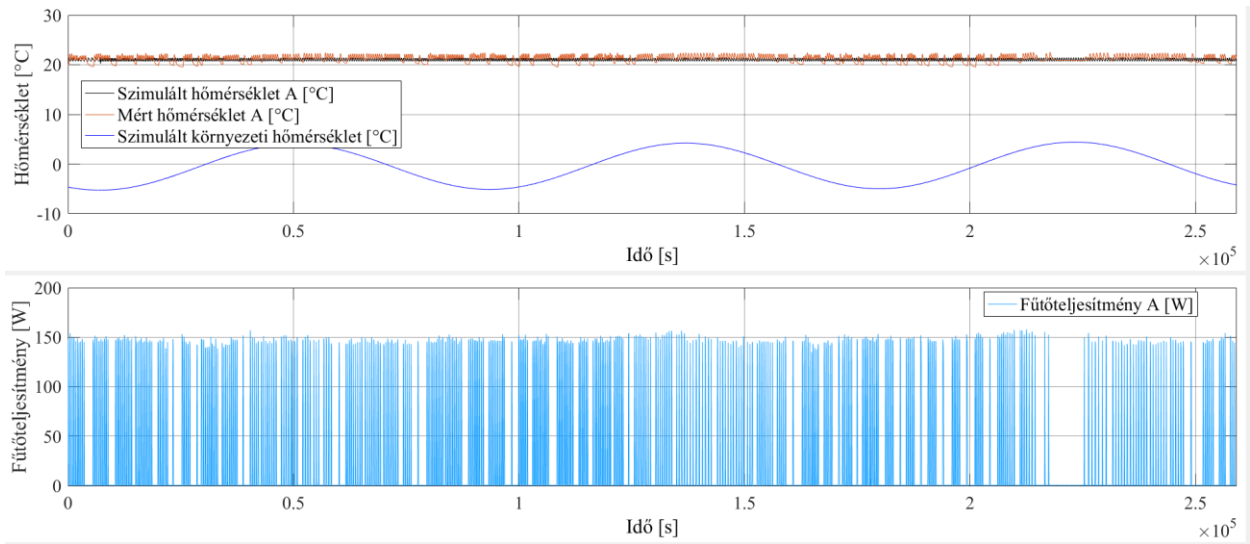
M3.40. ábra B kisminta modell validáció 2023.02.15-2023.02.18.



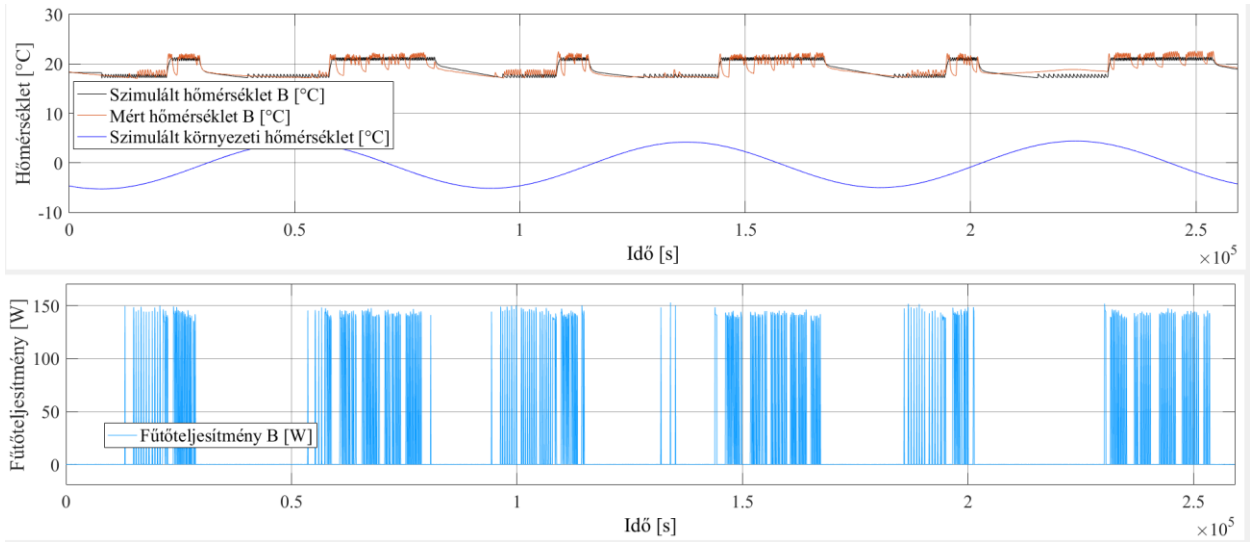
M3.41. ábra C kisminta modell validáció 2023.02.15-2023.02.18.



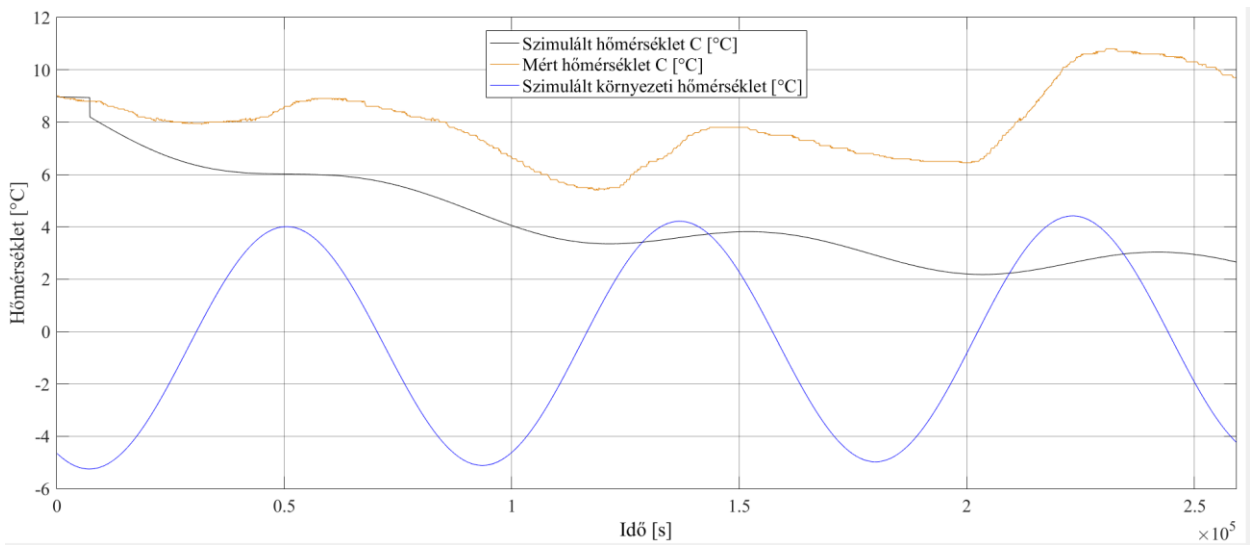
M3.42. ábra kisminta modell validáció hőmérsékletek 2023.02.15-2023.02.18.



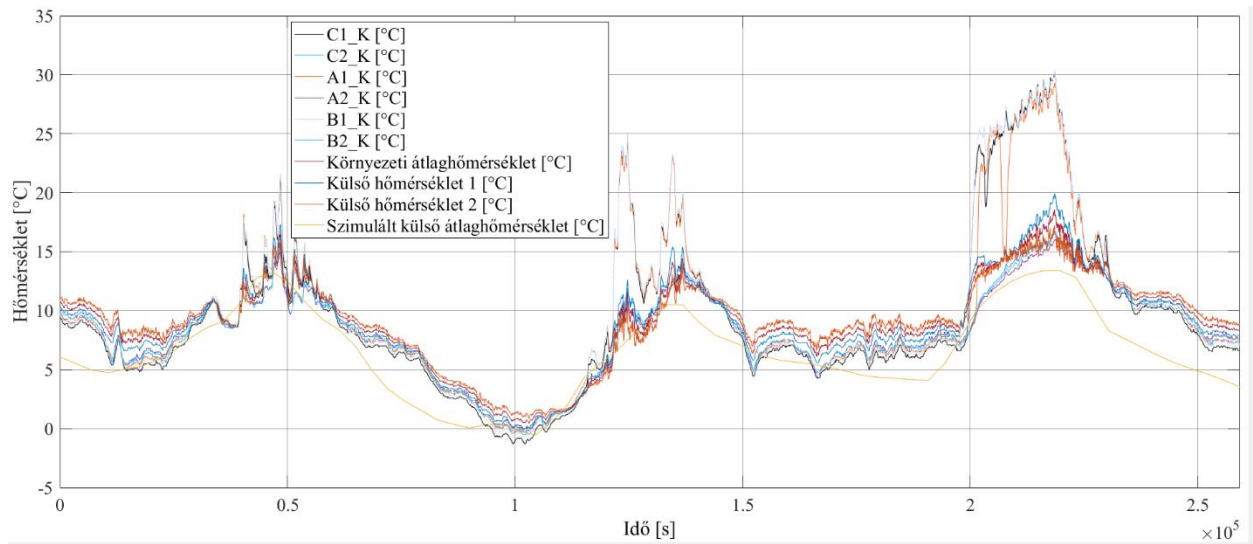
M3.43. ábra A kisminta modell validáció 2023.02.19-2023.02.23.



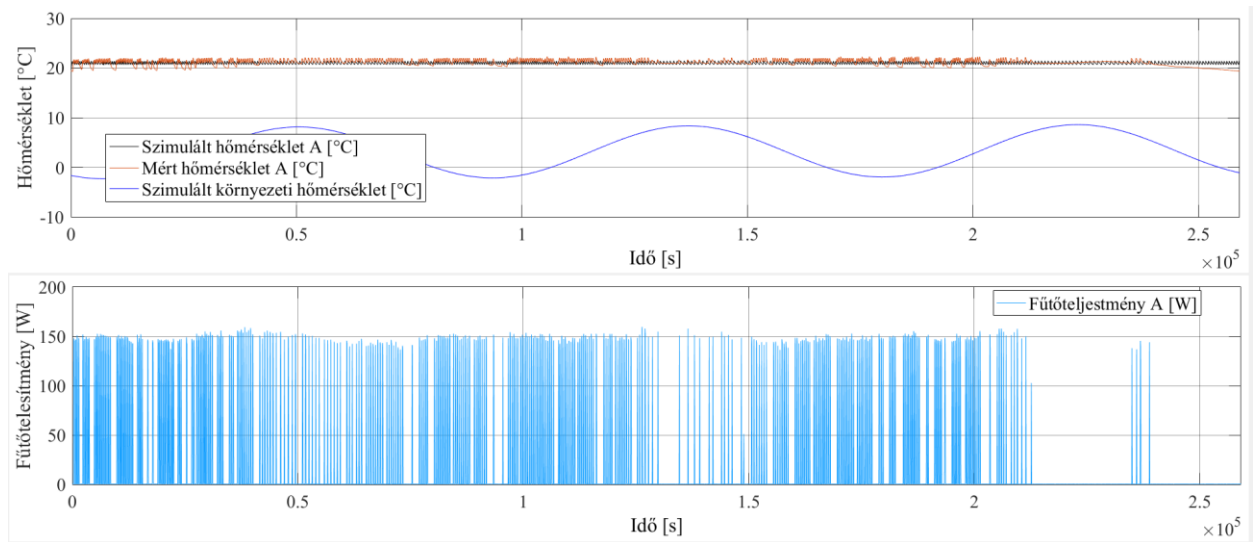
M3.44. ábra B kisminta modell validáció 2023.02.19-2023.02.23.



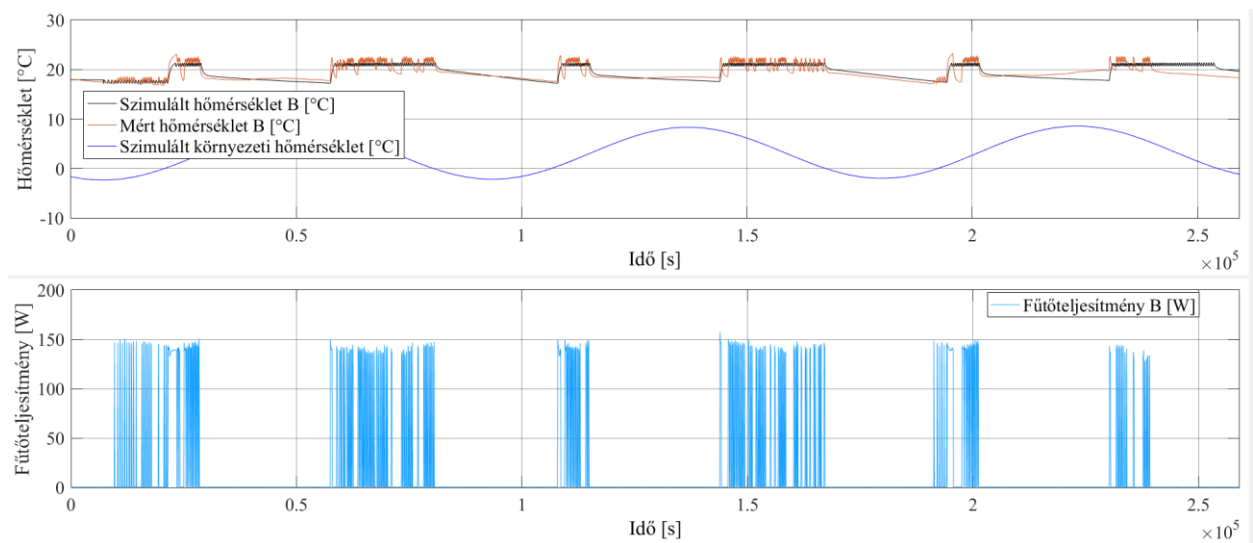
M3.45. ábra C kisminta modell validáció 2023.02.19-2023.02.23.



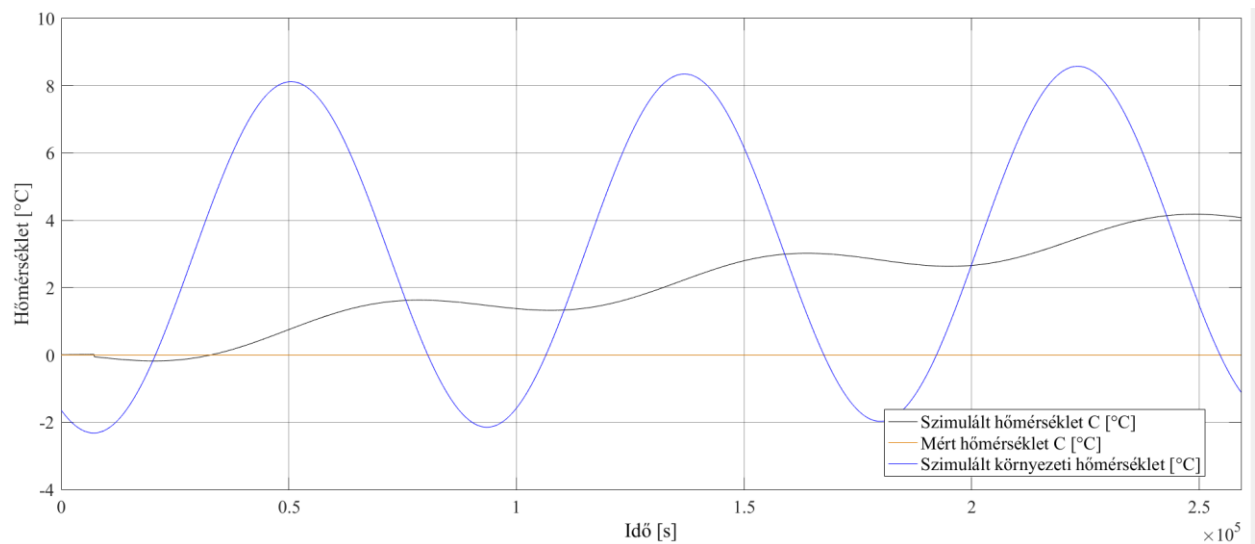
M3.46. ábra kisminta modell validáció hőmérsékletek 2023.02.19-2023.02.23.



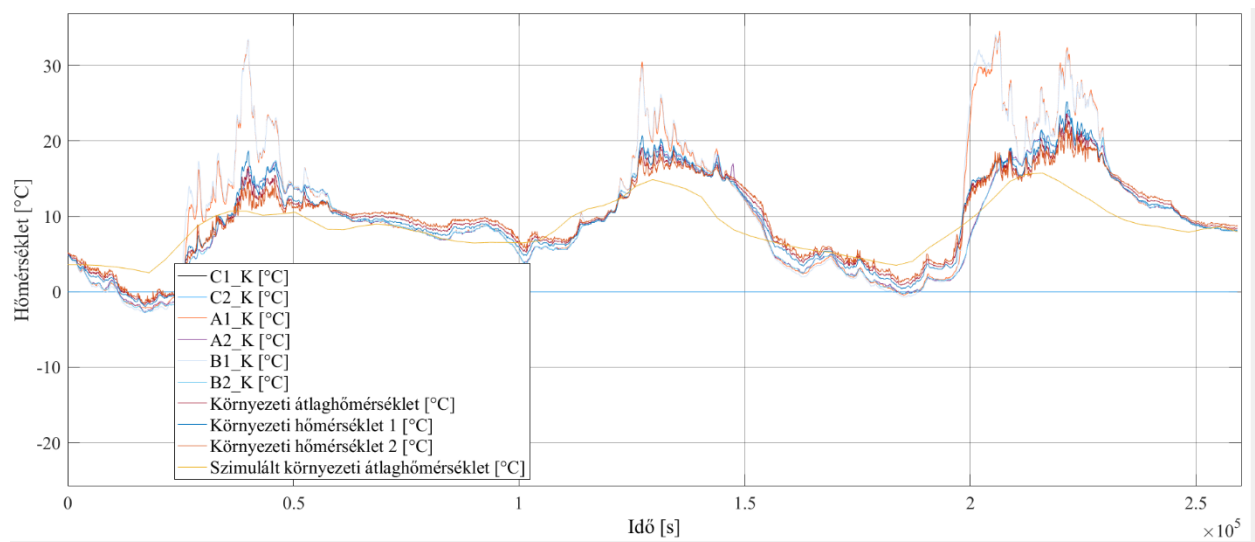
M3.47. ábra A kisminta modell validáció 2023.03.08-2023.03.11.



M3.48. ábra B kisminta modell validáció 2023.03.08-2023.03.11.



M3.49. ábra C kisminta modell validáció 2023.03.08-2023.03.11.

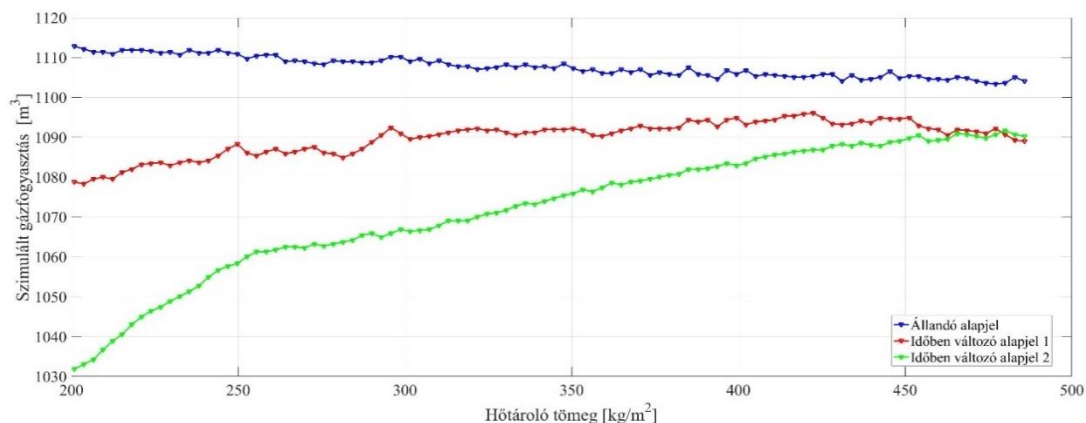


M3.50. ábra kisminta modell validáció hőmérsékletek 2023.03.08-2023.03.11.

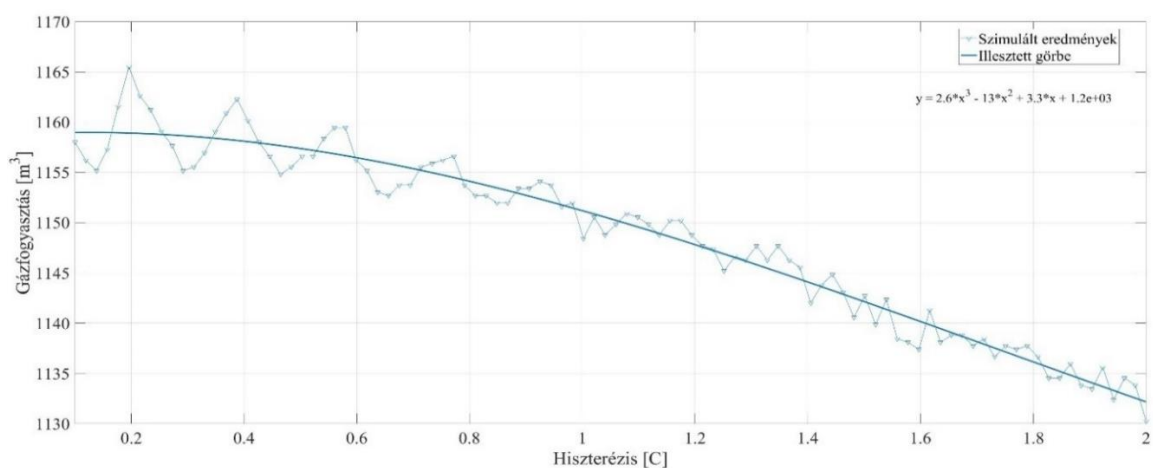
A kisminta modellek további mérési és szimulációs eredményei, kérésre felhő tárhelyen elérhetőek

- Kisminta modell MATLAB modell webview és .m és .txt adatfájlok
- Kisminta modell épületek k1-k5 követelményszintek szerinti szimuláció
- Kisminta modell hőmérsékletmérési adatsorok

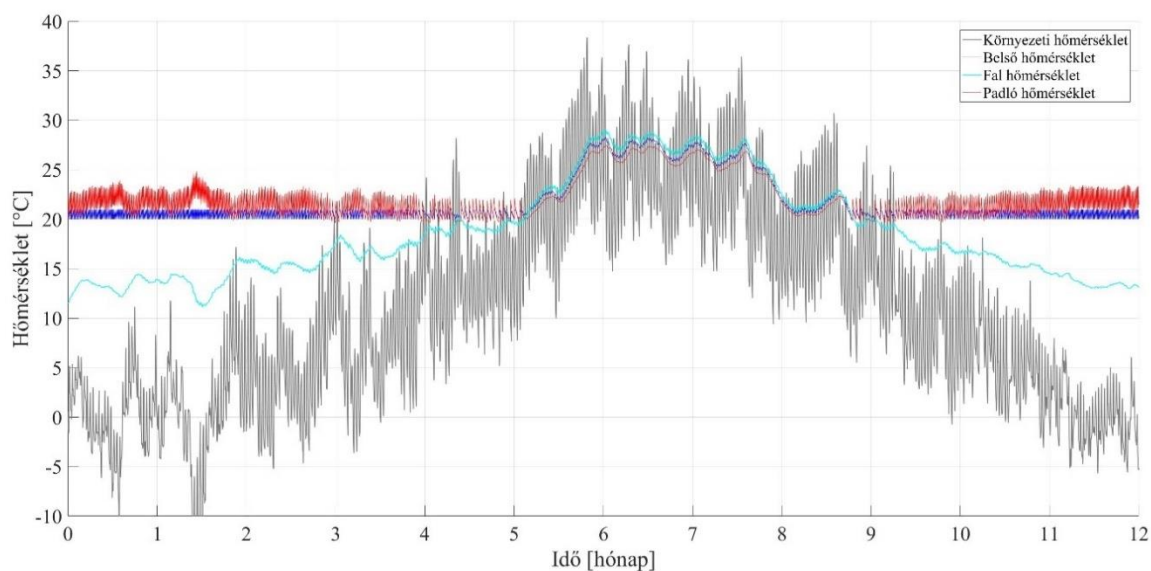
M4. Valós (B2) épület



M4.1. ábra Valós épület (B2) szimulált gázfogyasztása különböző alapjelek és a hőtároló tömeg függvényében



M4.2. ábra B2 épület szimulált gázfogyasztása a hiszterézis függvényében



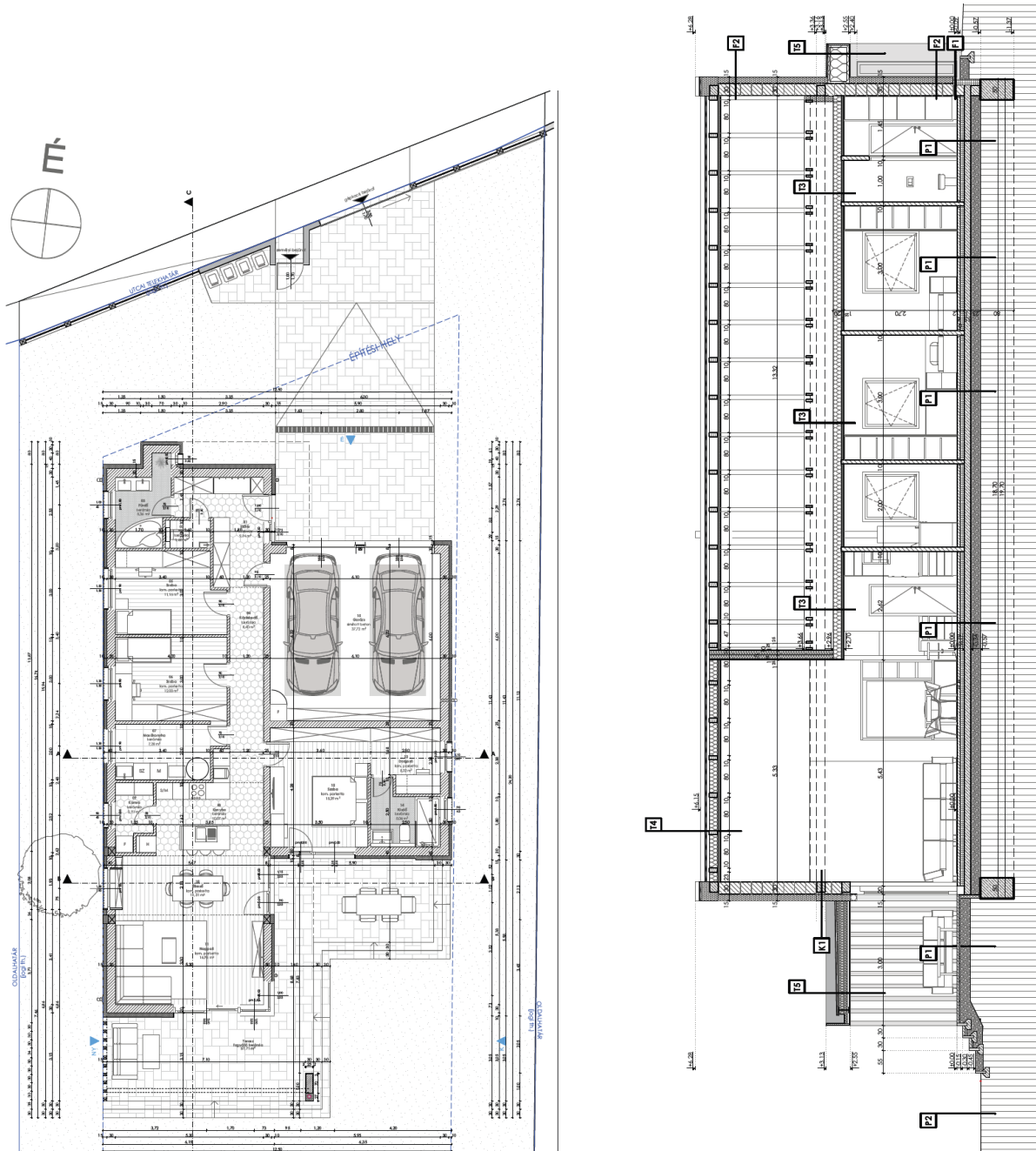
M4.3. ábra Valós épület szimulált hőmérsékletek

A valós épület (B2) további mérési és szimulációs eredményei, kérésre felhő tárhelyen elérhetőek

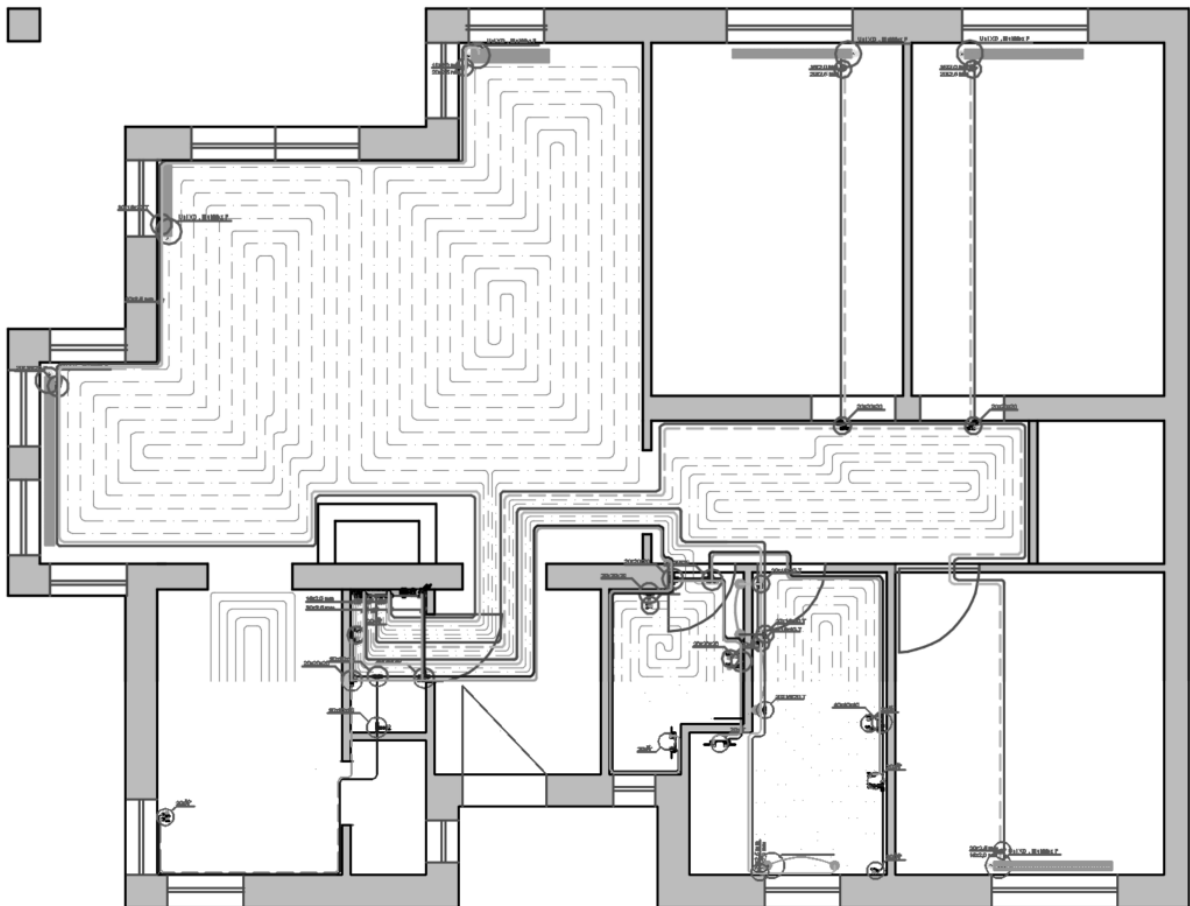
- Részletes modell MATLAB webview és .m és .txt adatfájlok

- Egyszerűsített modell MATLAB webview és .m és .txt adatfájlok
- Hőmérsékletmérési adatsorok

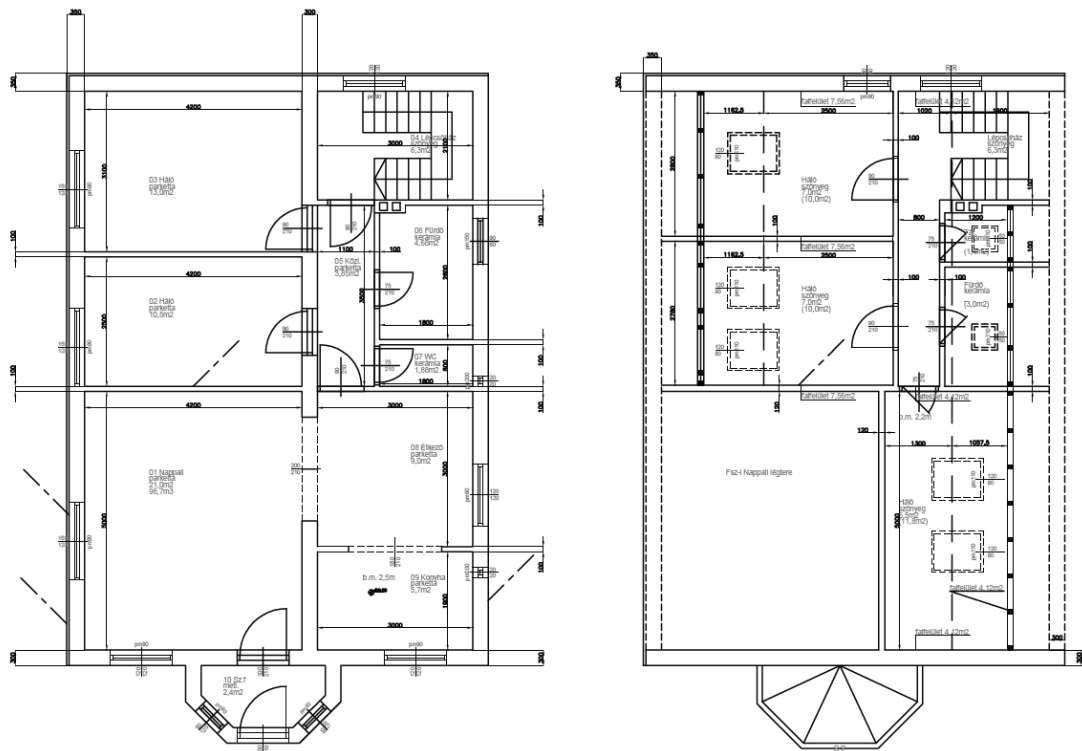
M5. B1-B5 valós épületek



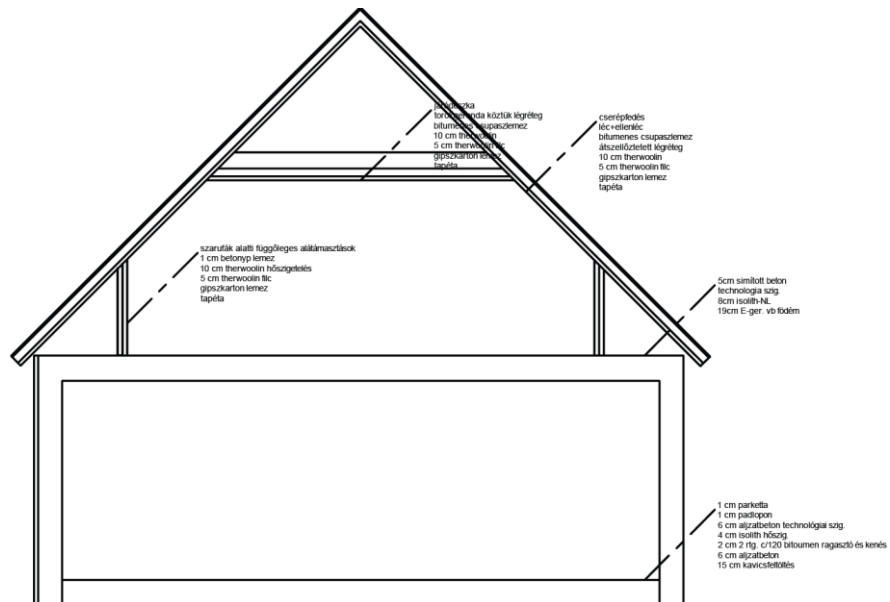
M5.1. ábra B1 épület alaprajza



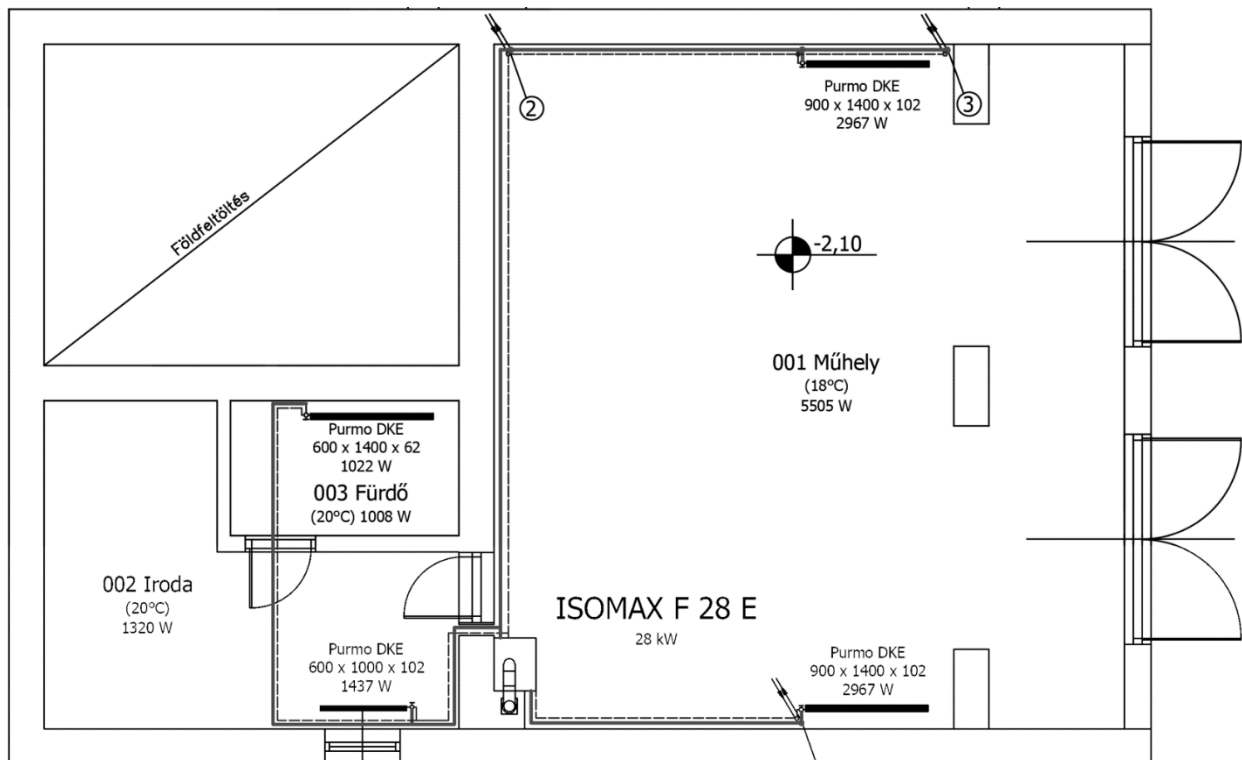
M5.2. ábra B2 épület alaprajz



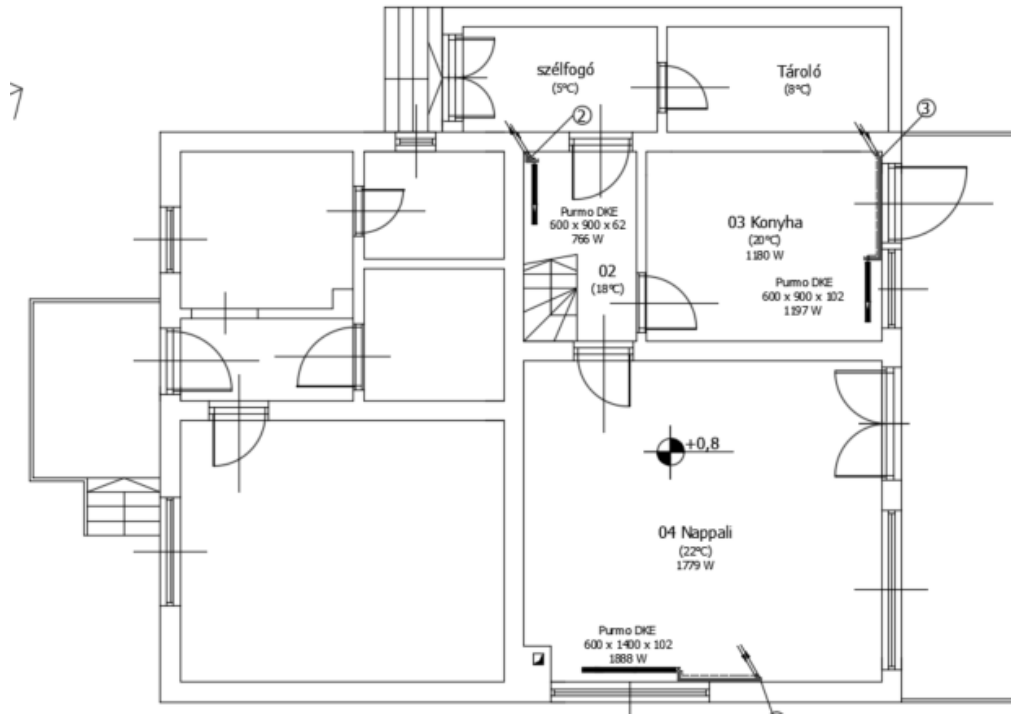
M5.3. ábra B3 épület földszint és emelet alaprajz



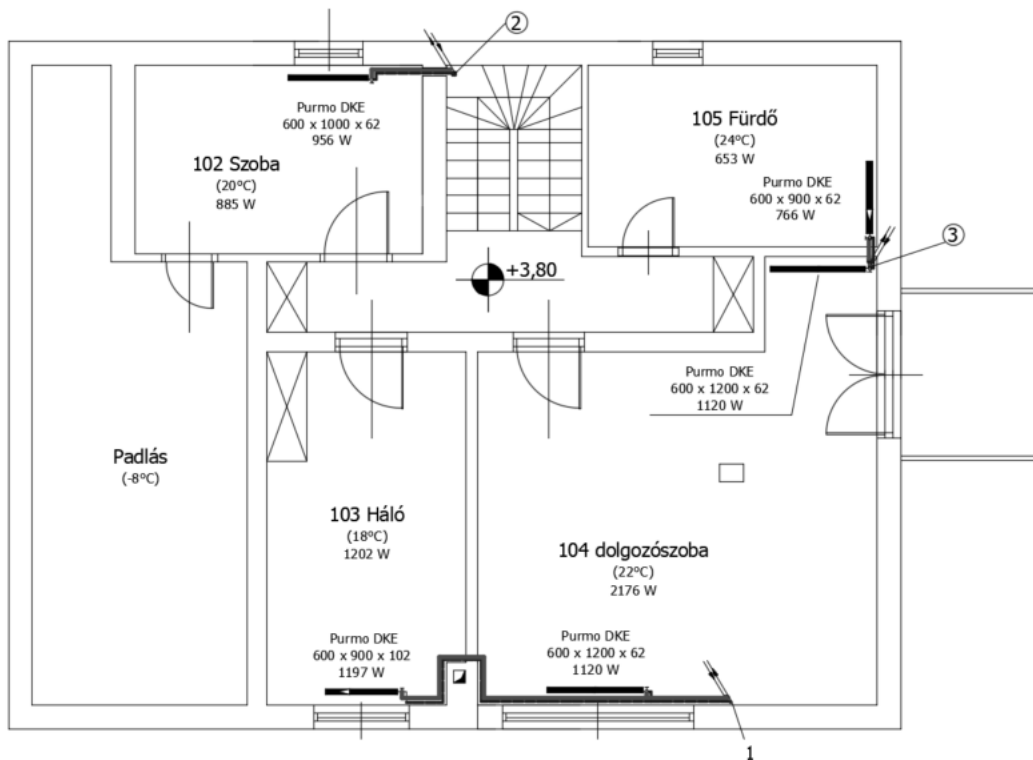
M5.4. ábra B3 épület metszet



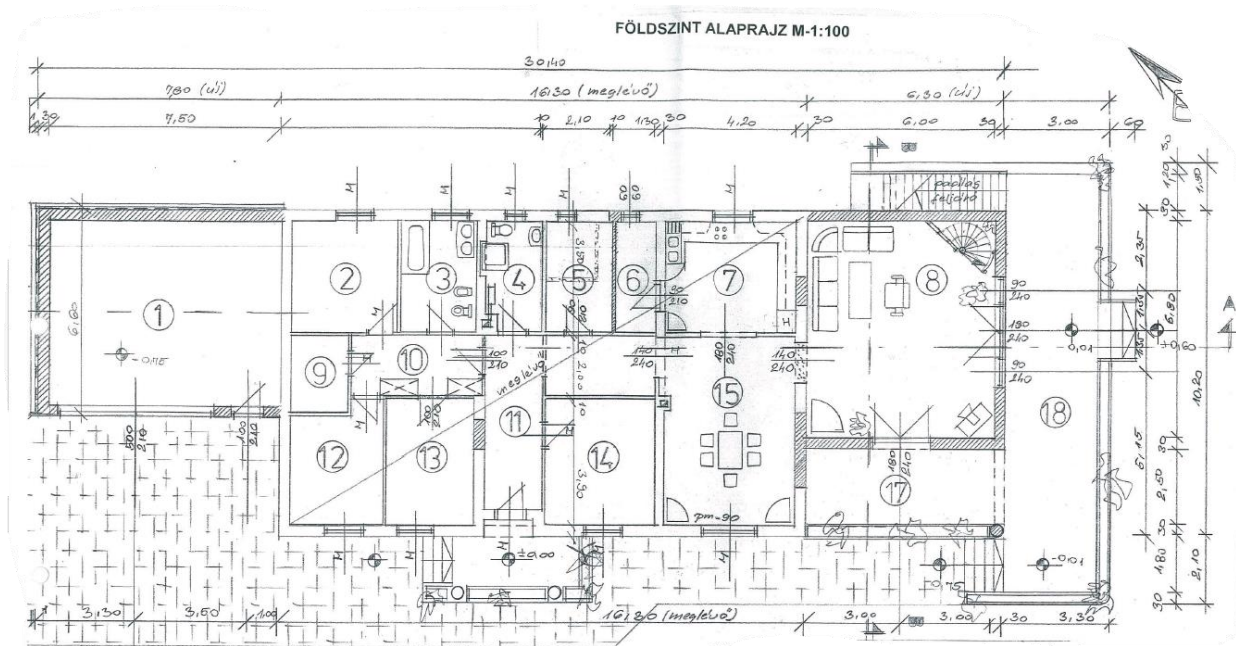
M5.5. ábra B4 épület pincszint



M5.6. ábra B4 épület földszint



M5.7. ábra B4 épület tetőtér



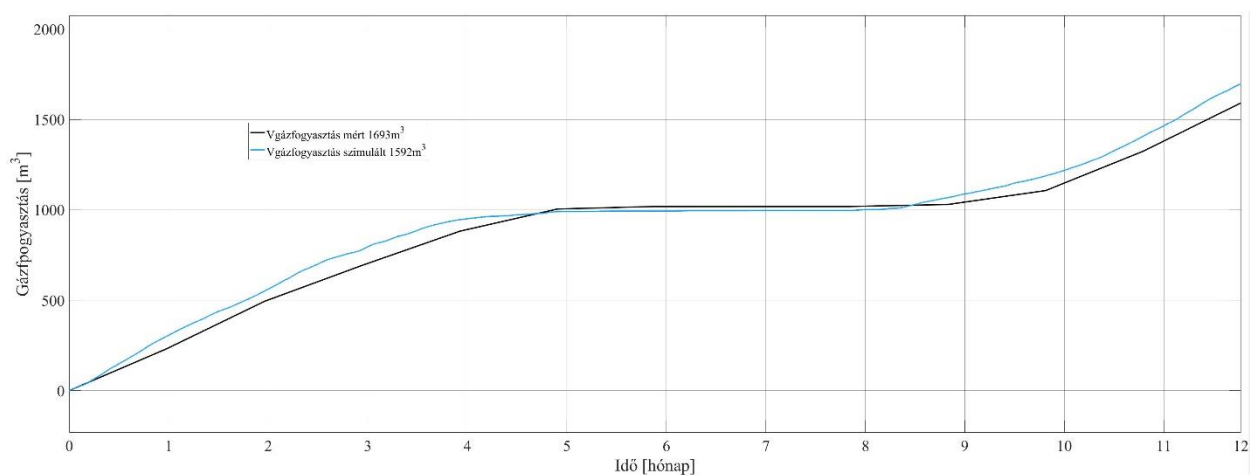
M5.8. ábra B5 épület alaprajz

M5.1. táblázat Gázfogyasztási adatok validáláshoz

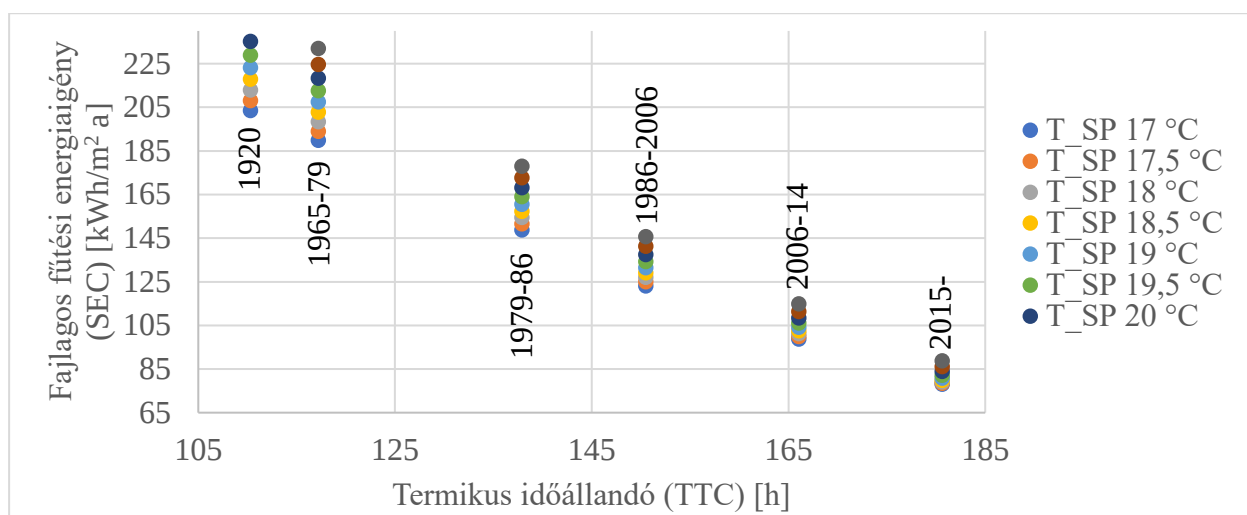
B1 Gyenesdiás 2021.08.20-2022.08.22.		B2 Gödöllő 2021 év		B3 Érd 2023 év	
Gázfogyasztás m ³	Leolvasás dátuma	Gázfogyasztás m ³	Leolvasás dátuma	Gázfogyasztás m ³	Leolvasás dátuma
0	2021.08.20	236	2021.01.01	273	2023.01.01
87	2021.10.20	391	2021.02.01	559	2023.02.01
311	2021.11.19	531	2021.03.01	755	2023.03.01
621	2022.01.01	640	2021.04.01	940	2023.04.01
853,5	2022.01.20	692	2021.05.01	1046	2023.05.01
1111,5	2022.02.20	706	2021.06.01	1082	2023.06.01
1345,5	2022.03.20	708	2021.07.01	1108	2023.07.01
1512,5	2022.04.20	713	2021.08.01	1134	2023.08.01
1565,5	2022.05.20	733	2021.09.01	1180	2023.09.01
1584,5	2022.06.20	817	2021.10.01	1249	2023.10.01
1621,5	2022.08.22	974	2021.11.01	1420	2023.11.01
		1148	2021.12.01.	1685	2023.12.01.

M5.2. táblázat Gázfogyasztási adatok validáláshoz

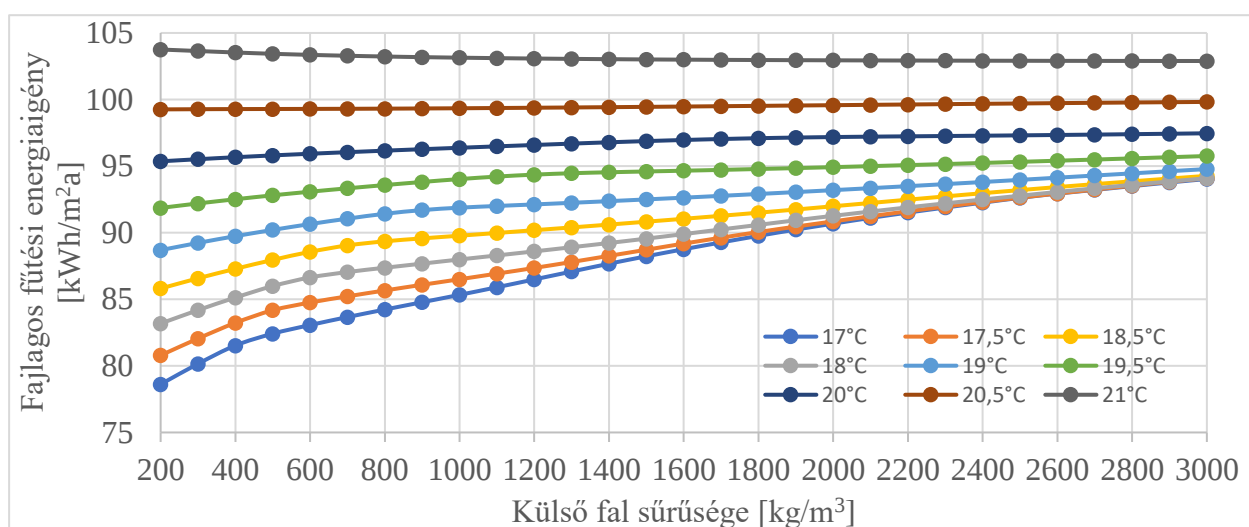
B4 Budapest 2022 év		B5 Gödöllő 2023 év	
Gázfogyasztás m ³	Leolvasás dátuma	Gázfogyasztás m ³	Leolvasás dátuma
897	2022.01.07	250	2023.01.01
2377	2022.01.016	531	2023.02.01
4285	2022.01.27	706	2023.03.01
6346	2022.02.06	860	2023.04.01
7538	2022.02.15	901	2023.05.01
8459	2022.02.27	920	2023.06.01
10293	2022.03.10	946	2023.07.01
11320	2022.04.03	966	2023.08.01
13485	2022.04.12	979	2023.09.01
14270	2022.05.09	1000	2023.10.01
14870	2022.06.06	1134	2023.11.01
15021	2022.09.10.	1363	2023.12.01.
18043	2022.10.11.		
19137	2022.10.27.		
20884	2022.11.11.		
22198	2022.11.26.		
23787	2022.12.06.		
24851	2022.12.15.		
26153	2022.12.26.		



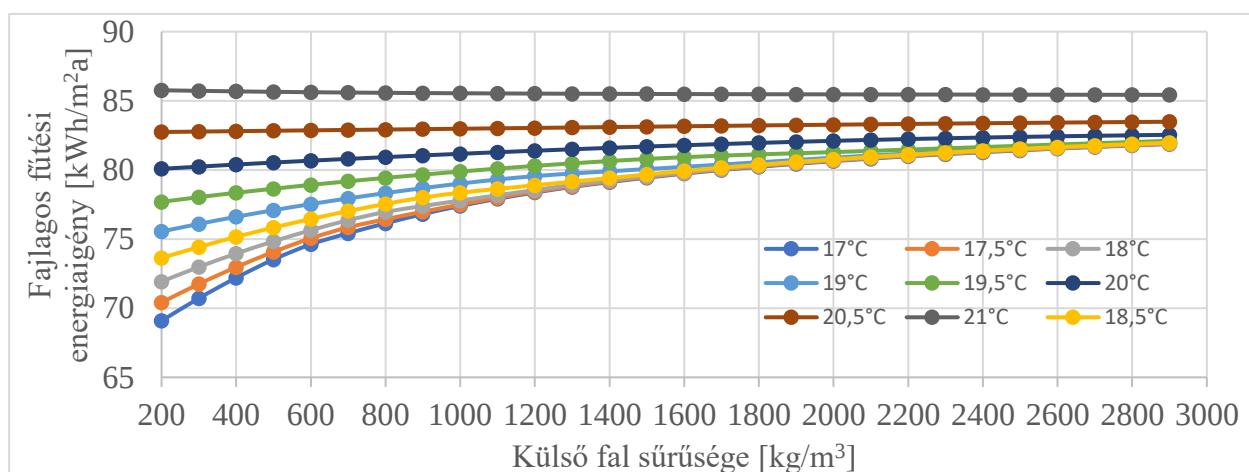
M5.9. ábra B3 épület mért és szimulált gázfogyasztás 2022 év



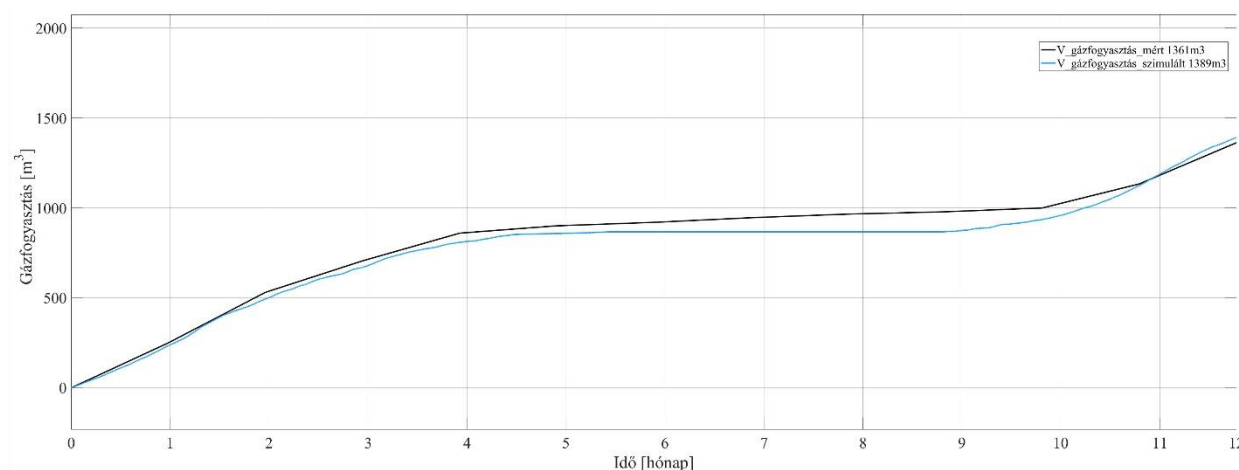
M5.10. ábra B5 épület szimulált eredmények adott építési időszak követelményértékei alapján



M5.11. ábra B1 épület fal sűrűségének hatása a fajlagos fűtési energiaigényre különböző T_SP hőmérséklet alapjelek mellett

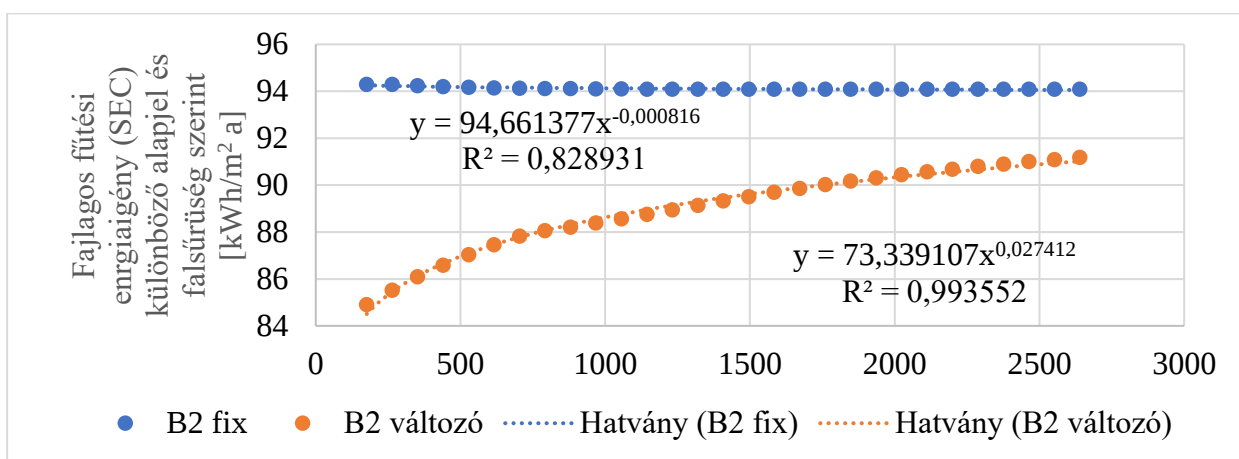


M5.12. ábra B5 épület fal sűrűségének hatása a fajlagos fűtési energiaigényre különböző T_SP hőmérséklet alapjelek mellett

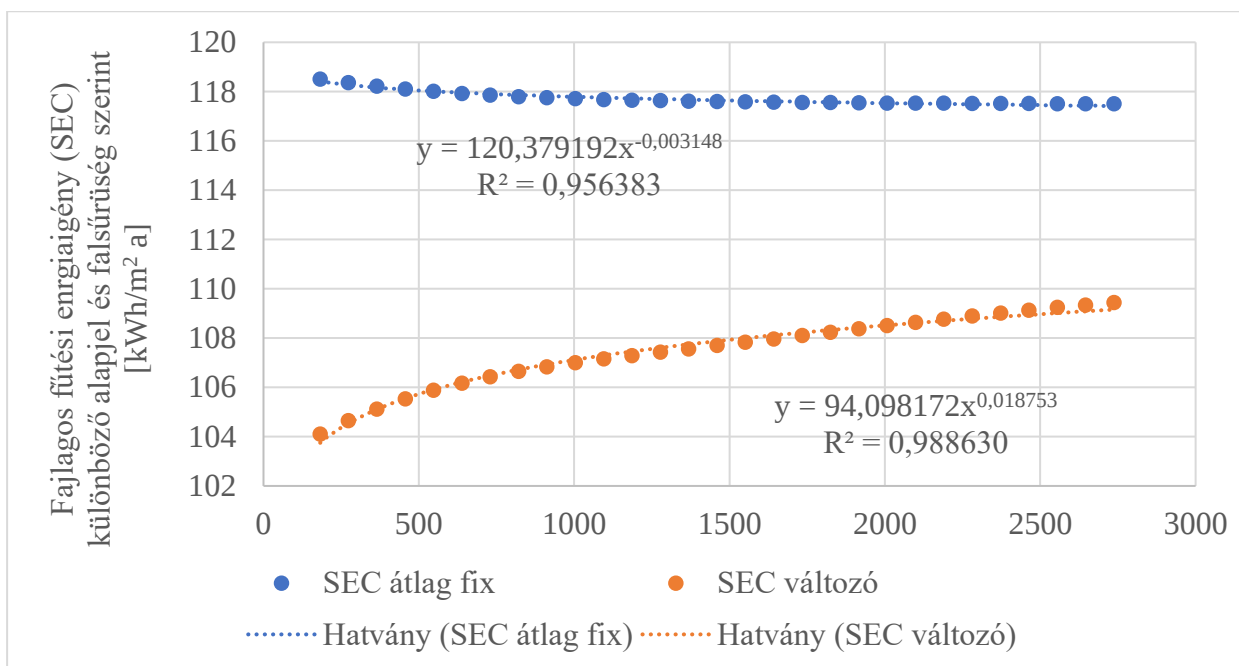


M5.13. ábra B5 épület 2023 mért és szimulált gázfogyasztások

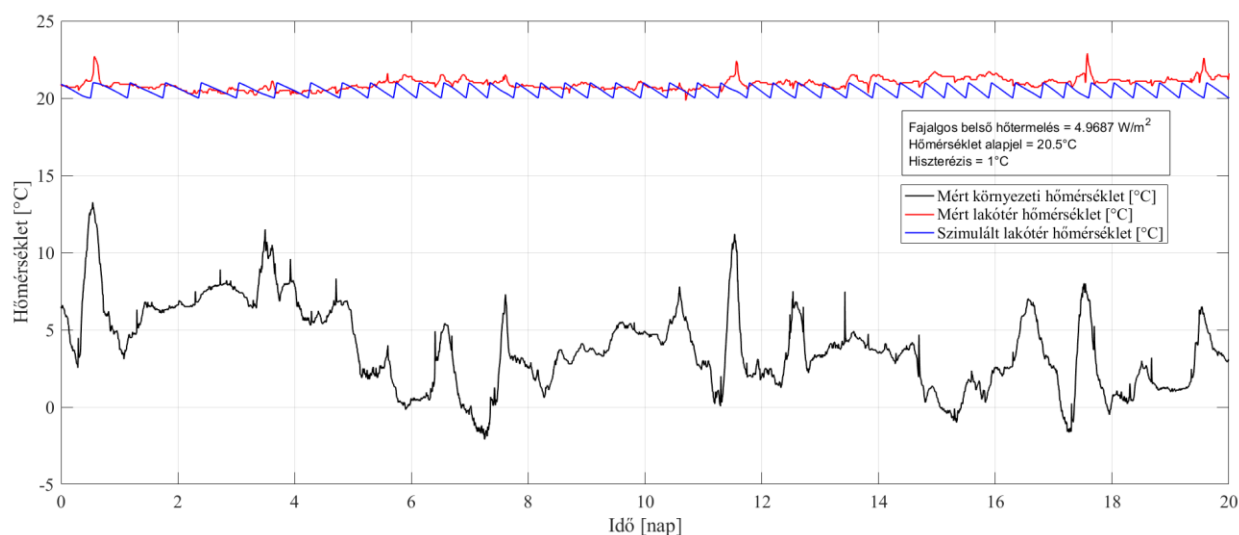
Az épületek további ábrái és adatai tárhelyre feltöltve érhetőek el.



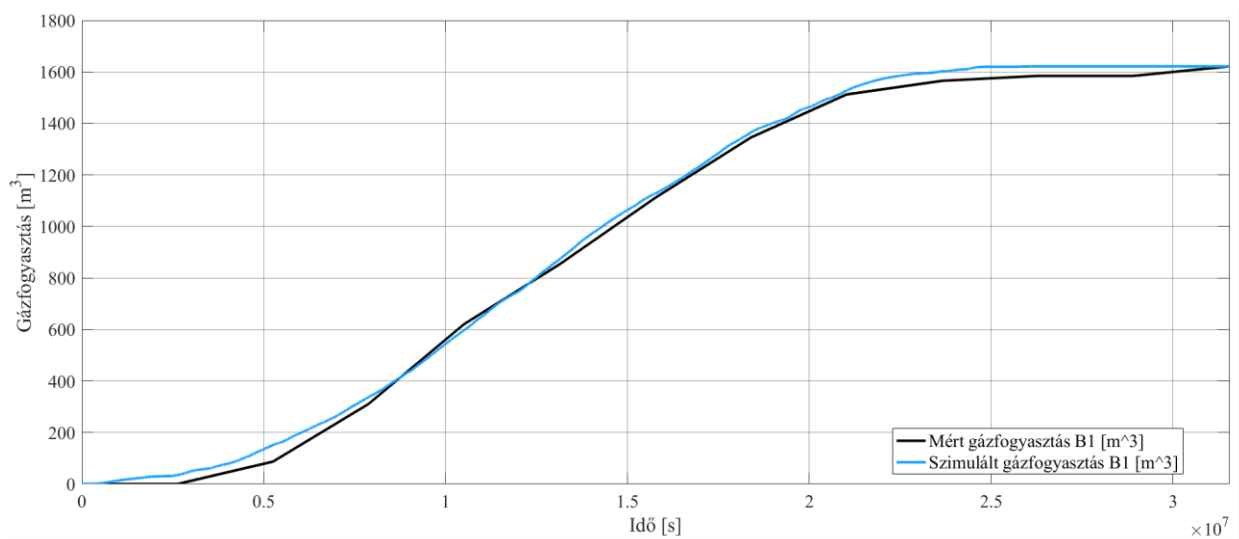
M5.14. ábra B2 épület szabályozási mód és falsűrűség változásának hatása



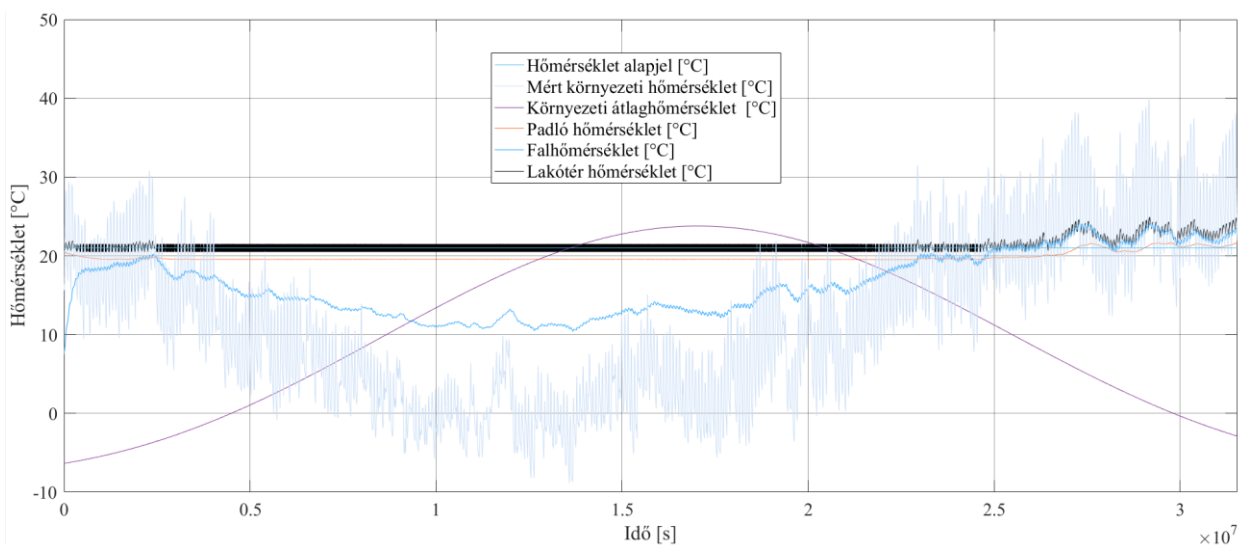
M5.15. ábra Átlagértékek B1-B5 épületek szabályozási mód és falsűrűség változásának hatása



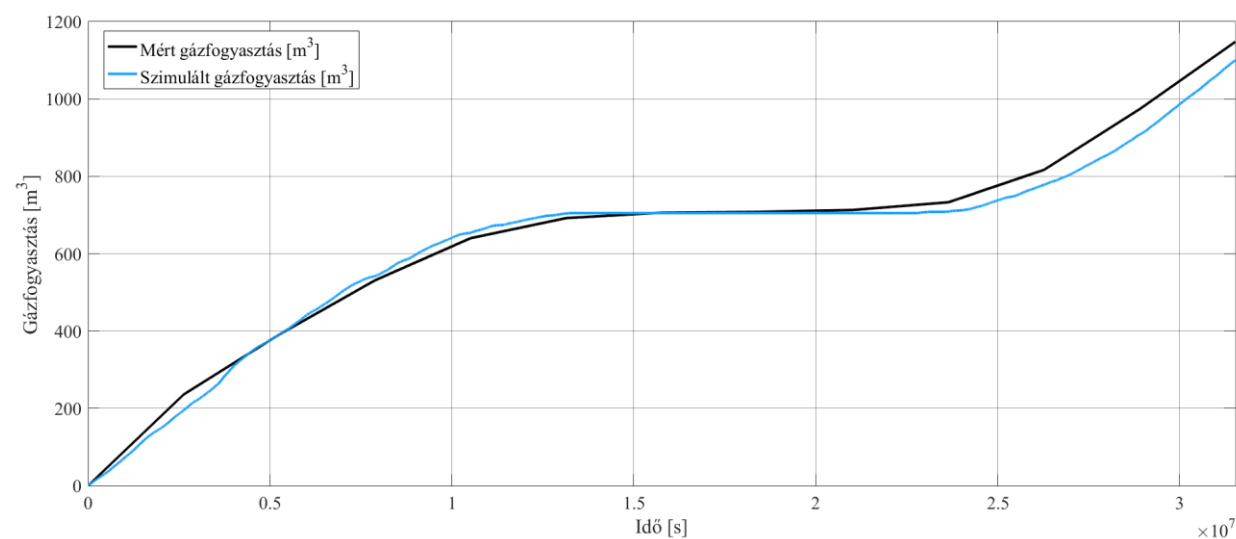
M5.16. ábra Egyszerűsített modell identifikáció B2 épület mért és szimulált hőmérsékletek 2022.11.13-2022.12.04.



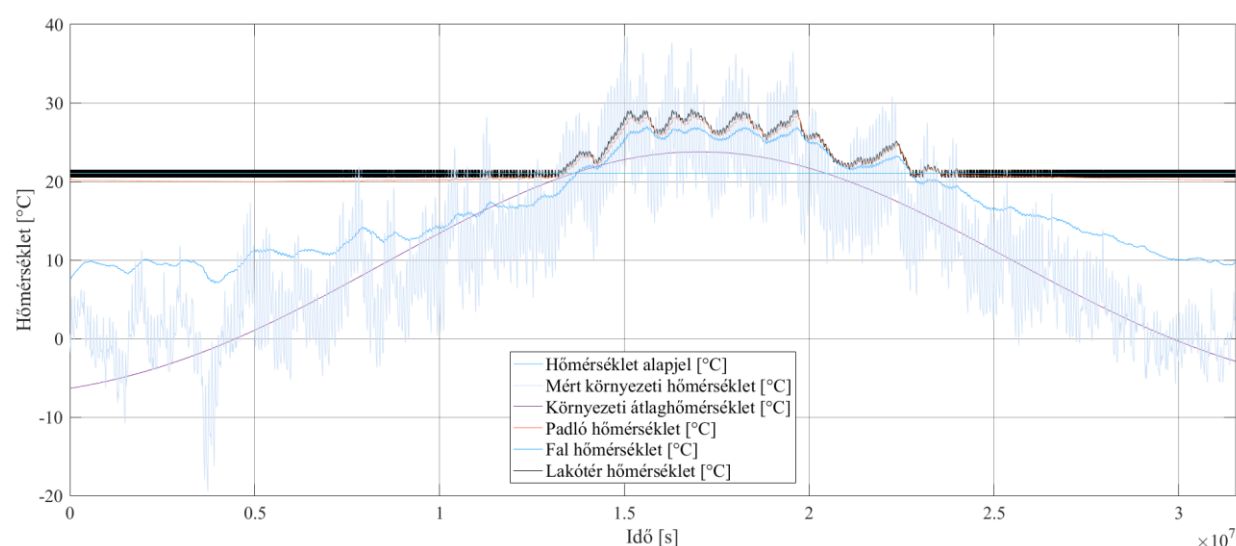
M5.17. ábra Egyszerűsített modell validáció B1 épület gázfogyasztás 2021.08.20-2022.08.20.



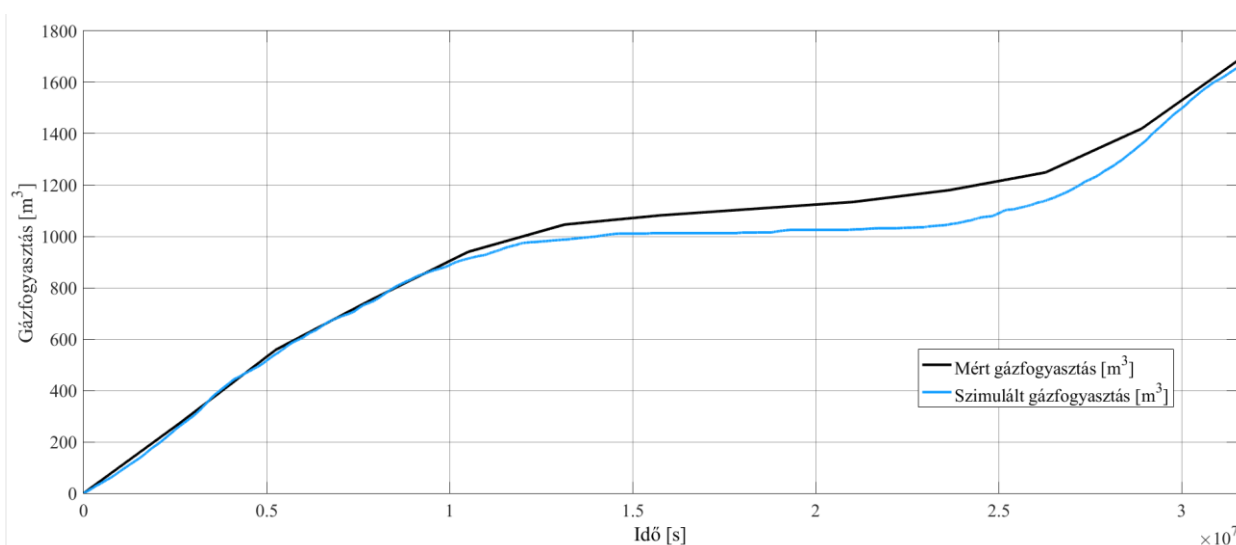
M5.18. ábra Egyszerűsített modell validáció B1 épület hőmérséklet adatok 2021.08.20-2022.08.20.



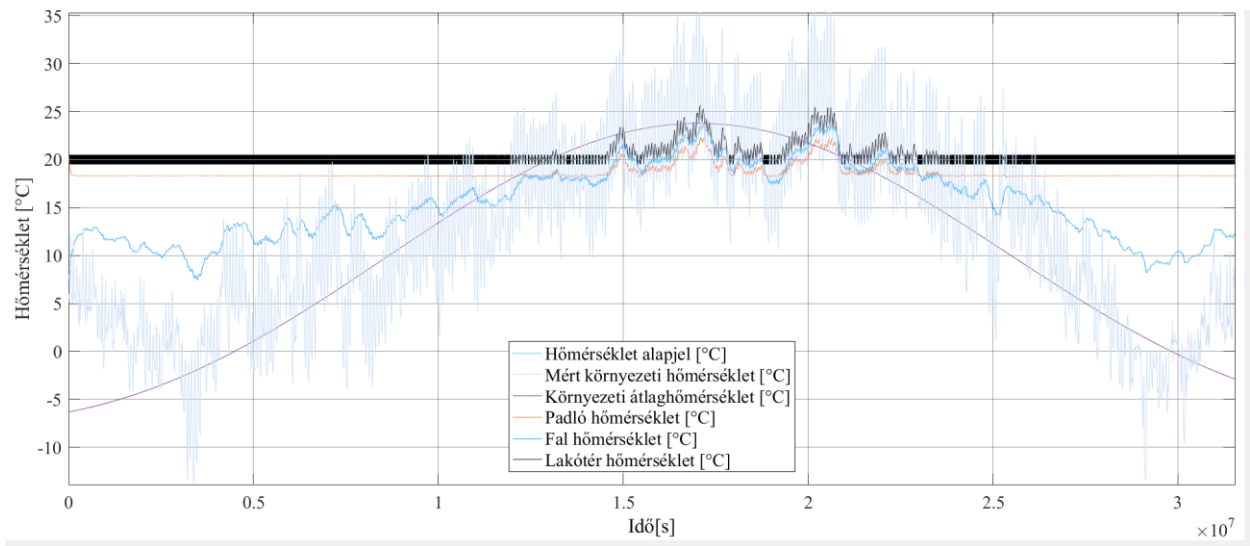
M5.19. ábra Egyszerűsített modell validáció B2 épület gázfogyasztás 2021.01.01-2022.01.01.



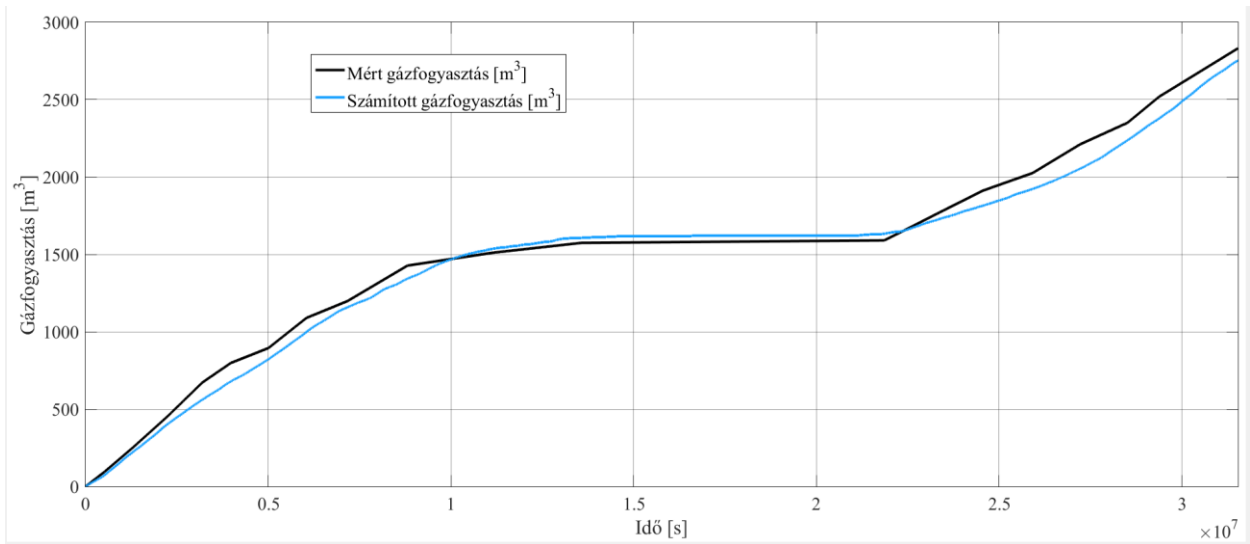
M5.20. ábra Egyszerűsített modell validáció B2 épület hőmérséklet adatok 2021.01.01-2022.01.01.



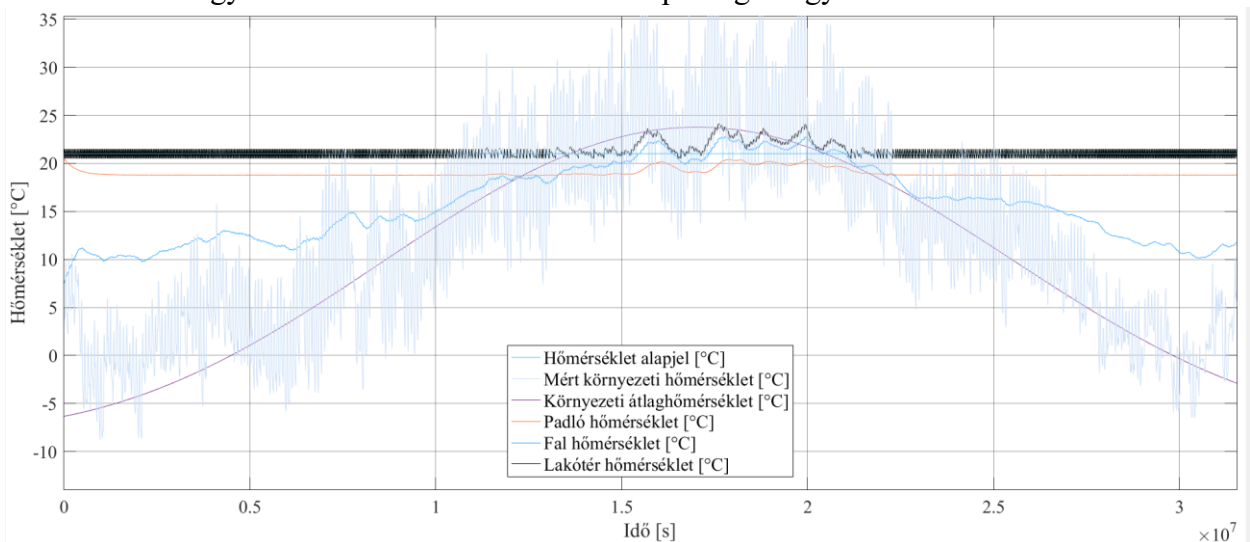
M5.21. ábra Egyszerűsített modell validáció B3 épület gázfogyasztás 2022.01.01-2023.01.01.



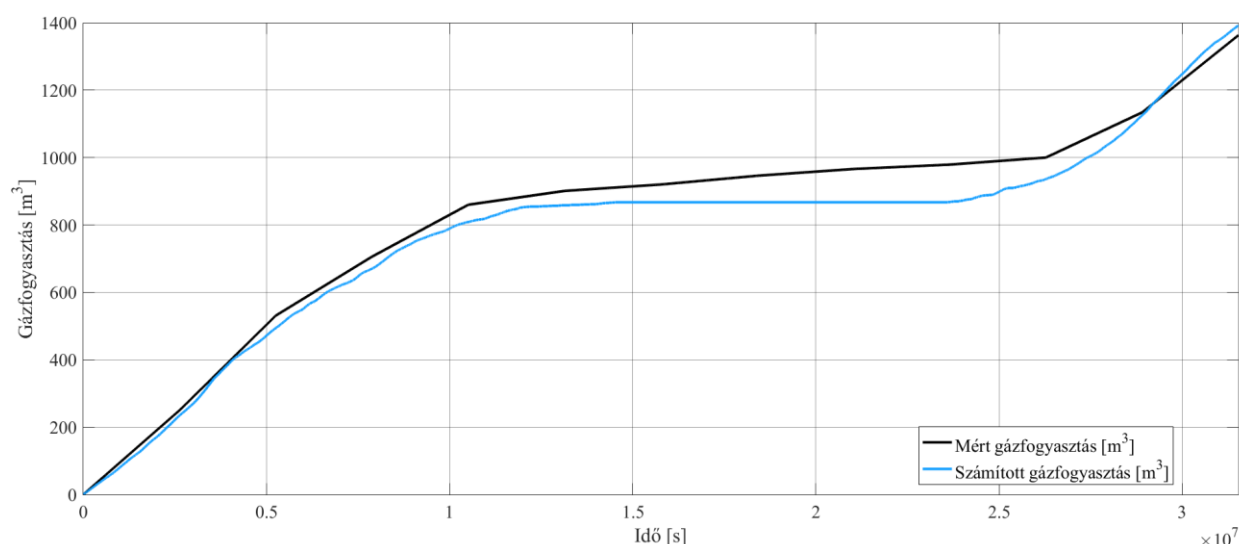
M5.22. ábra Egyszerűsített modell validáció B3 épület hőmérséklet adatok 2022.01.01-2023.01.01.



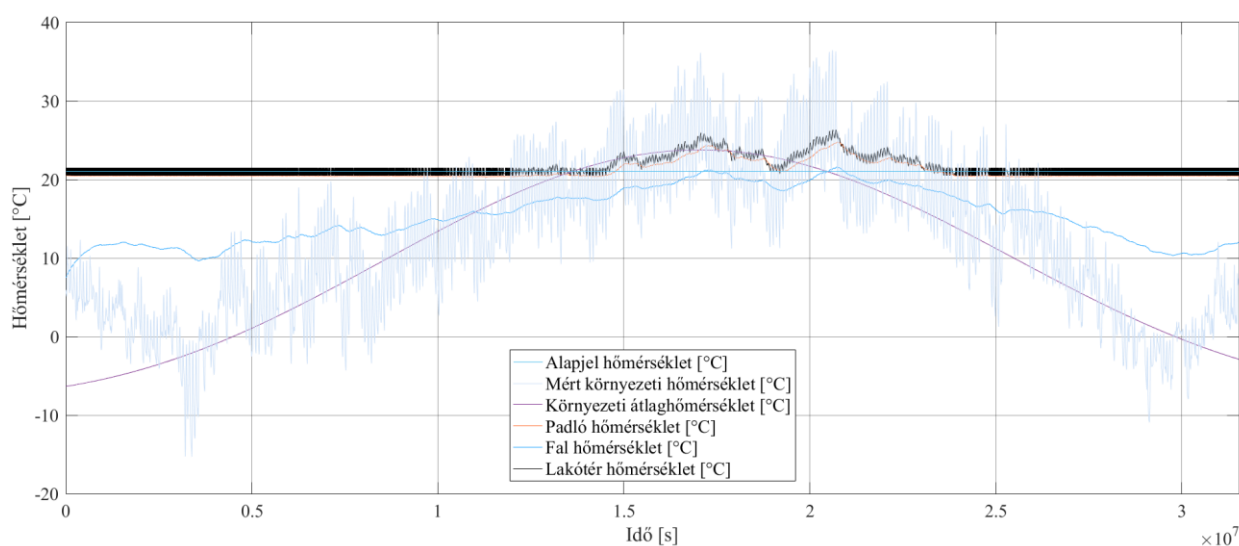
M5.23. ábra Egyszerűsített modell validáció B4 épület gázfogyasztás 2023.01.01-2024.01.01.



M5.24. ábra Egyszerűsített modell validáció B4 épület hőmérséklet adatok 2023.01.01-2024.01.01.



M5.25. ábra Egyszerűsített modell validáció B5 épület gázfogyasztás 2023.01.01-2024.01.01.



M5.26. ábra Egyszerűsített modell validáció B5 épület hőmérséklet adatok 2023.01.01-2024.01.01.

A modellek további mérési és szimulációs eredményei, kérésre felhő tárhelyen elérhetőek

- Alapadatok MATLAB webview és .m és .txt adatfájlok épületenként
- Paraméterérzékenységi vizsgálat, .m és fig-ek, excel adatok
- Ábrák, MATLAB webview és .m és .txt adatfájlok épületenként
- 1°C hőmérséklet csökkentés hatása excel adatok
- Filtráció hatása: excel adatok és .m adatfájlok
- Hőkapacitás hatása: excel adatok és .m adatfájlok, scriptek
- Követelményszintenként szimulációs eredmények: excel
- Lokáció hatása: MATLAB webview és .m és .txt adatfájlok épületenként, excel adatok

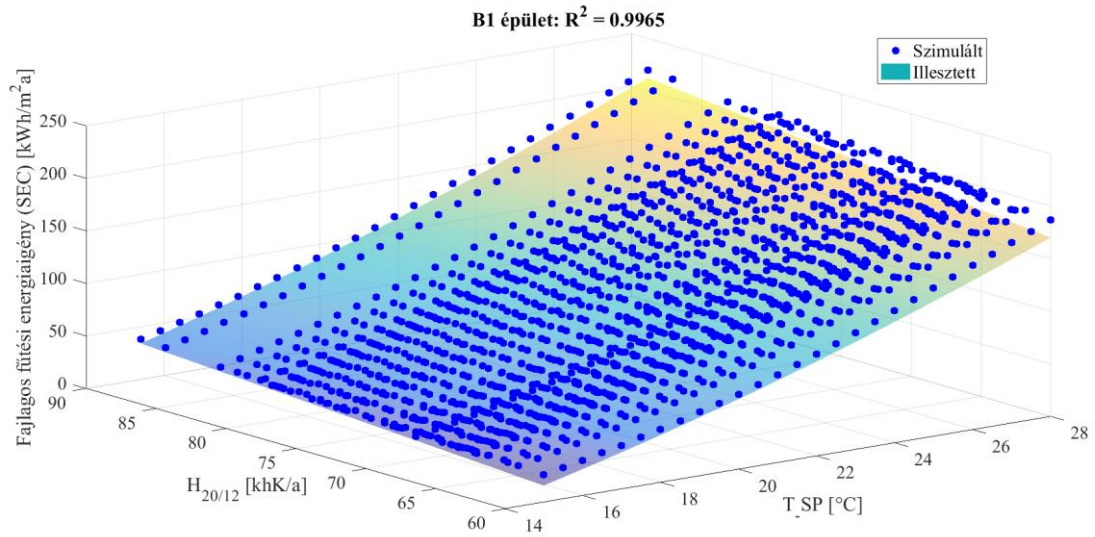
M6. Fűtési hőfokhíd és lokáció

M6.1. táblázat Fűtési hőfokhidak és fűtési napok száma

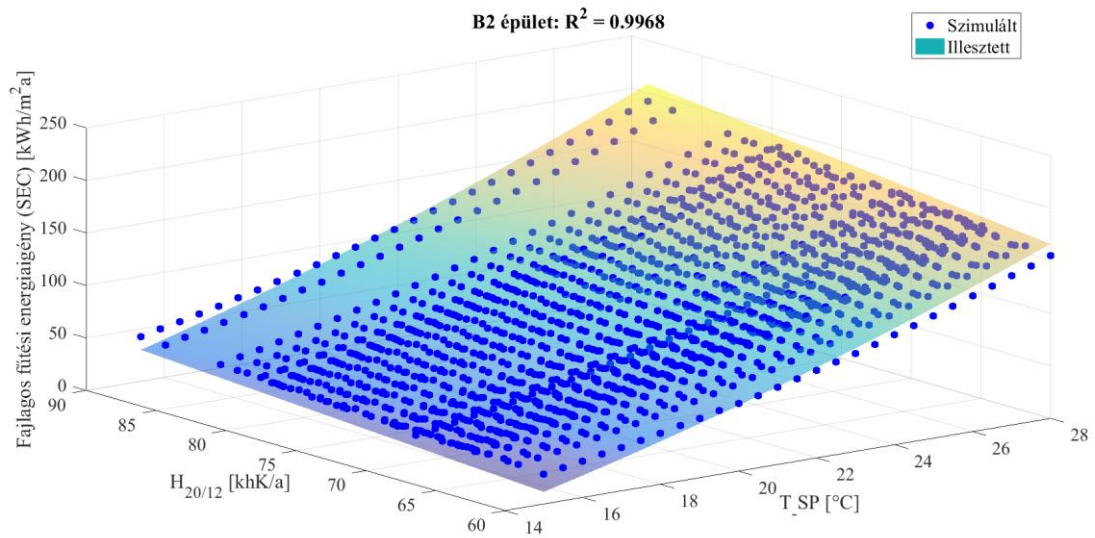
Sorszám	Fűtési napok száma	G _{20/12}	Település_év
1	165,89	2619,79	Szeged_2022
2	167,63	2501,28	Pecs_2023
3	167,67	2576,33	Szekszard_2023
4	169	2607,53	Szeged_2023
5	169,5	2663,3	Szekszard_2022
6	170,5	2569,18	Bekescsaba_2023
7	171	2668,3	Pecs_2022
8	171,1	2684,96	Bekescsaba_2022
9	171,72	2707,88	Szolnok_2022
10	172,5	2702,97	Kecskemet_2023
11	172,69	2708,71	Szolnok_2023
12	172,71	2716,39	Kecskemet_2022
13	172,9	2729,58	Kaposvar_2022
14	173,83	2692,02	Bekescsaba_2020
15	175,33	2700,08	Szeged_2020
16	175,86	2816,53	Szombathely_2022
17	175,86	2816,53	Zalaegerszeg_2022
18	176,08	2812,85	Nyiregyhaza_2023
19	176,91	2806,3	Gyor_2022
20	177	2759,2	Szolnok_2020
21	177,2	2706,1	Pecs_2020
22	177,33	2748,98	Debrecen_2023
23	177,75	2869,75	Godollo_2022
24	177,75	2742,68	Gyor_2023
25	178,43	2773,65	Kecskemet_2020
26	179,14	2848,63	Budapest_2023
27	179,17	2838,65	Szekesfehervar_2022
28	179,17	2838,65	Veszprem_2022
29	179,29	2857,08	Godollo_2023
30	179,6	2757,61	Szekesfehervar_2023
31	179,6	2757,61	Veszprem_2023
32	180	2755,76	Szekszard_2020
33	180,53	2777,47	Szombathely_2023
34	180,53	2777,47	Zalaegerszeg_2023
35	183	2914,27	Budapest_2022
36	183,25	2882,94	Kaposvar_2023
37	183,25	2882,94	Tatabanya_2023
38	184	2803,71	Kaposvar_2020
39	184,64	2947,21	Debrecen_2022
40	185,33	2922,42	Debrecen_2020

M6.2. táblázat Fűtési hőfokhidak és fűtési napok száma M6.1. táblázat folytatása

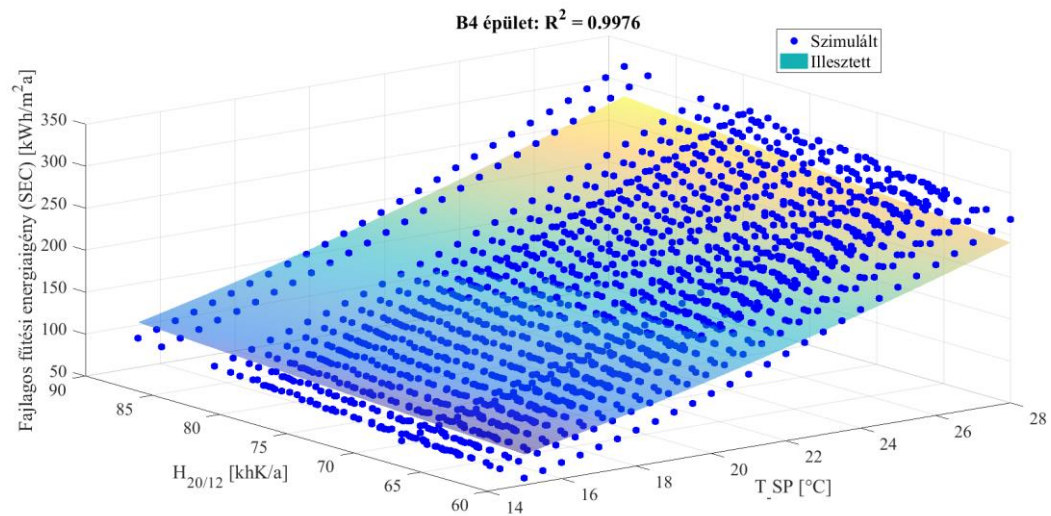
Sorszám	Fűtési napok száma	G _{20/12}	Település_év
41	186,4	2974,83	Tatabanya_2022
42	187	3062,27	Nyiregyhaza_2022
43	189,64	2934,89	Szekesfehervar_2020
44	189,64	2934,89	Veszprem_2020
45	190,08	2935,96	Gyor_2020
46	190,16	2975,21	Godollo_2020
47	190,93	2950,99	Szombathely_2020
48	190,93	2950,99	Zalaegerszeg_2020
49	191,15	3097	Eger_2023
50	191,15	3097	Miskolc_2023
51	191,67	3031,66	Nyiregyhaza_2020
52	192,38	3015,78	Budapest_2020
53	194	3207,22	Eger_2022
54	194	3207,22	Miskolc_2022
55	194	3167,84	Salgotarjan_2023
56	194	3167,84	Zabar_2023
57	194,83	3230,37	Salgotarjan_2022
58	194,83	3230,37	Zabar_2022
59	197,73	3143,75	Szolnok_2021
60	198,26	3087,53	Szeged_2021
61	198,27	3166,69	Kecskemet_2021
62	198,5	3099,2	Tatabanya_2020
63	199,27	3069,08	Bekescsaba_2021
64	200,83	3150,43	Szekszard_2021
65	200,94	3118,43	Pecs_2021
66	202,38	3255,56	Eger_2020
67	202,38	3255,56	Miskolc_2020
68	202,93	3191,63	Kaposvar_2021
69	202,95	3345,63	Godollo_2021
70	202,98	3294,67	Szekesfehervar_2021
71	202,98	3294,67	Veszprem_2021
72	203,39	3305,5	Gyor_2021
73	203,82	3287,46	Szombathely_2021
74	203,82	3287,46	Zalaegerszeg_2021
75	204,21	3276,44	Debrecen_2021
76	205,79	3386,41	Nyiregyhaza_2021
77	206,5	3311,39	Salgotarjan_2020
78	206,5	3311,39	Zabar_2020
79	207,65	3413,82	Budapest_2021
80	209,67	3465,31	Tatabanya_2021
81	214,67	3628,9	Eger_2021
82	214,67	3628,9	Miskolc_2021
83	217,5	3702,85	Salgotarjan_2021
84	217,5	3702,85	Zabar_2021



M6.1. ábra Különböző fűtési hőfokhidakhoz és hőmérséklet alapjelekhez illesztett sík B1 épület



M6.2. ábra Különböző fűtési hőfokhidakhoz és hőmérséklet alapjelekhez illesztett sík B2 épület



M6.3. ábra Különböző fűtési hőfokhidakhoz és hőmérséklet alapjelekhez illesztett sík B4 épület