



MAGYAR AGRÁR- ÉS
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

LAKÓÉPÜLETEK FAJLAGOS FŰTÉSI ENERGIAIGÉNYÉNEK VALÓS ÉS SZIMULÁCIÓS MODELLEZÉSE

Doktori (PhD) értekezés tézisei

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. Géczai 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 jóváhagyása
-----------------------------	--------------------------

TARTALOMJEGYZÉK

JELÖLÉSJEGYZÉK	4
1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK	8
1.1. A téma időszerűsége és jelentősége.....	8
1.2. Célkítűzések.....	9
2. ANYAG ÉS MÓDSZER	10
2.1. Alkalmazott mérőeszközök, és mérési adatsorok.....	10
2.2. A fűtési energiaigényt meghatározó módszer	11
2.3. Kisminta modell épületek	11
2.4. A valós épületek	16
2.4.1 B2 – Identifikációs – épület	17
2.4.2 Egyszerűsített modell	19
2.4.3 Validációs épületek	20
2.5. Az éves fűtési hőfokhíd meghatározása MATLAB/Simulink környezetben.....	21
2.6. Ismétlődő feladatok automatizálása MATLAB/Simulink környezetben	22
3. EREDMÉNYEK és azok megbeszélése.....	23
3.1. Kisminta modellépületek eredményei	23
3.2. Hőtároló tömegek hatása	23
3.3. Valós épületek eredményei.....	24
3.4. Határolószerkezetek hőátbocsátási tényezőjének hatása	24
3.5. Hőkapacitás módosításának hatása.....	24
3.6. A hőmérséklet alapjel csökkentésének hatása	25
3.7. Fajlagos fűtési energiaigény meghatározása	25
4. KÖVETKEZTETÉSEK ÉS JAVASLATOK.....	26
5. Új tudományos eredmények	30
6. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk	35

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_{wall}	<i>Fal fajhője</i>	$[J/kgK]$
d	<i>Vastagság</i>	$[m]$
FI	<i>Vonalmenti hőátbocsátási tényező a falak és az aljzat között</i>	$[W/m]$
$G_{20/12}$	<i>Fűtési hőfokhíd</i>	$[nap \text{ } ^\circ C/a]$
H	<i>Az éves fűtési hőfokhíd ezredrésze</i>	$[khK/a]$
$H_{20/12}$	<i>Fűtési hőfokhíd ezredrésze órában kifejezve 20 °C belső-, 12 °C fűtési határhőmérséklet esetén</i>	$[khK/a]$

Bevezetés, célkitűzések

HY	<i>Hiszterézis</i>	$[^{\circ}\text{C}]$
k	<i>Kitöltési tényező</i>	$[\%]$
k_1	<i>Követelményszint/1920</i>	$[-]$
k_2	<i>Követelményszint/1965-1979</i>	$[-]$
k_3	<i>Követelményszint/1979-1986</i>	$[-]$
k_4	<i>Követelményszint/1986-2006</i>	$[-]$
k_5	<i>Követelményszint/2006-2014</i>	$[-]$
k_6	<i>Követelményszint/2015-2023</i>	$[-]$
k_7	<i>Követelményszint/2023-tól</i>	$[-]$
$k_{\text{air_wall}}$	<i>Hőátszármaztatási tényező levegő - fal</i>	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$
k_{ceiling}	<i>Hőátszármaztatási tényező födém</i>	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$
$k_{\text{dw_atm}}$	<i>Hőátszármaztatási tényező nyílászárók – környezet</i>	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$
$k_{\text{floor_air}}$	<i>Hőátszármaztatási tényező levegő - padló</i>	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$
$k_{\text{floor_ground}}$	<i>Hőátszármaztatási tényező padló – föld</i>	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$
k_{fur}	<i>Hőátszármaztatási tényező hőtároló tömegek</i>	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$
k_l	<i>Hőátszármaztatási tényezője l-edik réteg</i>	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$
$k_{\text{wall_atm}}$	<i>Hőátszármaztatási tényező környezet - fal</i>	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$
$k_{\text{wall_air}}$	<i>Hőátszármaztatási tényező fal - levegő</i>	$[\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$
L	<i>Szellőző levegő mennyisége</i>	$[\text{m}^3]$
l	<i>Csatlakozási élek hossza vagy terület</i>	$[\text{m}]$
L_{wall}	<i>Fal hossza</i>	$[\text{m}]$
m	<i>Iránytényező</i>	$[-]$
m_{air}	<i>Levegő tömeg</i>	$[\text{kg}]$
m_{ceiling}	<i>Födém tömege</i>	$[\text{kg}]$
m_{floor}	<i>Padló tömege</i>	$[\text{kg}]$
m_{fur}	<i>Berendezések tömege</i>	$[\text{kg}]$
m_{wall}	<i>Fal tömege</i>	$[\text{kg}]$
$m_{\text{water_fh}}$	<i>Padlófűtés vizének tömege</i>	$[\text{kg}]$
$m_{\text{water_rh}}$	<i>Radiátoros fűtés vizének tömege</i>	$[\text{kg}]$

Bevezetés, célkitűzések

n_{fhouse}	<i>Filtrációs tényező</i>	$[1/h]$
p	<i>Fűtési rendszer tervezési tényezője</i>	$[-]$
P_{fh}	<i>Padlófűtés teljesítménye</i>	$[W]$
P_h	<i>Fűtés teljesítménye</i>	$[W]$
P_{rh}	<i>Radiátoros fűtés teljesítménye</i>	$[W]$
q	<i>Fajlagos hőveszteségtényező</i>	$[W/m^3K]$
q_b	<i>Belső fajlagos hőtermelés</i>	$[W/m^2]$
$Q_{belső\ hőnyereség}$	<i>Belső hőnyereség</i>	$[W]$
q_f	<i>Fűtés fajlagos éves nettó hőenergia igény</i>	$[kWh/m^2a]$
Q_F	<i>Fűtés nettó éves hőenergia igény</i>	$[kWh/m^2a]$
$Q_{fűtési/hűtési\ hőigény}$	<i>Fűtési/hűtési hőigény esetében fűtési hőigény</i>	$[W]$
$Q_{légcseré}$	<i>Légcsere hővesztesége</i>	$[W]$
q_m	<i>Fajlagos hőveszteség-tényező</i>	$[W/m^3K]$
$Q_{napsugárzás}$	<i>Napsugárzásból származó hőnyereség</i>	$[W]$
Q_{rad}	<i>Napsugárzás</i>	$[W/m^2]$
$Q_{rétegrendi\ transzm.\ keresztül}$	<i>Transzmissziós hőveszteség a határolószerkezeteken</i>	$[W]$
$Q_{vonalmenti}$	<i>Vonalmenti hőátbocsátás</i>	$[W]$
R^2	<i>Determinációs együttható</i>	$[-]$
r_a	<i>Levegő hőátadási ellenállása</i>	$[m^2K/W]$
R_{se}	<i>Külső hőátadási ellenállás</i>	$[m^2K/W]$
$slip$	<i>Alapjel időprogram eltolása</i>	$[h]$
T	<i>Idő</i>	$[h]$
t	<i>Idő</i>	$[s]$
T_{SP}	<i>Hőmérséklet alapjel</i>	$[°C]$
T_{SP_H}	<i>Hőmérséklet alapjel felső érték</i>	$[°C]$
T_{SP_L}	<i>Hőmérséklet alapjel alsó érték</i>	$[°C]$
T_i	<i>Belső levegő hőmérséklet</i>	$[°C]$
T_{air}	<i>Levegő hőmérséklete</i>	$[°C]$
T_{atm}	<i>Környezeti hőmérséklet</i>	$[°C]$

Bevezetés, célkitűzések

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]
T_{measured}	Mért hőmérséklet	[°C]
$T_{\text{simulated}}$	Szimulált hőmérséklet	[°C]
T_{wall}	Fal hőmérséklet	[°C]
U	Hőátbocsátási tényező	[W/m ² K]
U_R	Eredő hőátbocsátási tényező	[W/m ² K]
V	Épület térfogat	[m ³]
V_{house}	Ház légtérfogata	[m ³]
Z	Fűtési időny hossza	[nap/a]
Z_F	Fűtési időny hosszának ezredrésze	[kh/a]

Görög betűk

Δ_{SEC}	Fajlagos fűtési energiaimegtakarítás	[kWh/m ² a]
$\Delta_{\text{SEC}\%}$	Százalékos fajlagos fűtési energiaimegtakarítás	[%]
σ	Szakaszos üzem hatását kifejező korrekciós tényező	[-]
η_{Irad}	Napsugárzás hasznosulási hatásfoka	[-]
λ	Hővezetési tényező	[W/mK]
ρ	Sűrűség	[kg/m ³]
ρ_{air}	Levegő sűrűsége	[kg/m ³]
ρ_l	Sűrűség l-edik réteg	[kg/m ³]
ψ	Vonalmenti hőátbocsátási tényező	[W/mK]
τ	Időállandó	[h]

Rövidítések

SEC	Fajlagos fűtési energiaigény	[kWh/m ² a]
TTC	Thermal Time Constant - Időállandó	[h]

1. BEVEZETÉS, CÉLKITŰZÉSEK

Doktori disszertációmban modell- és valós lakóépületekben méréseket végeztem el, a mérések alapján értékelem ki és készítem el a fizikai alapú matematikai modelleket. Ezen modellek validálása után a modelltérben 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 a hőmérséklet csökkentés hatásának vizsgálatára 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 hűtés energiaigénye jelenti. Magyarországi viszonylatban, hasonlóan az Európai Unió többi tagországához a CO₂ kibocsátásból a lakossági energiafelhasználás 19%-ot tesz ki. Az energiafelhasználás és ezáltal a szén-dioxid kibocsátás csökkentésének kiemelt területe az épületek energiaigényének minimalizálásával érhető el. Az érvényes nemzetközi és hazai szabályozás is indokolja, hogy az épületek energiafelhasználásának csökkentése a globális energiafelhasználás és károsanyag emisszió miatt is kiemelt terület. A rendeletekben és direktívákban folyamatosan szigorodó követelmények jelennek meg a határoló szerkezetekre vonatkozóan (7/2006 TNM Rendelet, 2006), (9/2023 ÉKM Rendelet, 2023).

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. A világítás korszerűsítése, a jelenlét csak a szükséges világítás használata, vagy akár az alacsonyabb belső hőmérséklet tartása fűtési időnyben is jelentős megtakarítással kecsegtet. A modern vagy korszerűsített épületekben megjelenik az épületautomatizálás is, mely pontosabb és komfortosabb üzemet képes biztosítani alacsonyabb fogyasztás mellett.

Ahhoz, hogy az épületek viselkedését jobban megértsük, a matematikai modellezés és szimuláció nyújt korszerű eszközt. A számítógépes modellek segítségével különböző forgatókönyvek és paraméterek tesztelhetők, más földrajzi elhelyezkedés esetén is elvégezhetőek a szimulációk.

1.2. Célkitűzések

A kutatási feladat célkitűzése a lakóépületek fajlagos fűtési energiaigényének meghatározása szimulációval, 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, hogy 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 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. 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.

2.1. 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), valamint 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 .

A villamosenergia fogyasztási adatok mérésére és rögzítésére Voltcraft SEM5000 (Voltcraft, Franciaország) fogyasztásmérőt alkalmaztam.

A lakóházak gázfelhasználása a területileg illetékes gázszolgáltató hitelesített gázmérőórájával volt mérve.

Meteorológiai adatok

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

Ingyenes elérhető adatforrásból szereztem be az általam nem mért időjárási adatokat a szimulációk elvégzéséhez. Ehhez a NASA által biztosított időjárási adatokat használtam.

Az elérhető adatok földrajzi helymeghatározással ellátott meteorológiai és napenergia-kapcsolatos paramétereket tartalmaznak. 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.

2.2. 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.

$$\dot{Q}_{\text{fűtési hűtési}}^{\text{hőigény}} = \pm \dot{Q}_{\text{rétegrendi transzmisszió}} \pm \dot{Q}_{\text{vonalmonti}} \pm \dot{Q}_{\text{légcsere}} \pm \dot{Q}_{\text{belső hőnyereség}} (\pm \dot{Q}_{\text{napsugárzás}}) \quad (2.1)$$

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.

2.3. 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.

A jellemző épületfizikai értékeket és azok geometriai méreteit a 2.1. táblázat tartalmazza.

2.1. táblázat A kisminta modell épületek határoló szerkezetei

Felület	U [W/m 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		

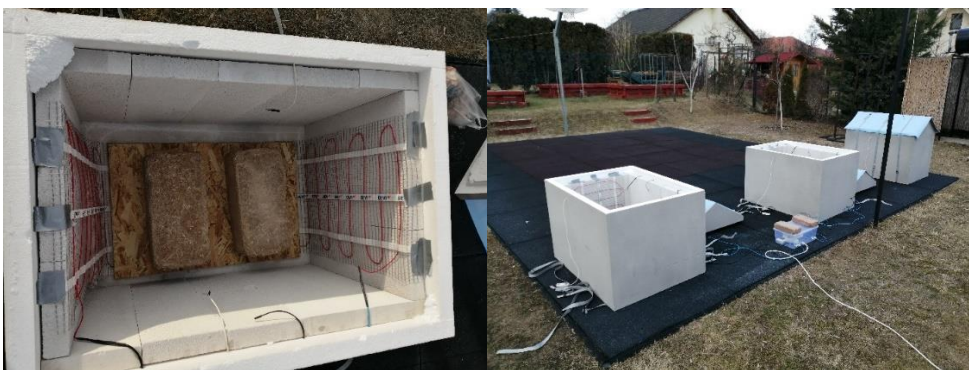
Mérések helyszínének GPS koordinátái: 47.61204835472161, 19.343435272717898 Gödöllő, Magyarország. A kisminta modellépületek elhelyezése a 3.7. ábra mutatja be.



2.1. 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 DEVI^{mat}™ DSVF-150 (Danfoss, Dánia) típusú fűtőszőnyeggel biztosítottam, amelynek teljesítménye 150 W négyzetméterenként. Az A és B kisminta modellépületekben egy-egy négyzetméteres fűtőfelületet telepítettem.

A 2.2. ábrán látható a kisminta modellépület szerkezete, a fűtés és a belső térben elhelyezett érzékelők.



2.2. ábra A kisminta modellépületek kialakítása és telepítése

A kisminta modellépületekben a belső hőmérséklet 2-2 érzékelővel a külső hőmérséklet 1-1 érzékelővel történt. Elhelyezésük 500mm magasságban volt. Referencia külső hőmérsékletmérés is történt, ennek helye az épületektől 2m távolságban 1m magasságban volt.

A fűtés szabályozása a DEVI^{reg}™ Opti (Danfoss, Dánia) segítségével történt. A mérések folyamán egyperces mintavételezés történt.

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 2.2. 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.

2.2. táblázat Az A és B kisminta modell fűtési programja

Időprogram	A alapjel [°C]	B alapjel [°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	

A hőtároló tömeg változtatása a kisminta modellekben

Az épületek különböző hőtároló tömegeit a kisminta modellépületekbe helyezett betontéglákkal módosítottam. Az összehasonlító mérések célja a hőtároló tömeg változtatása milyen hatással van az energiafogyasztásra állandó és időprogram szerint változó alapjel mellett. A 2.3. ábra az egyes mérések során változtatott hőtároló tömegeket jeleníti meg.



2.3. 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.

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. A szimuláció gyorsan futtatható, könnyen változtathatóak a vizsgálati paraméterek.

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:

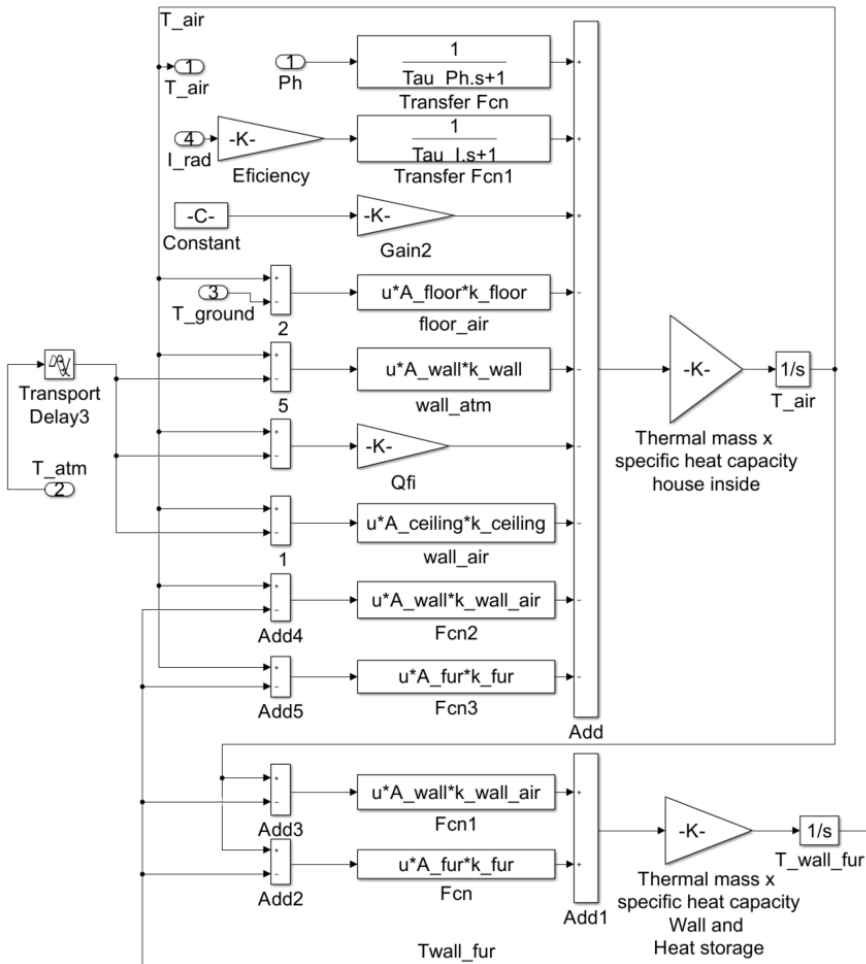
A belső tér léghőmérsékletét leíró (2.2.) differenciálegyenlet:

$$\begin{aligned}
 P_h + I_{rad} \cdot \eta_{I_{rad}} \cdot A_{roof} + q_B \cdot A_{floor} - (T_{air} - T_{ground}) \\
 \cdot A_{floor} \cdot k_{floor_ground} - \\
 (T_{air} - T_{atm}) \cdot A_{wall} \cdot k_{wall_air} - \\
 (T_{air} - T_{atm}) \cdot n_{fhouse} \cdot \rho_a \cdot c_{air} - (T_{air} - T_{atm}) \cdot A_{ceiling} \cdot k_{ceiling} - \\
 (T_{air} - T_{fur}) \cdot A_{fur} \cdot k_{fur} = (m_{air} \cdot c_{air}) \cdot \frac{dT_{air}}{dt} \quad (2.2)
 \end{aligned}$$

A kisminta modellépületek határoló felületeinek hőmérsékletét leíró (2.3) differenciálegyenlet:

$$\begin{aligned}
 (T_{air} - T_{wall_fur}) \cdot A_{wall} \cdot k_{wall_air} + (T_{air} - T_{wall_fur}) \cdot A_{fur} \cdot k_{fur} = \\
 (m_{fur} \cdot c_{fur} + m_{wall} \cdot c_{wall} + m_{floor} \cdot c_{floor} + m_{ceiling} \cdot c_{ceiling}) \cdot \frac{dT_{wall_fur}}{dt} \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

A modell felépítésének részletét MATLAB Simulink elemekkel a 2.4. ábra mutatja be.



2.4. 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 fűtőteljesítményt. 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

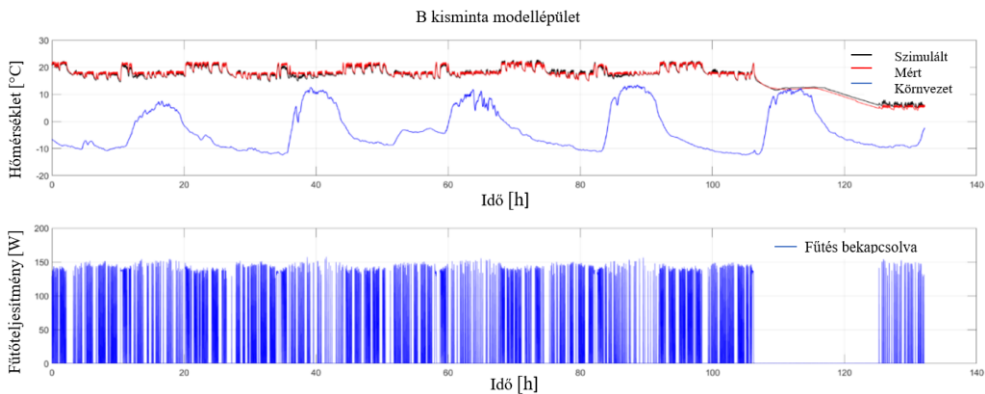
módokat valósítottam meg a MATLAB/Simulink modellben is. A kisminta modellek identifikálása

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™ fminsearch beépített függvénye került alkalmazásra a célfüggvény minimumának megkeresésére egy megadott kezdőérték alapján. Ennek leíró formulája a következő:

$$J(k_{wall}) = \int_0^{t_{max}} (T_{measured(t)} - T_{simulated(t,k)})^2 dt \rightarrow min \quad (2.5)$$

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 2.5. ábra a szimulált és mért adatokat mutatja be a B időprogram szerint változó alapjelű kisminta modellépület esetében.

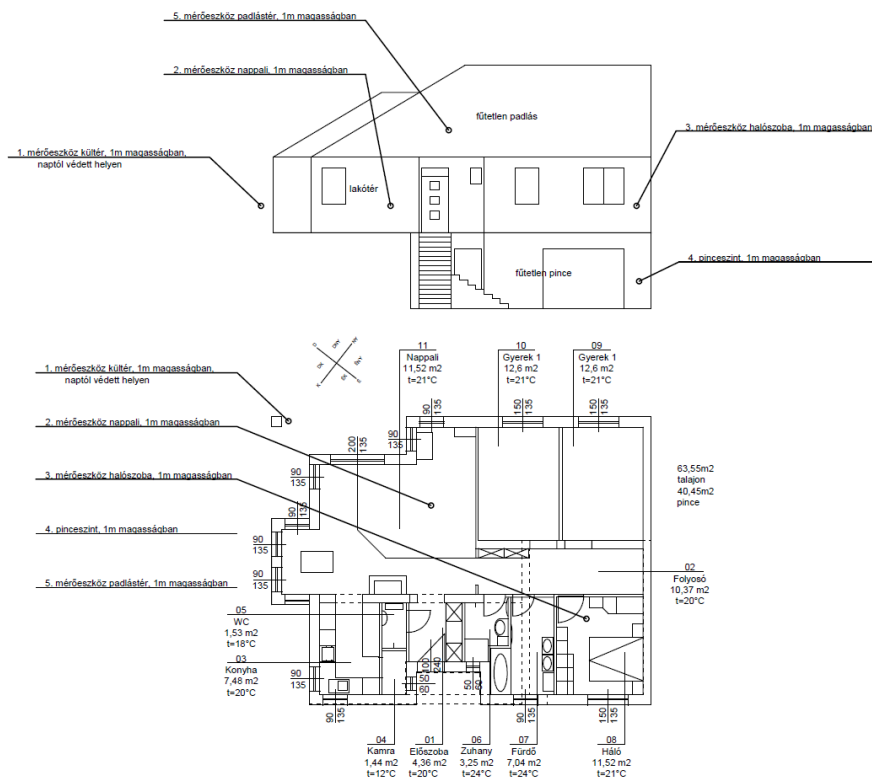


2.5. ábra B kisminta modellépület mért és szimulált értékek

2.4. 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 $100\text{-}170\text{m}^2$ közötti, építési idejük 1960-2020 közötti volt. Fajlagos hőátbocsátási tényezőjük $0,32\text{-}0,987 \text{ W/m}^2\text{K}$ tartományba esett. Az épületek Magyarországon találhatóak. Más hőtermelő berendezés, szellőztető rendszer nem üzemelt a lakóépületekben. Az épülettípológia besorolás szerint 6, 8, 10 és 12-es csoportba esnek.

berendezés. A mérőberendezések helyét a 2.7. 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.



2.7. 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.

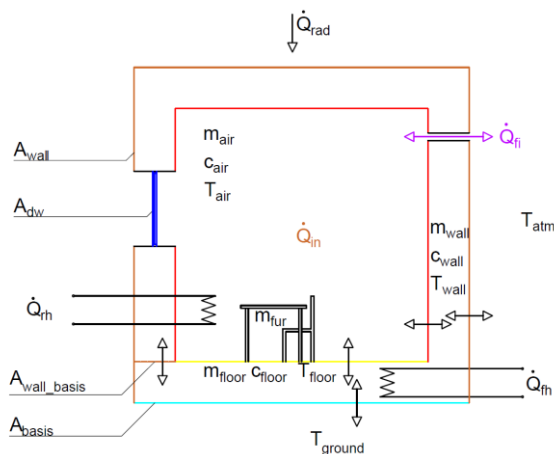
A paraméterérzékenységi vizsgálat során megvizsgáltam milyen paraméterek vannak hatással a belső hőmérsékletre. Ezek a következő paraméterek voltak: lineáris hővezetési együttható, fajlagos belső hőnyereség a filtrációs tényező.

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.

A q_b belső fajlagos hőnyereség értékének meghatározására a MATLAB/Simulink beépített `fminsearch` függvényét alkalmaztam.
Egyszerűsített modell

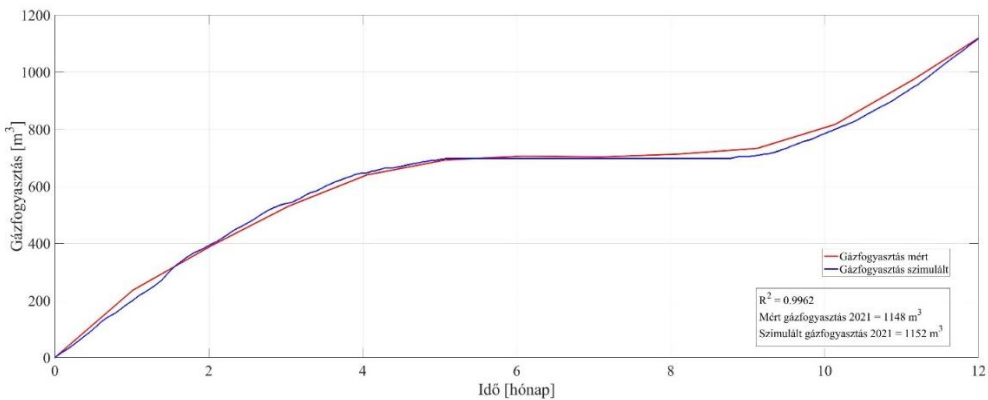
Az egyszerűsítésre azért volt szükség, mert a modell futtatása nagy gépkapacitást igényelt, egy-egy optimalizáció és szimulációs kísérlet lefuttatása több órát vett igénybe, az egyszerűsített modell elvi sémáját a 2.8. ábra mutatja be.



2.8. ábra Az egyszerűsített modell vázlata

Az egyszerűsített modell belső hőmérsékletét leíró differenciálegyenleteket a disszertációban részletesen bemutatam.

Az egyszerűsített modellel elvégeztem az identifikációt q_b belső fajlagos hőtermelésre a mért és szimulált hőmérsékletek alapján. A validálást pedig az identifikációtól eltérő egy éves időszakra végeztem el öt különböző épületre a mért és szimulált gázfogyasztás alapján. 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 végezhető el a kutatás során sokszor ismétlődő más-más beállításokkal végzett szimuláció. A 2.9. ábrán a mért és számított gázfogyasztás látható.



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

2.4.2 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 $q_b=4.9687$ [W/m²] 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 található, van köztük korszerűtlen és korszerű is. Az épületek részletes adatai az M5 mellékletben található 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 időprogram szerinti változó alapjel használatára is.

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.

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.

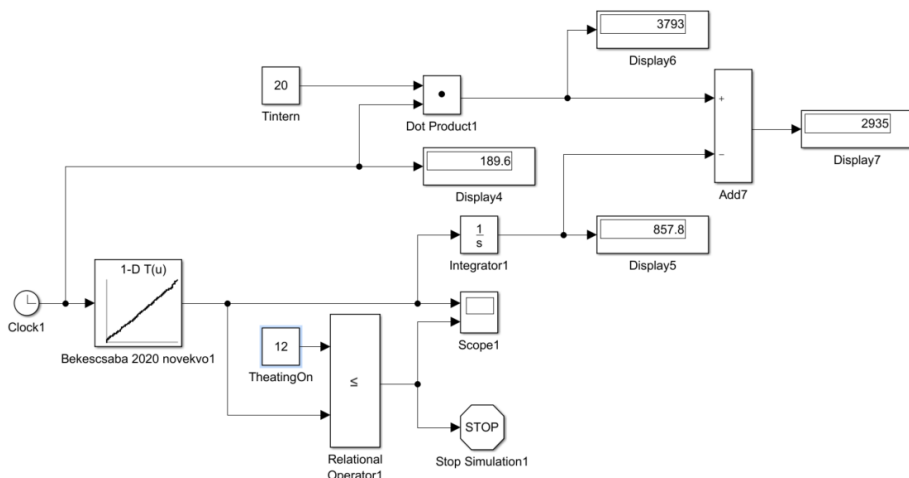
A validálás a számítógépes szimulációban az a folyamat, amely során ellenőrzésre és igazolásra kerül, hogy a szimulációs modell képes-e a valós világban tapasztalt működést pontosan előre jelezni. Ez azt jelenti, hogy a modell által generált eredményeket valós mérésekkel vagy referenciaadatokkal kerülnek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

Az éves fűtési hőfokhid meghatározása MATLAB/Simulink környezetben

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.

Ennek feldolgozásához szükséges volt az adatok MATLAB számára feldolgozható rendezése és az .m fájlok elkészítése. A 2.10. 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.



2.10. ábra Fűtési hőfokhíd és fűtési napok számítása

2.5. 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.

3. EREDMÉNYEK ÉS AZOK MEGBESZÉLÉSE

Az eredmények bemutatása során a mérések és szimulációk alapján kapott 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 modellezése következett, mérési eredmények alapján készítettem el a paraméter identifikációt. Ezek után a modell egyszerűsítése újbóli identifikálása és validálását hajtottam végre egy éves időszakra, öt épületre. Ezzel a többszörösen validált modellel végeztem el a szimulációs kísérleteket, elemeztem ki az eredményeket és vontam le a következtetéseket.

3.1. Kisminta modellépületek eredményei

A méréseket az anyag és módszer fejezetben leírtak szerint végeztem el a három egyforma, de más beállítással üzemeltett kisminta épületben. Hat különböző mérési soron történtek a vizsgálatok, különböző hűtőroló tömegekkel. A mérések során rögzített adatsorok 57406 sorból és 18 mért értékből állnak. A mérések során gyűjtött környezeti átlag-, minimum- és maximum hőmérsékletek bemutatásra kerültek. A mérési időszak 2023.02.04-től 2023.03.16-ig tartott.

A kisminta modellek mérései alapján rögzítettem a külső és belső hőmérsékleteket, valamint a hűtőroló elemek számát. Az adatok alapján a mérések során nyomon követhető volt az épületek belső hőmérsékletének változása, valamint a fűtési üzemmód állapota a külső hőmérséklet változásának hatására. A hűtőroló tömegek módosításának hatásait is megfigyeltem. Az energiafogyasztást a villamosenergia fogyasztásmérők adatai alapján elemeztem, ahol a különböző alapjellel rendelkező rendszerek fogyasztásának eltéréseit is bemutattam. A mérések alapján megvizsgáltam a hűtőroló tömegek és a termikus időállandók hatását is, és az eredmények alapján a fogyasztás mértékének változását elemeztem.

A szimulációs kísérletek alapján a mért és szimulált eredmények összehasonlításával végeztem el a kisminta modellek identifikálását majd ettől független mérési adatsorokkal validáláltam, a szimulációs modell megfelelő működését igazoltam.

3.2. Hűtőroló tömegek hatása

A hűtőroló tömegek módosításának hatását a szimulációs modellekben végeztem el, ahol különböző számú hűtőroló elemet alkalmaztam. Az

eredmények alapján megállapítottam, hogy a hőtároló tömeg növelése az állandó alapjel esetében minimálisan növeli a fűtési energiamegtakarítást, míg időprogram szerint változó alapjel esetében csökkenti azt.

3.3. Valós épületek eredményei

A valós épületek paraméteridentifikációja és a fajlagos belső hőnyereség meghatározását Matlab környezetben minimumkeresési eljárással végeztem el. A mért és szimulált eredmények összehasonlítása alapján a valós épületek gázfogyasztási adatai és szimulált fogyasztások közötti eltéréseket bemutattam.

A paraméterérzékenységi vizsgálatok során a különböző fűtési alapjel (T_{SP_H} , T_{SP_L}), más kitöltési tényező (k), időprogram eltolás (slip) alkalmazását is megvizsgáltam. A vizsgálatok során meghatározott hőmérséklet és időprogramok hatása a fajlagos fűtési energiaigényre szintén bemutatásra került.

Paraméter identifikáció során meghatároztam B2 épületre a belső fajlagos hőtermelés értéke az eljárás alapján $q_b=4,968 \text{ W/m}^2$ értékre adódott. Az egyszerűsített modellre elvégeztem 1-1 éves időszakra öt különböző épületre rendelkezésre álló gázfogyasztási adatok alapján a validálást. Ezt követően a validált modellel szimulációk futtatásával vizsgáltam tovább az épületek viselkedését.

3.4. Határolószerkezetek hőátbocsátási tényezőjének 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 vizsgálatomat kiegészítettem különböző hőmérséklet alapjelekkel (T_{SP}) végzett szimulációkkal is, melynek során 17°C -tól $0,5^\circ\text{C}$ -os lépésközzel 21°C -ig végeztem el. Ez a gyakorlatban öt épületre hat követelményszint szerint kilenc hőmérséklet alapjellel egy éves időtartamra lefuttatott szimulációt jelent.

3.5. Hőkapacitás módosításának hatása

A hőkapacitás befolyásoló hatását a határoló szerkezetek sűrűségének változtatásával elemeztem. A külső fal sűrűségét 200 és 3000 kg/m^3 között

100-as lépésközzel változtattam, a fűtési hőmérsékletet pedig 17- 21 °C között 0,5 °C-onként. Az eredmények alapján megfigyelhető, hogy a hőkapacitás változása az állandó és időprogram szerint változó alapjel mellett eltérő hatást gyakorol a fűtési energiaigényre.

3.6. A hőmérséklet alapjel csökkentésének hatása

A hőmérséklet alapjel 1 °C-os változtatásának hatását is vizsgáltam, és az eredmények alapján megállapítottam, hogy az 1 °C hőmérséklet csökkentése jelentős energiamegtakarítást eredményezhet, amely meghaladja a szakirodalomban megadott értékeket. A nemzetközi és hazai szakirodalom egyaránt ökölszámként az 1 °C-al történő belső hőmérséklet csökkentése megközelítőleg 5-6% energiamegtakarítást eredményez. A vizsgált tartomány 15 és 28 °C belső hőmérséklet alapjel között volt 0,5 °C lépésközzel vizsgálva.

3.7. Fajlagos fűtési energiaigény meghatározása

A fajlagos fűtési energiaigény meghatározásához feldolgoztam a vármegyék székhelyeinek napi átlaghőmérséklet adatait, meghatároztam a fűtési hőfokhidat és a fűtési napok számát. Az eredmények alapján bemutattam, hogyan változik az energiaigény a hőmérséklet változásával és az évek közötti eltérésekkel. A kutatásom során végzett mérések, szimulációk és elemzések alapján számos új tudományos eredményre jutottam, amelyek hozzájárulnak az épületek fűtési energiaigényének pontosabb meghatározásához és az energiahatékonyság javításához.

Az eredményeket és azokhoz fűződő magyarázatokat részletesen az új tudományos eredmények részben mutatom be.

4. 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 kibővíttem 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 jelentő 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 lépésközökkel 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 szakirodalmakban 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 hőfokhid ismerete. Az általam alkalmazott módszertan erre lehetőséget kínál. Első lépésként meghatározható a jellemző fűtési hőfokhid nyilvánosan hozzáférhető adatbázisok alapján is, nem szükséges külön mérések végzése. Könnyen elvégezhető a hőfokhid 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.

5. 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, $U_R = 0,32-0,987 \text{ W/m}^2\text{K}$, $A/V = 0,59-1,1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 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 próbafuttatásokkal 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 kiterjeszhető más földrajzi környezetre is.

3. Tézis

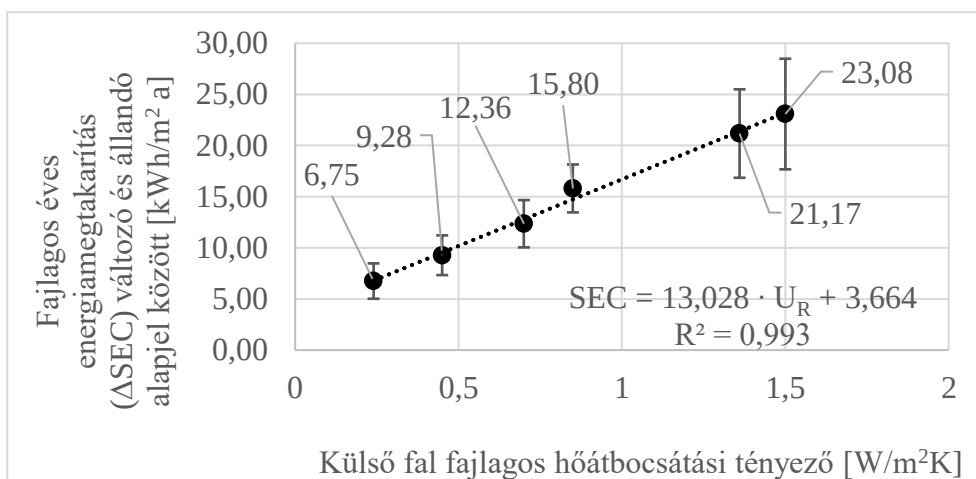
Szimulációs eredmények alapján igazoltam, hogy a lakóépületekre vonatkozó külső fal fajlagos hőátbocsátási tényezője és a változó alapjellel elérhető fajlagos éves fűtési energia megtakarítás között lineáris összefüggés van. A determinációs együttható $R^2=0,993$ $U_R= 0,32-0,987$ W/m^2K tartományban 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 $100-170 \text{ m}^2$ alapterületű, $U_R= 0,32-0,987 \text{ W/m}^2K$, $A/V = 0,59-1,1 \text{ m}^2/\text{m}^3$ arányú magyarországi lakóépületek esetén a változó alapjelű időprogram alkalmazásakor (6:00-8:00 és 16:00-22:30 időpontok között 21°C (komfort), ezen kívüli időszakban 19°C (csökkentett) hőmérséklet) a meredekség $m=13,028$. A tengelymetszet az átlagosnak tekinthető $q_b=4,968 \text{ W/m}^2$, $n_{f\text{house}}=0,5-0,8 \text{ l/h}$ értékek mellett $b=3,665$.

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



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

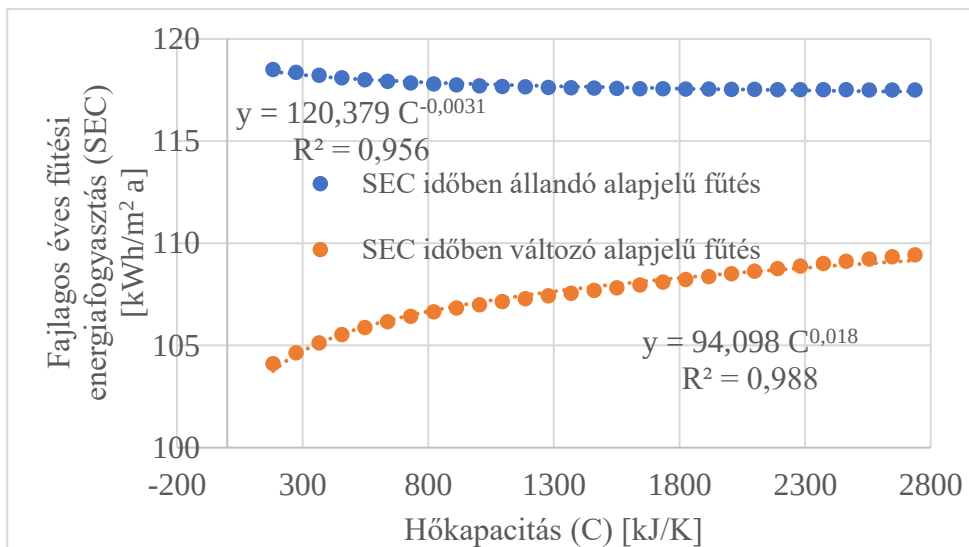
4. Tézis

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 **$\text{SEC} = 94,098 \cdot C^{0,018}$** **$R^2 = 0,988$**



5.2. 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

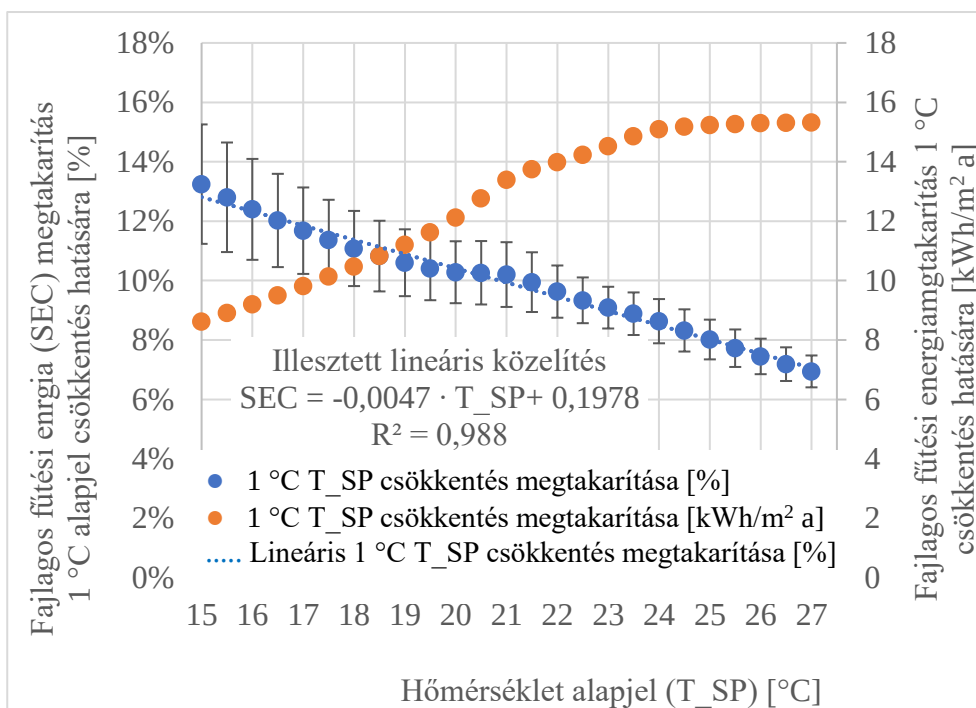
Az összefüggések ismeretében az épületek szerkezeteinek hőkapacitása alapján meghatározható, hogy mekkora a várható fajlagos fűtési energiaigény, állandó alapjel és változó alapjel mellett. A vizsgált épületek szerkezeteinek hőkapacitása lefedi a használatos építőanyagokat. A fenti megállapítás igazolja 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: $\Delta \text{SEC}\% = -0,0047 \cdot T_{\text{SP}} + 0,1978$



5.3. 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 százalékat 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:

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

A közelítő függvény változói a lakóház esetében:

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

$H_{20/12}$ – hőfok híd [khK/ a]

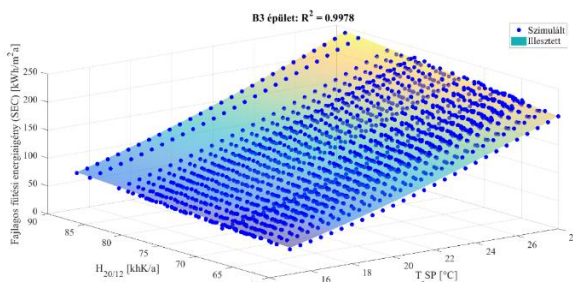
U_R – eredő hőátbocsátási tényező [W/m²K]

n_{fhouse} - filtrációs tényező [l/h]

q_b - belső hőforrás [W/m²]

Vármegye székhelyekre, 2020-2023 években számított hőfokhíd $H_{20/12}$ =60-88,8 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 hőfokhíd, 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 ismertetett 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.



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

6. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

Lektorált cikk világnyelven

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 üzem 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, 978-963-269-958-5