



**A HAJDÚ-BIHAR VÁRMEGYEI LAKÓÉPÜLETÁLLOMÁNY FŰTÉSI
SZÉNDIOXID KIBOCSÁTÁSÁNAK ELEMZÉSE ÉS AZ ALACSONY
HŐMÉRSÉKLETŰ FELÜLETFŰTÉSEK
ENERGIAHATÉKONYSÁGÁNAK EGYES KÉRDÉSEI**

Egyetemi doktori (PhD) értekezés

Írta: Bodó Béla, okleveles létesítménymérnök

Témavezető: Prof. Dr. Kalmár Ferenc

DEBRECENI EGYETEM

Természettudományi és Műszaki Tudományi Doktori Tanács

Földtudományi Doktori Iskola

Debrecen, 2025

Ezen értekezést a Debreceni Egyetem Természettudományi és Műszaki Tudományi Doktori Tanács, Földtudományok Doktori Iskola Fenntartható energetika programja keretében készítettem a Debreceni Egyetem természettudományi/műszaki doktori (PhD) fokozatának elnyerése céljából.

Nyilatkozom arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét.

Debrecen, 20.

.....

a jelölt aláírása

Tanúsítom, hogy Bodó Béla doktorjelölt 2011-2025. között a fent megnevezett Doktori Iskola Fenntartható energetika programjának keretében irányításommal végezte munkáját. Az értekezésben foglalt eredményekhez a jelölt önálló alkotó tevékenységével meghatározóan hozzájárult. Nyilatkozom továbbá arról, hogy a tézisekben leírt eredmények nem képezik más PhD disszertáció részét.

Az értekezés elfogadását javasolom.

Debrecen, 20.

.....

a témavezető aláírása

**A HAJDÚ-BIHAR VÁRMEGYEI LAKÓÉPÜLETÁLLOMÁNY FŰTÉSI
SZÉNDIOXID KIBOCSÁTÁSÁNAK ELEMZÉSE ÉS AZ ALACSONY
HŐMÉRSÉKLETŰ FELÜLETFŰTÉSEK
ENERGIAHATÉKONYSÁGÁNAK EGYES KÉRDÉSEI**

Értekezés a doktori (PhD) fokozat megszerzése érdekében a természettudományok
tudományágban

Írta: Bodó Béla okleveles létesítménymérnök

Készült a Debreceni Egyetem Földtudományi doktori iskolája
(Fenntartható energetika programja) keretében

Témavezető: Prof. Dr. Kalmár Ferenc

A doktori szigorlati bizottság:

elnök: Prof. Dr. Szabó György Emőd
tagok: Dr. Csáky Imre
Dr. Nyers Árpád

A doktori szigorlat időpontja: 2025.05.15

Az értekezés bírálói:

Dr.
Dr.

A bírálóbizottság:

elnök: Dr.
tagok: Dr.
Dr.
Dr.
Dr.

Az értekezés védésének időpontja: 20... ..

Tartalom

1. Bevezetés.....	1
1.1 Dekarbonizált épületek.....	2
1.2 Közel nulla energiaigényű épületek	3
1.3. Komfortigények.....	4
1.4 Sugárzó fűtések	6
1.5 Szakirodalom összegzése	8
2. A kutatás célja	9
3. Kutatási módszerek	10
4. Épületekre vonatkozó hőtechnikai követelmények Magyarországon	11
5. Lakóépület állomány	16
5.1. Európai lakóépület állomány főbb jellemzői.....	16
5.2. Hazai lakóépület állomány	17
5.3. Hajdú-Bihar vármegyei lakóépület állomány.....	19
6. Debrecen fűtési energiafogyasztást befolyásoló éghajlati paraméterei	20
7. Debreceni családi házak elemzése.....	24
7.1 A kutatás algoritmusa	24
7.2 Debreceni családi házak hőtechnikai jellemzői.....	25
7.3 Felhasználói szokások hatása a fűtési energiafogyasztásra	28
7.4 Felhasználható megújuló energiaforrások.....	31
7.4.1 Napkollektorok.....	32
7.4.2 Levegő-víz hőszivattyúk	32
7.4.3 Talajszondás hőszivattyúk.....	34
7.4.4 Fotovoltaikus rendszerek.....	34
7.5 Dekarbonizációs csomagjavaslatok a meglévő családi házak számára	34
7.5.1 b1-b5 épületek	34
7.5.2 1930-2023 között épült épületek	36
7.5.3 Az eredmények értékelése tekintettel az EU elvárásokra és a szakirodalomban közölt korábbi eredményekre	37
7.5.4 Fontosabb következtetések.....	39
8. Hajdú Bihar vármegyei (kivéve Debrecen) családi házak, debreceni panelek és többlakásos téglafalazattal rendelkező társasházak elemzése	40
8.1 Alkalmazott kutatási módszerek.....	42
8.2 A vizsgált épületállomány jellemzői	43
8.3 Vidéki családi házak jellemzői.....	45
8.4 Téglafalazattal rendelkező többlakásos társasházak.....	47

8.5 Panelépületek.....	49
8.6 Debreceni (nagyvárosi) és vármegyei (vidéki) családi házak összehasonlítása	51
8.7 Debreceni (nagyvárosi) családi házak és debreceni téglafalazatú társasházak összehasonlítása	53
8.8 Vidéki családi házak és debreceni téglafalazatú társasházak összehasonlítása.....	55
8.9 Panelépületek elemzése	56
8.10 Jó példák.....	57
8.10.1 Családi házak.....	57
8.10.2 Téglafalazatú társasházak	58
8.10.3 Panelépületek.....	59
8.11. Fontosabb eredmények, összefoglalás.....	60
9. Alacsony hőmérsékletű felületfűtések hőveszteségei.....	61
9.2 Felülethőmérséklet és energiafogyasztás az alacsony hőmérsékletű felületfűtések esetében	65
9.2.1 Számítási eljárás	65
9.3 A vizsgált épület fűtési hőigénye és energiafogyasztása.....	70
9.4 Összefoglalás.....	75
10. Különböző fűtési rendszerek összehasonlítása azonos operatív hőmérséklet mellett	76
10.1 A számítások peremfeltételei, lépései	76
10.1.1 A vizsgált helyiségek.....	78
10.1.2 Operatív hőmérséklet számítása	80
10.2 Eredmények.....	81
10.3 Összegzés, következtetések.....	91
11. A kutatómunka összefoglalása	95
12. Új eredmények, tézisek	100
12.1 Külső léghőmérsékletek Debrecenben a fűtési idény során	100
12.2 Lakóépületek energetikai elemzése Hajdú-Bihar vármegyében.....	101
12.3 Radiátoros és alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtési módok energetikai összehasonlítása.....	105
13. Summary of the research work.....	108
Alkalmazott jelölések	112
Felhasznált szakirodalom	115
1. Melléklet.....	127
Tipikus lakóépületek energiafogyasztása	127
2. Melléklet.....	135
3. Melléklet.....	137
4. Melléklet.....	138
Köszönetnyilvánítás	138

1. Bevezetés

Az épületek energiahatékonyságának növelését, illetve az építőipar széndioxid kibocsátásának csökkentését már a 93/76 EGK Tanács Irányelve is előírja [1]. Tíz év után, a 2002/91/EC Irányelv, már a kedvező hatásokat említi, ugyanakkor rögzíti, hogy a lakás- és szolgáltatói ágazat a Közösség végső energiafelhasználásának 40%-át teszi ki és folyamatosan bővül [2]. Az energiafogyasztás szempontjából megfigyelhető tehát a szektorban az energiamegtakarítás és a bővülés. E két folyamat hatása a végső energiafogyasztásra ellentétes. Ez is eredményezheti azt, hogy a 2024/1275 Irányelv továbbra is azt rögzíti, hogy az épületek felelősek az Unió energiafogyasztásának 40%-áért, vagyis úgy tűnik, mintha az elmúlt 22 évben nem történt volna semmi változás. Természetesen számtalan épületfelújítási program valósult meg és az épületek energetikai követelményeit többször is szigorították. A szektor folyamatos bővülése, illetve a komfortigények növekedése, azonban úgy tűnik ellentételezte az energiamegtakarítási törekvéseket. Jelenleg az épületek az Unió teljes üvegházhatású gázkibocsátásának a 36%-áért felelősek és a Tanács szerint az uniós épületek 75 %-a még mindig nem energiahatékony [3]. Az épületek fűtésében a földgáz játssza a legnagyobb szerepet: a lakóépületekben a helyiségfűtésre felhasznált energia mintegy 39 %-át teszi ki. Az olaj 11 %-kal a második legfontosabb fűtési célú fosszilis tüzelőanyag, a szén pedig körülbelül 3 %-ot tesz ki [3]. A 2024/1275 Irányelv szerint a jelenlegi 1 %-os súlyozott éves felújítási arány mellett nem érhetők el a kitűzött energiamegtakarítási és dekarbonizációs célok, ezért a tagállamokban energiahatékonysági minimumszabályok bevezetését sürgetik [3]. Az energiahatékonysági minimumszabályok célja a legrosszabbul teljesítő épületek kivezetése, illetve a nemzeti épületállomány energetikai állapotának folyamatos erőteljes javulása. Az Irányelv szerint a tagállamoknak nemzeti felújítási tervet kell készíteniük melyben, érvényesül az energiahatékonyság elsődlegességének elve [3]. A nemzeti felújítási terv elkészítéséhez elengedhetetlen a meglévő nemzeti épületállomány adatainak pontos ismerete. Az adatokat (épületek száma, alapterülete) épülettípusonként kell meghatározni. Kötelező mutató az energiahatékonyság szempontjából legrosszabb 43% lakóépület, míg az épületek életkora opcionális paraméterként jelenik meg. Ezek az adatok elengedhetetlenek az optimális energiapolitikai döntések meghozatala során. Hasonló céllal hozták létre 2016-ban a BSO (Building Stock Observatory) adatbázist, mely számos hozzáférhető épületenergetikai jellegű adatot tartalmaz, lehetővé teszi, a döntéshozók számára az épületenergetikai stratégiák kidolgozását. ugyanis ez egy olyan adatbázis, melyben nyomon követhető az EU27, illetve a tagállamok épületállományának energiahatékonysága [4].

1.1 Dekarbonizált épületek

Az Európai Parlament és Tanács 2018/844 Irányelve már előírja, a 2024/1275 Irányelv pedig továbbra is hangsúlyozza az Unió elkötelezettségét az energetikai rendszerek hatékonyságának növelése és dekarbonizálása mellett. Az üveghatású gázok kibocsátását 2030-ig legalább 40%-al kell csökkenteni az 1990 évhez viszonyítva. Az Európai Unióban a végső energiafogyasztás csaknem felét fűtésre és hűtésre fordítják. Ennek az energiamennyiségnek közel 80%-a épületen belül jelentkezik [5]. A Bizottság szerint a célok költséghatékony elérése érdekében évente az épületállomány 3%-t kellene felújítani. Elvárás, hogy a tagállamok, új épületek építése estében, illetve a meglévő épületek felújítása esetében, ösztönözzék a megújuló energiaforrások felhasználását. További elvárás az épületek energetikai rendszereinek intelligens szabályozása, az adatgyűjtés lehetővé tétele, a megbízható mérés és adatáramlás biztosítása [5].

Zhao és Pan elemezte az innovatív üzleti modellek szerepét a nulla szén-dioxid-kibocsátású épületek megközelítésének felgyorsításában [6]. Megállapították, hogy a lakástulajdonosok tudatossága és viselkedése, valamint az instabil és félreérthető jogszabályi és gazdasági kihívások nagyban befolyásolják a nulla szén-dioxid-kibocsátású épületek elterjedését. Ezen akadályokon kívül a villamosenergia-termelési ágazat szén-dioxid intenzitását (kg/kWh) tovább kell csökkenteni a szén-dioxid-semleges épületek elérése érdekében [6]. Thomaßen et al. szerint a széndioxid kibocsátások jelentős csökkentése nem érhető el a villamosenergia termelés dekarbonizációja nélkül, hiszen a villamosenergiát úgy az iparban a gyártás során, mint az épületekben világításra, fűtési-hűtési rendszerek üzemeltetésére széles körben alkalmazzák [7]. Magyarországon az épületek életciklusra vetített energetikai és környezetterhelési optimalizálásával kapcsolatban több tudományos tanulmány és publikáció készült, [8-11]. Ezek a tanulmányok alapvető számítási algoritmusokat és adatokat tartalmaznak a széndioxid kibocsátás valamint a beépített széndioxid mennyiségével kapcsolatosan úgy az épületszerkezeti, mint a fűtési-hűtési rendszerekre vonatkozóan. Bizonyítást nyert, hogy az üzemeltetési széndioxid kibocsátás a beépített széndioxid 1,5-2-szerese [12]. A tervezés során a költségoptimum mellett megjelenik a globális felmelegedési potenciál, illetve a felmelegedést okozó gázok kibocsátásának minimalizálása. Természetesen az utóbbi tényezők figyelembevétele mellett a szokásostól eltérőek lesznek az eredmények az épületek hőszigetelésének mértékét illetően (jóval vastagabb hőszigetelő rétegek lennének optimálisak).

Szabó et al. különböző modellek és scenáriók alapján vizsgálta a délkelet Európai országok esetében a villamosenergia termelés dekarbonizációs lehetőségeit [13]. A tanulmány szerint

2050-re a régióban villamosenergia közel 85%-a megújuló energiaforrásokból származhat (de ez az arány országonként eltérő lehet). A tanulmány szerint a régió országaiban a széndioxid kibocsátás csökkenésének mértéke meghaladja az EU országaira vonatkozó átlagos értéket.

1.2 Közel nulla energiaigényű épületek

Az Európai Unió országaiban évtizedek óta tesznek erőfeszítéseket az épületek energiafogyasztásának csökkentése céljából. A közel nulla energiaigényű épületek (továbbiakban NZEB) fogalma megjelenik a 2010-es energiairányelv szövegében [14]. Ezek az épületek jelentik az első lépést a dekarbonizált lakásállomány felé. Több kutató tett kísérletet az NZEB fogalmának meghatározására. Meghatározták azokat az energiaáramokat, melyeket figyelembe kell venni, definiálták a primerenergia átalakítási tényezők fogalmát [15]; számítási példákat mutattak be [16]; feltárták a nemzeti szabályozások közötti különbségeket [17]; valamint az Európai Unió tagállamaiban új, meglévő, lakó- és nem lakáscélú épületek energiateljesítmény-értékeit tárgyalták [18]. Paleotti [19] és D'Agostino [20] arra a következtetésre jutott, hogy a különböző európai országok eltérően értelmezik az NZEB fogalmát, így az NZEB követelményei is eltérőek. Ugyanakkor megállapították, hogy az NZEB követelményeknek köszönhetően az új épületek energiaigénye lényegesen alacsonyabb, mint a 2000-es években vagy 2000 év előtt épült épületek energiaigénye [18]. Nem csak az Európai Unió országai törekszenek az épületek energiaigényének minimalizálására. Liu et al. [21] bemutatta, hogyan értelmezik Kínában a közel nulla energiaigényű épületek fogalmát, valamint a jelenleg hatályos szabályozást. Egy másik tanulmányban [22] ugyanez a szerző bemutatja azokat az épületgépészeti rendszereket és technológiákat, amelyeket széles körben alkalmaznak Kínában az NZEB épületekben. A kínai energiatakarékosági politika eredményeit és akadályait Han et al. mutatta be [23]. Cao et al. gyakorlatias, integrált, költséghatékony megoldásokat javasolt az energiafelhasználási követelményt teljesítő lakóépületekre [24]. A gépi tanulási modelleket egy hibrid megközelítés részeként javasolták az épületek fűtéssel és hűtéssel kapcsolatos energiafogyasztásának gyors előrejelzéséhez az épületállomány szintjén [25]. Ugyanakkor az NZEB épületek még nem jelentenek végleges megoldást az épületek energiafogyasztásának minimalizálására. Cao et al. [26] összehasonlítást végzett a nulla energiaigényű épületek építésével elért energiamegtakarításra fókuszálva az EU-ban, Kínában és az USA-ban. Továbbá Magrini et al. [27] közzétett egy tanulmányt azokról az épületekről, amelyeket a saját energiafelhasználásuknál nagyobb energiatermelés jellemez, ami lehetővé teszi az

energiatöbblet értékesítését az energetikai hálózatokba. A nulla széndioxid kibocsátású épületek valamint a dekarbonizált épületek fogalma csak néhány éve jelent meg, és ebben az értelmezésben a fő cél a szén-dioxid kibocsátás minimalizálása az épület teljes életciklusára vetítve [28-29].

1.3. Komfortigények

A 2024/1275 Irányelv az energiamegtakarítási törekvésekre fókuszál, azonban hangsúlyozza, hogy a belső környezeti komfortfeltételeket biztosítani kell az épületekben tartózkodók számára. Az emberek ugyanis az idő túlnyomó részét épületekben, illetve zárt terekben töltik. [30]. Ezért az épületek létrehozása során elsőrendű célkitűzés az, hogy komfortos és egészséges belső környezetet biztosítsunk az épületben tartózkodók számára. A zárt terekben töltött idő arányát több országban elvégzett mérések igazolták. Jenkins et al. kimutatták, hogy a kaliforniai lakosság idejének átlagosan 87%-át tölti épületekben, 7%-át egyéb zárt terekben és csak 6%-át a szabadban [31]. Hong Kongban végzett kutatásokat Chau et al., és csaknem ugyanerre az eredményre jutottak egy évtizeddel későbbi kutatásuk során [32]. Az USA-ban és Kanadában végeztek felmérést több ezer alany bevonásával és arra az eredményre jutottak, hogy a felnőtt lakosság idejének közel 65%-át tölti épületen belül az otthonában, 20%-át más épületen belül (munka, vásárlás, étterem), 5,5%-át pedig autóban vagy más járműben [33]. A zárt térben való tartózkodást illetően a két ország lakosságának szokásai között alig volt eltérés. Németországban Brasche és Bishof 5530 lakás közel 12000 lakójának bevonásával végzett felméréseket és kimutatta, hogy a német lakosság átlagosan 15,7 h-t tölt otthonában, zárt térben [34]. Ez az eredmény napi csupán 6 perccel tér el az USA-ban és Kanadában végzett mérések eredményétől. A megfelelő hőkomfort biztosítása azokban az épületekben ahol az ember helyhez kötött tevékenységet végez, illetve elvárt és/vagy előírt egy adott típusú ruházat kiemelten fontos. A visszavont MSZ CR 1752 szabványban lakóépületekre nem voltak meghatározva előírások, hiszen ezekben az épületekben az ember által végzett tevékenységek nem helyhez kötöttek, illetve a ruházat változtatható a megfelelő hőérzet elérése érdekében [34]. Az MSZ CR 1752 helyett alkalmazható MSZ EN 16798 szabványban, amely ajánlásokat fogalmaz meg a belső terek operatív hőmérsékletére vonatkozóan, azonban már megjelenik a lakóépület is [35]. Ez a szabvány az épületeket I-IV komfortkategóriákba sorolja (I a legjobb, IV a legrosszabb komfortminőség). Azonos hőtechnikai és energetikai minőségű épületekben a magasabb komfortigények viszont magasabb energiafogyasztáshoz vezetnek [36]. Emiatt Roaf et al. arra hívja fel a figyelmet, hogy a komfortszabványokban megfogalmazott követelmények miatt nem érhető el az energiamegtakarítási célok és ezért

javasolják a komfortszabványok előírásainak megváltoztatását [37]. Ez természetesen így nem teljesen helytálló. Csak akkor igaz, ha azonos energetikai paraméterekkel rendelkező épületekben szeretnénk magasabb komfortfokozatot elérni. Általában elmondható azonban, hogy a magas komfortigényű épületek építészeti tervezése energiatudatos, a határolószervezetek hőátbocsátási tényezői alacsonyabbak és nagy hatékonyságú hőtermelő berendezéseket alkalmaznak (megújuló energiaforrásokat is), alacsonyak a hőelosztás és hőleadás veszteségei.

Tény, hogy az energetikai szempontból felújított épületek nagy légtömörséggel rendelkeznek [38-39]. Az épületben tartózkodók számára azonban biztosítani kell a szükséges friss levegő mennyiséget. Ha ez ablaknyitással történik, akkor a szellőzési időszakban szabályozhatatlan légycesereszám miatt megnövekedhet az épület fűtési energiaigénye [40]. Ráadásul így az épületbe áramló friss levegő nagy mennyiségű aeroszolt juttathat az épületbe, ami jelentősen rontja a belső levegő minőségét. Gépi szellőzéssel a szellőző levegő térfogatárama szabályozható, szűrők beépítésével az épületbe bejuttatott friss levegőben az aeroszol mennyisége csökkenthető és hőcserélők alkalmazásával a szellőzési energiaszükséglet is csökkenthető. A személyi szellőző berendezésekkel a friss levegő eljuttatható közvetlenül a tartózkodási zónába az emberekhez és ezzel a megoldással csökkenthető a szellőző levegő térfogatárama [41-45]. Gépi szellőzés esetében viszont számolni kell az üzemeltetési és karbantartási költségekkel. Lakóépületekben így a lakásszellőző berendezések megtérülési ideje hosszú és kevésbé terjedtek el.

Grassi et al. 166 hőérzettel kapcsolatos cikk áttekintése alapján arra a következtetésre jutott, hogy napjainkban továbbra is a Fanger által kidolgozott PMV módszer a legelterjedtebb a hőérzettel kapcsolatos modellezések során. Ezt követi az adatvezérelt és az adaptív megközelítés [46]. Összegzésükben a szerzők kijelentik, hogy a hőkomfort biztosítását a legtöbb tanulmány szerint a léghőmérséklet szabályozásával próbálják biztosítani. Az ISO7730 szabvány is a PMV módszert alkalmazza és javasolja a hőérzeti tervezési, illetve ellenőrzési feladatokra [47]. Ugyanakkor ez a szabvány, illetve az érvényben lévő MSZ EN 16798 szabvány és a már visszavont MSZ CR 1752 szabvány is az operatív hőmérsékletet adja meg, mint a hőérzetet elsősorban befolyásoló legfontosabb paramétert. Az operatív hőmérséklet magában foglalja a léghőmérséklet mellett a környező felületek közepes sugárzási hőmérsékletét is, és tekintettel arra, hogy az ember nem csak konvekcióval, hanem jelentős mértékben sugárzással is hőt cserél a környezetével. Az operatív hőmérséklet az, melyet a komfortvizsgálatok során figyelembe kell venni. A fűtési folyamat során a szükséges hőmennyiséget egy hőleadón keresztül juttatjuk el a belső térbe, ami a technológiától függően

konvekcióval, sugárzással vagy mindkét lehetséges módon adja le a hőt. Még ha ugyanazt a hőmennyiséget is adja le a kétféle hőleadó, a hőleadási mód jelentősen befolyásolja a térben tartózkodó ember hőérzetét.

1.4 Sugárzó fűtések

A mérséklet égővi országokban az épületek energiafelhasználását vizsgáló újabb kutatások szerint, az összenergiafelhasználás 30%-50%-át a fűtésre fordítják [48-49]. Ez természetesen az épület hőtechnikai minőségétől is függ.

A szakemberek több megoldás közül választhatnak az épület fűtési rendszerének tervezésekor. Az egyik lehetséges megoldás a radiátoros fűtés. Ebben az esetben a helyiségben (leggyakrabban az ablak alatt) egy fűtőtest kerül elhelyezésre, melynek mérete úgy van megválasztva, hogy a szállított hő bizonyos tervezési előremenő és visszatérő hőmérsékleteken fedezze a helyiség hőigényét. A fűtőtest gyártási paramétereitől függően a hőmennyiség nagyobb része (55%-65%) konvekcióval kisebb része (35%-45%) sugárzással kerül leadásra. Egy másik elterjedt fűtési mód az épületszerkezetekbe integrált hidraulikus csőrendszerek. Ezeket alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtéseknek nevezzük. Ennél a fűtési módnál a fűtővíz hőmérséklete bizonyos mértékig csökkenthető a radiátoros megoldással szemben, mivel nagyobb a hőleadó felület. Megváltozik továbbá a konvekciós-sugárzós hőleadási módok aránya. Az összes leadott hőmennyiség sugárzással leadott részaránya:

- padlófűtésnél: 40%-50%;
- falfűtésnél: 50%-60%;
- mennyezetfűtésnél: 70%-80%.

Az alacsonyabb előremenő és visszatérő hőmérsékletek lehetővé teszik a megújuló energiaforrások hatékony felhasználását. A megfelelő hőtechnikai minőségű határolószerkezetek mellett egy energetikai szempontból jó minőségű épületben tehát bizonyos mértékben megújuló energiaforrások felhasználásával fedezik az energiaigényeket [7, 50]. D'Agostino et al. kimutatták, hogy a példaértékű közel nulla energiaigényű épületekben hőszivattyúkkal fedezik a fűtési és használati melegvíz előállítás energiaigényét [5]. Az alacsony hőmérsékletű sugárzó felületfűtések csatlakoztathatók a 4-ik generációs távfűtési rendszerekhez [51]. A hőszivattyús rendszerekhez is kiválóan illeszkednek az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtések, melyek ráadásul megfelelő hőkomfortot biztosítanak a fűtött térben [52].

Oravec et al. összehasonlító vizsgálatot végzett hatféle reprezentatív alacsony hőmérsékletű sugárzó fal-, padló- és mennyezet fűtési rendszer esetében. Vizsgálat tárgyát képezte a

hőteljesítmény, a szükséges fűtőfelület, a szabályozhatóság, a rövid és hosszú távú energiatárolás, a meglévő épületekbe való beépíthetőség, valamint az építési költségek [53]. A kutatás során arra az eredményre jutottak, hogy a padlófűtés teljesített a legjobban minden értékelt szempont tekintetében, ami arra utal, hogy ez a fűtési mód a legtöbb esetben előnyösen alkalmazható.

Rhee et al. szerint Koreában szinte minden lakóépületben, Észak-Kínában a vidéki házak 85%-ában, Németországban, Ausztriában és Dániában pedig az új lakóépületek 30%-50%-ában telepítenek sugárzó padlófűtési rendszereket [54].

Hesaraki és Huda kimutatta, hogy az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtési rendszerek 10%-30%-os energiamegtakarítást és jobb hőkomfortot biztosítanak, mint a légfűtési rendszerek [55]. Bojic et al. elvégezték a padló-, a fal-, a mennyezet- és a kombinált padló- és mennyezetfűtés energetikai, környezeti és gazdaságossági vizsgálatát [56]. Megállapítást nyert, hogy a kombinált padló- és mennyezetfűtési rendszer a legalacsonyabb exergetikai hatásfokkal, de a legjobb teljesítményt nyújtja. Az összehasonlított rendszerek közül ennek a legalacsonyabb az energiafogyasztása, az üzemeltetési költsége és a kazán névleges teljesítménye. Meg kell említeni, hogy a beágyazott fűtőrétegek az adott épületszerkezeten megakadályozzák, hogy a fűtött légtérből a hő a szomszédos belső vagy külső térbe jusson. Ennek oka az, hogy a szerkezetben lesz egy réteg, melynek hőmérséklete nagyobb, mint a belső hőmérséklet így ez áthatolhatatlan réteg lesz a hőáram számára (hőgát). Krajčík et al. áttekintették a hőgát (thermal barrier) rétegek energiahatékonyágával kapcsolatos tanulmányokat [57]. A szerzők óvatos összegzést fogalmaztak meg az energiamegtakarítással kapcsolatban, és hangsúlyozták a mérések szükségességét. Azonban Li et al. kimutatták, hogy sugárzó mennyezeti panelek esetén a panelek felfelé irányuló hőárama elérheti a fűtővíz kapacitásának a 30%-40%-át [58]. Üzemeltetés közben ez hőveszteségeket okoz a fűtési rendszerben. Ezek nem az épület, hanem a fűtési rendszer hőveszteségei. A veszteségek csökkentése viszont épületszigeteléssel javítható.

Shin et al. egyik tanulmányukban különböző peremfeltételek mellett határozták meg a padlófűtés optimális hőmérsékleteit a legnagyobb elérhető teljesítmény érdekében [59]. Krajčík et al. alaposan elemezte a falfűtési rendszereket [60] míg Safizadeh et al. átfogó elemzést nyújtott a mennyezetfűtésről [61]. Az alacsony hőmérsékletű sugárzófűtések esetében a fűtőteljesítmény és a leadott hő a csövek közötti kitöltőanyagtól, a csövek feletti rétegek anyagától, a csövek anyagától és a felületi hőátadási tényezőtől függ [62-63].

Számos tanulmány elemezte a különböző sugárzó felületek felületi hőátadási tényezőjének értékét. Karakoyun et al. a mesterséges neurális hálózat módszer alkalmazásával

vizsgálta az alacsony hőmérsékletű sugárzó mennyezet hőátadási jellemzőit annak érdekében, hogy annak értékét és a változásait előre jelezhesse [64]. A tanulmány elméleti szempontból hasznos, azonban a gyakorlatban, főleg a rendszerek tehetetlensége miatt nem alkalmazható. Koca et al. sugárzó falfűtési panelek hőátbocsátási tényezőinek értékeit méréssel határozták meg [65].

Acikgoz et al. kísérletek alapján meghatározta egy padlófűtési rendszer hőátadási jellemzőit egy teszhelyiségben [66]. Koca és Cetin olyan mérések fontosságára hívta fel a figyelmet, amelyek azt mutatják, hogy a felületi hőátadási tényezők mért értékei eltérnek a szabványokban javasolt értékektől [67]. Shinoda et al. kiterjedt szakirodalmi áttekintést nyújtott azokról a cikkekről, szabványokról és irányelvekről, amelyek a hűtött/fűtött felületek hőátadási tényezőire összpontosítanak [68]. A teljes hőátadási tényező két részből áll: konvektív és sugárzásos rész. Az eredményeik alapján a teljes és a konvektív hőátadási tényező értékekben nagyobb eltéréseket és hibákat találtak, mint a sugárzásos hőátadási tényező értékében.

A sugárzó fűtési rendszerekkel kapcsolatos tanulmányokban kevés információ áll rendelkezésre a sugárzó fűtési rendszerek által egy fűtési szezonban felhasznált teljes hőmennyiségről. Mindazonáltal ez az információ rendkívül fontos, mivel az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtési rendszereket széles körben használják, különösen a közel nulla energiaigényű épületekben.

1.5 Szakirodalom összegzése

A szakirodalom elemzése alapján az alábbi következtetéseket vontam le:

1. Napjainkban az épületszektorban az egyik legfontosabb cél a dekarbonizáció. Egy épület esetében a széndioxid kibocsátás forrásai lehetnek: a telek előkészítése, az építőanyagok előállítása, az építőanyagok szállítása, maga az építési folyamat, az épület üzemeltetése, bontása, a bontásból származó anyagok elszállítása és újrahasznosítása, valamint a telek rendezése során a kibocsátott széndioxid. Ezek közül az üzemeltetés során a légkörbe juttatott széndioxid mennyiség a legnagyobb.
2. A közel nulla energiaigényű épületek építése és a megújuló energiaforrások alkalmazása jelentősen csökkentheti a széndioxid kibocsátást. Egyes szerzők első lépésként tekintenek a közel nulla energiaigényű épületekre a dekarbonizáció felé vezető úton. Ugyanakkor, a meglévő épületállomány megújulása rendkívül lassú folyamat. Az új épületek építése mellett rendkívül fontos tehát a meglévő épületek energetikai felújítása.

3. Mérsékelt kontinentális éghajlat mellett egy átlagos hőtechnikai paraméterekkel rendelkező lakóépületben a fűtésre fordítják az összenergiafelhasználás túlnyomó részét. A fűtési energiafogyasztás még az új épületek esetében is, illetve a felújított épületek esetében is jelentős részét teszi ki az épületek össz-energiafelhasználásának.
4. A komfortigények miatt, illetve a fűtési rendszerek üzemi hőmérsékletének csökkentése érdekében előnyös megoldást jelentenek az épületszerkezetekbe beépített hidraulikus csőrendszerek, melyekkel alacsony hőmérsékletű fűtőfelületeket lehet létrehozni. Ezeket a fűtési megoldásokat széles körben alkalmazzák az új illetve felújított épületek esetében is.
5. Az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtések esetében nagyszámú tudományos publikációban vizsgálják a teljesítményt befolyásoló paraméterek hatását: rétegrend, csőméret, csőtávolság, csövek közötti kitöltő anyag, csőrendszer felett elhelyezett rétegek hőfizikai jellemzők, stb. Mindezen kutatásokat elvégzik, padó-, fal-, mennyezetfűtés esetében, vagy akár ezek kombinációjára is. Elemzik az energetikai és exergetikai hatékonyságot, a csatlakoztatható hőtermelőket és gazdaságossági számításokat is végeznek. Kísérletekkel, szimulációkkal és más numerikus módszerekkel határozzák meg a felületi hőátadási tényezőket. Magának a fűtési rendszernek a hőveszteségeivel kapcsolatosan azonban nem találtam sem elméleti sem mérési eredményeket.

2. A kutatás célja

A szakirodalom alapján levont következtetésekből kiindulva az alábbi kutatási célokat fogalmaztam meg:

- a fűtési energiafelhasználás és a széndioxid kibocsátás szempontjából elemezni Debrecen városban a családi házak jellemzőit;
- a fűtési energiafelhasználás és a széndioxid kibocsátás szempontjából elemezni Hajdú Bihar vármegyében (kivéve Debrecen) a családi házak jellemzőit;
- Debrecen városban vizsgálni a panelépületek és az 1950-2020 időszakban épült többlakásos téglafalazatú társasházak energetikai jellemzőit és széndioxid kibocsátását
- vizsgálni a fűtési energiafogyasztást jelentősen befolyásoló külső hőmérséklet, napsugárzás és hasznosítási fok alakulását Debrecen városban mért adatok alapján;
- elemezni az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtések hőveszteségeit hagyományos radiátoros fűtési móddal összehasonlításban, azonos léghőmérsékletek mellett;

- elemezni az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtések hőveszteségeit hagyományos radiátoros fűtési móddal összehasonlításban, azonos operatív hőmérsékletek mellett, különböző geometriával rendelkező helyiségek esetében.

3. Kutatási módszerek

A lakóépületek többségének energetikai elemzését magam készítettem az elmúlt évek során, illetve a TÉ jogosultsággal rendelkező mérnökök által - kizárólag a PhD dolgozatomhoz - adatgyűjtés céljából rendelkezésemre bocsátott energetikai tanúsítványokból határoztam meg. Összesen 1200 Hajdú Bihar vármegyei épület energetikai tanúsítványa állt rendelkezésemre, melyek 2017-2023 időszakban WinWatt Gólya nevű szoftverrel készültek. A főbb kigyűjtött adatok az alábbiak voltak:

- építés éve;
- fűtött alapterület;
- fűtött térfogat;
- felület/térfogat (A/V) tényező;
- fajlagos hőveszteségtényező;
- fajlagos fűtési primerenergia fogyasztás;
- széndioxid kibocsátás.

Ezek mellett kigyűjtésre került a fűtési rendszer típusa, a felhasznált energiahordozó, az épületszerkezet típusa, és a kutatás szempontjából kevésbé fontos használati melegvíz termelésre vonatkozó adat. Amennyiben az épület rendelkezett fotovoltaikus rendszerrel, kigyűjtésre kerültek a rendszer fontosabb energetikai jellemzői. Az épület címe, a tulajdonos, illetve megrendelő a GDPR adatkezelési előírásoknak megfelelően nem kerülhetett rögzítésre. A Debreceni Egyetem Épületgépészeti és Létesítménymérnöki Tanszékén hozzáférhető az ORIGIN LAB 9.55 szoftver, melyet a statisztikai elemzésekhez használtam. Az adatok többségét dobozdiagramban ábrázoltam (boxplot), hiszen így leolvasható a medián, az alsó és a felső kvartilis.

Az eredmények alapján az épületeket az építési időszak függvényében kategorizáltam. Épületenergetikai felújítási javaslatokat (csomagokat) dolgoztam ki, melyek különböző épületkategoriók számára alkalmazhatók, annak érdekében, hogy minimalizálható legyen a fűtési széndioxid kibocsátás. Az épületeknél csak a racionális és technikailag jelenleg megvalósítható megoldásokat vettem figyelembe. Összehasonlítottam a debreceni családi házak, a Hajdú-Bihar vármegyei családi házak és a debreceni téglalapítványú társasházak energetikai tulajdonságait és széndioxid kibocsátását. Az egyes csoportok közötti

különbségeket $p=0,05$ szignifikancia szint mellett értékeltem. Különböző paraméterek hatását a teljes energiaigényre az egyutas független mintás ANOVA varianciananalízis módszerrel vizsgáltam (Tukey teszt). A variancia homogenitást Levene módszerrel vizsgáltam.

A Magyar Meteorológiai Szolgáltató adattára nyújtott lehetőséget a napi átlaghőmérsékletek vizsgálatára 1930-2020 között. Az 1990-2020 időszak mért órai külső hőmérséklet adatai alapján kidolgoztam a fűtési idényre alkalmazható hőfokgyakorisági görbét. A rendelkezésemre bocsátott Debreceni Meteorológiai állomáson a 2009-2013 időszakban mért órai sugárzási adatok alapján meghatároztam a fő égtájakra vonatkozó a függőleges felületre érkező fajlagos sugárzási értékeket. A hőveszteségek, a hőnyereségek ismeretében meghatároztam az energianyereségek hasznosítási fokának napi értékeit.

A felületfűtésekre alkalmazott analitikus alapösszefüggések alapján az Excel szoftver alkalmazásával meghatároztam az alacsony hőmérsékletű felületfűtések hőveszteségeit egy fűtési idényre vonatkozóan. Az összefüggések ellenőrzése és validálása céljából méréseket végeztem a Debreceni Egyetem Épületgépészeti és Létesítménymérnöki Tanszékének Belső Környezet Minősége laboratóriumában. A validálást a saját mérésen kívül a szakirodalomból gyűjtött adatok és az általam számolt adatok összevetésével is elvégeztem.

Különböző geometriai paraméterekkel, üvegezési aránnyal és szerkezetekkel rendelkező helyiségekre megvizsgáltam hogyan alakulnak az alacsony hőmérsékletű felületfűtési rendszerek hőveszteségei. Az egy fűtési módokra kapott eredmények közötti eltérést páros t -próba módszerrel vizsgáltam.

4. Épületekre vonatkozó hőtechnikai követelmények Magyarországon

Az elmúlt évtizedek során az épületekkel szemben megfogalmazott hőtechnikai és energetikai követelmények jelentősen változtak. Gyakorlatilag Magyarországon 1966 előtt nem volt érvényben olyan hőtechnikai követelmény, melyet az építetőknek be kellett volna tartani. A határolószerkezetekre inkább statikai követelmények vonatkoztak. Möller Károly 1934-ben egy épülettechnikai zsebkönyvben különböző hőszigetelő anyagok bemutatása mellett említi meg először, hogy a külső falszerkezetek hőátbocsátási tényezőjének értéke nem haladhatja meg az $1,685 \text{ W/m}^2\text{K-t}$ [69]. Möller a külső falak hőszigetelését a páralecsapódás elkerülésének szempontjából vizsgálja és kijelenti, hogy a hőszigetelés mértékének alsó határa az, amikor nem lép fel páralecsapódás a falszerkezet belső felületén. Megállapítja, hogy $(-20)^\circ\text{C}$ külső- és $+20^\circ\text{C}$ belső hőmérséklet esetében, ha a belső levegő relatív nedvességtartalma 60%, akkor a külső fal hőátmeneti (hőátbocsátási) tényezője legalább $1,45 \text{ kcal/(m}^2 \text{ h } ^\circ\text{C)}$

(azaz $1,685 \text{ W/m}^2\text{K}$) kell legyen. Gyakorlatilag ezt az elvárást a 38 cm vastagságú tömör égetett agyagtégla falazat a maga $1,56 \text{ W/m}^2\text{K}$ hőátbocsátási tényező értékével teljesítette.

Egy 1966-ban kiadott műszaki előírásban bemutatásra kerülnek az építőanyagok fizikai jellemzői és a hőhidak korrekciós tényezői is. A külső tömör szerkezetek hőátbocsátási tényezőire vonatkozó elvárt értékeket a szerkezet tömegének függvényében adták meg az alábbiak szerint [70]:

- külső fal:
 - o fajlagos tömeg: $<300 \text{ kg/m}^2$ – hőátbocsátási tényező: $1,40 \text{ W/m}^2\text{K}$;
 - o fajlagos tömeg: $300 - 700 \text{ kg/m}^2$ – hőátbocsátási tényező: $1,55 \text{ W/m}^2\text{K}$;
 - o fajlagos tömeg: $>700 \text{ kg/m}^2$ – hőátbocsátási tényező: $1,64 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- lapostetők:
 - o fajlagos tömeg: $<300 \text{ kg/m}^2$ – hőátbocsátási tényező: $1,05 \text{ W/m}^2\text{K}$;
 - o fajlagos tömeg: $300 - 700 \text{ kg/m}^2$ – hőátbocsátási tényező: $1,16 \text{ W/m}^2\text{K}$;
 - o fajlagos tömeg: $>700 \text{ kg/m}^2$ – hőátbocsátási tényező: $1,22 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Magyarországon az első szabvány, mely tartalmazta az épületek határolószerkezeteinek hőtechnikai jellemzőinek számítási módszerét és a hőátbocsátási tényezőkre vonatkozó ajánlott értékeket 1979-ben jelent meg [71]. A szabványban megadott hőátbocsátási tényező értékek olyan belső terek külső falaira és lapostetőkre vonatkoztak, melyekben a fűtési idény során a belső léghőmérséklet meghaladja a $16 \text{ }^\circ\text{C}$ -t illetve a relatív nedvességtartalom nem éri el a 75 %-ot. A szabvány szerint a külső falak hőátbocsátási tényezője nem haladhatta meg a $0,85 \text{ W/m}^2\text{K}$ -t, a lapostetők esetében a hőátbocsátási tényező maximum $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$ lehetett, míg az ablakok hőátbocsátási tényezője $3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ lehetett.

Ezt a szabványt 1985-ben módosították és a korábban megadott hőátbocsátási tényező értékeket némileg szigorították [72]. Ennek megfelelően ebben a szabványban az alábbi ajánlásokat rögzítették:

- külső falszerkezetek: $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- lapostetők: $0,4 \text{ W/m}^2\text{K}$;
- ablakok: $2,0 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Az MSZ 04-140/2 szabvány átdolgozásra került és 1992-ben új változatban adták ki [73]. A szabvány részletesen mutatta be a számítási módszereket, de nem adott meg követelményeket a határolószerkezetekre vonatkozóan így a gyakorlatban maradtak az előző szabványban javasolt értékek. Ugyanakkor az új szabvány bevezetett két új fogalmat melyekre követelményértékeket adott meg. Ez a két új hőtechnikai jellemző a térfogategységre jutó fajlagos hőveszteségtényező [$\text{W/m}^3\text{K}$], illetve a határolószerkezetek átlagos hőátbocsátási

tényezője volt. Ezekre a hőtechnikai jellemzőkre vonatkozó javasolt maximális értékeket egy épületgeometriai jellemző függvényében kellett meghatározni (ez az épületjellemző a fűtött térfogatot burkoló határolószerkezetek összefelületének és a fűtött térfogatnak az aránya volt). Az átlagos hőátbocsátási tényezőre vonatkozó követelményértékkel egyértelműen az volt a cél, hogy a tervezés során figyeljenek az üvegezési arányra (mivel az ablakok hőátbocsátási tényezője nagy volt, egy magas üvegezési arány mellett az átlagos hőátbocsátási tényezőre vonatkozó követelményt nem teljesítette az épület). Ezzel a követelménnyel a hőtechnikailag rosszabb minőségű szerkezetek (ablakok) aránya a határolószerkezetek összefelületében egy adott épület esetében gyakorlatilag önszabályozó módon maximalizálódott. Ha az építész és a megrendelő mégis a nagyobb üvegezési arány mellett döntött, akkor ezt kompenzálhatták a tömör szerkezetek hőátbocsátási tényezőjének csökkentésével (vastagabb hőszigeteléssel, vagyis a követelménynél kisebb hőátbocsátási tényező értékekkel). A folyamatosan használt lakóépületek esetében a fajlagos hőveszteségtényezőre vonatkozó követelmény $0,6+0,1(A/V)$ volt, ami egy családi ház esetében melynek A/V jellemzője $1,0 \text{ m}^{-1}$, gyakorlatilag $0,7 \text{ W/m}^3\text{K}$ értéket eredményezett (A – a lehülő felületek összege, $[\text{m}^2]$; V – a fűtött térfogat, $[\text{m}^3]$)

Az EU 2002/91/EK irányelve alapján került kidolgozásra Magyarországon a 7/2006 TNM Rendelet [74]. A Rendeletben az épületekkel szemben támasztott hőtechnikai követelmények, melyek teljesítése eddig az időpontig kizárólag az építésztervező feladata volt, most energetikai követelményekkel bővültek. Ennek megfelelően háromszintű követelményrendszerrel beszélhetünk. Az első és a második szintű követelmények gyakorlatilag az épület ugyanazon hőtechnikai jellemzőire vonatkoztak, mint az 1992-es szabványban: a határolószerkezetek hőátbocsátási tényezőire, illetve a fajlagos hőveszteségtényezőre. Bevezetésre került azonban egy újabb tényező, ami már az épület és az épület energiaigényét biztosító gépészeti rendszerre vonatkozott: az összesített energetikai jellemző, E_p $[\text{kWh/m}^2\text{a}]$. Ezt az értéket primer energiában kellett meghatározni, melyhez a Rendelet a Magyarországon alkalmazott energiahordozókra primer energia átalakítási tényezőket határozott meg. A Rendelet továbbá egyszerűsített és részletes számítási módszert tartalmazott, melyek segítségével számítható volt a nettó fűtési-hűtési-szellőzési energiaigény, a használati melegvíz előállítására fordított nettó energiamennyiség. A számítási módszer átlagos felhasználót vett figyelembe és az átlagos felhasználóra vonatkozó alapadatokkal számolt. A Rendelet célja ugyanis nem az volt, hogy feltárja az eltérő fogyasztói szokásokból származó energiafelhasználási különbségeket, hanem hogy az épületre vonatkozó átlagos energetikai jellemző meghatározását és összehasonlítását tegye lehetővé. Az összesített energetikai mutatóra vonatkozóan három rendeltetésre meghatározták a követelményeket

(lakó és szállásjellegű épületek, oktatási épületek és irodák). Egyéb rendeltetésű épületek esetében egy referencia értéket kellett meghatározni (az épület hőtechnikai jellemzői mellett megadták milyen gépészeti rendszereket kell figyelembe venni) és ezzel az értékkel kellett összevetni a valós épületre számolt összesített energetikai jellemzővel. Néhány, az épületek határolószervezeteire vonatkozó hőátbocsátási tényező követelményt az 1. táblázat tartalmaz [74].

1. táblázat: Hőátbocsátási tényezők megengedett maximális értékei (2006)

Épületszerkezet	Hőátbocsátási tényező, U [W/m^2K]
Külső falak	0,45
Lapostetők	0,25
Födém fűtetlen pince fölött	0,50
Fűtött és fűtetlen terek közötti falak	0,50
Padlásfödém	0,30
Talajra fektetett padló	0,50
Ablakok fa vagy műanyag kerettel	1,60
Ablakok alumíniumkerettel	2,00
Tetőablakok	1,70
Külső ajtók, fűtetlen terek közötti ajtók	1,80

A követelményrendszer második szintje a q_m [W/m^3K] térfogatra vetített fajlagos hővesztégtényezőre vonatkozott, melyet a (A/V) épületjellemező függvényében határoztak meg az (1) összefüggés szerint:

$$\begin{aligned}
 A/V \leq 0,3 & \quad q_m = 0.2 W / m^3 K \\
 0,3 \leq A/V \leq 1,3 & \quad q_m = 0.086 + 0.38(A/V) W / m^3 K \\
 A/V \geq 1,3 & \quad q_m = 0.58 W / m^3 K
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Az épület összesített energetikai jellemzőjének E_p [kWh/m^2a] értékét szintén az A/V épületjellemező függvényében határozták meg és az épület nettó fűtött alapterületre vetített fajlagos primerenergiafogyasztását jelentette (lakóépületeknél a világítás energiafogyasztását nem vették figyelembe).

A Belügyminiszter 40/2012 rendelete nem változtatott a követelményrendszer felépítésén és a követelményértékeken sem, viszont rögzítésre kerültek a belső környezetre vonatkozó hőmérsékletviszonyok, valamint új követelményként megjelent az épületgépészeti rendszerek hidraulikai szabályozása és a szabályozás ellenőrzése [75].

A Belügyminiszter 20/2014 rendelete a költségoptimum és közel nulla energiaigényű épületekre vonatkozó követelményeket is rögzítette [76]. Ezeket a követelményeket középületekre 2018-tól, lakóépületekre 2020-tól tervezték bevezetni. A követelményrendszer struktúrája megmaradt, azonban az egyes követelmények szigorodtak. Az épület határolószervezeteire vonatkozó követelményeket a 2. táblázat mutatja be.

2. táblázat: Hőátbocsátási tényezők megengedett maximális értékei (2014)

Épületszerkezet	Hőátbocsátási tényező, U [W/m^2K]
Külső falak	0,24
Lapostetők	0,17
Födém fűtetlen pince fölött	0,26
Fűtött és fűtetlen terek közötti falak	0,26
Padlásfödém	0,17
Talajra fektetett padló	0,30
Ablakok fa vagy műanyag kerettel	1,15
Ablakok alumíniumkerettel	1,40
Tetőablakok	1,25

A követelményrendszer második szintje a q_m [W/m^3K] térfogatra vetített fajlagos hővesztégtényezőre vonatkozott, melyet az (A/V) épületjellemző függvényében határoztak meg az (1) összefüggés szerint:

$$\begin{aligned}
 A/V \leq 0,3 & \quad q_m = 0.16 W / m^3 K \\
 0,3 \leq A/V \leq 1,3 & \quad q_m = 0.079 + 0.27(A/V) W / m^3 K \\
 A/V \geq 1,3 & \quad q_m = 0.43 W / m^3 K
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

A közel nulla energiaigényű épületekre vonatkozóan a későbbiekben megjelent az a követelmény miszerint az összes felhasznált primerenergia 25%-át megújuló energiaforrásokból kell biztosítani [77-78].

Ha tehát egy épület 2002-ben, 2012-ben vagy 2022-ben épült, akkor ezekben az években a 3. táblázatban bemutatott hőtechnikai követelmények voltak érvényben.

3. táblázat: Lakóépületekre vonatkozó hőtechnikai követelmények 2002-2022 időszakban

Év	Követelmény	
2002	U_{kfal} , [W/m^2K]	0.7
	$U_{födém}$, [W/m^2K]	0.4
	U_{ablak} , [W/m^2K]	2.0

	$U_e, [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$	$U_e \leq 0.6 \frac{V}{A} + 0.1$
	$q, [\text{W}/\text{m}^3\text{K}]$	$q = \frac{K_{tr}}{V} \leq 0.6 \frac{A}{V} + 0.1$
2012	$U_{kfal}, [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$	0.45
	$U_{födém}, [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$	0.25
	$U_{ablak}, [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$	1.60
	$q, [\text{W}/\text{m}^3\text{K}]$	$q = \frac{1}{V} \left(K_{tr} - \frac{Q_{sd} + Q_{sid}}{H} \right) \leq 0.38 \frac{\sum A}{V} + 0.086$
	$E_p, [\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}]$	$120 \frac{\sum A}{V} + 74$
2022	$U_{kfal}, [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$	0.24
	$U_{födém}, [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$	0.17
	$U_{ablak}, [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$	1.15
	$q, [\text{W}/\text{m}^3\text{K}]$	$q = \frac{1}{V} \left(K_{tr} - \frac{Q_{sd} + Q_{sid}}{H} \right) \leq 0.2296 \frac{A}{V} + 0.05143$
	$E_p, [\text{kWh}/\text{m}^2\text{a}]$	100
	Az E_p 25%-át megújuló energiaforrásból kell biztosítani	

A Q_{sd} és a Q_{sid} az épület direkt transzparens szerkezeteken keresztül és indirekt (naptér, tömegfal, Trombe fal, transzparens hőszigetelés) sugárzási hőnyereségei, [W].

Az épület transzmissziós hővesztésétegyezőjét a (3) összefüggéssel számítjuk.

$$K_{tr} = \sum CAU + \sum \Psi l \quad [\text{W}/\text{K}] \quad (3)$$

ahol: A – egy adott külső határolószervezet felülete belméretek szerint, [m^2]; U – az adott épületszerkezet hőátbocsátási tényezője, [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]; C – korrekciós tényező, ami figyelembe veszi, ha az adott határolószervezet külső oldalán a külső léghőmérséklettől eltérő a hőmérséklet, [-]; Ψ – vonalmenti hőátbocsátási tényező (hőhid vagy talajra fektetett padló esetében), [W/mK]; l – a hőhid (vagy külső falszerkezet – talajra fektetett padló) csatlakozási élének hossza, [m].

5. Lakóépület állomány

Energetikai szempontból az európai országok épületállománya rendkívül változatos. A határolószervezetek hőfizikai tulajdonságai mellett rendkívül fontos a fűtött térfogatot burkoló felület (A) és a fűtött térfogat (V) aránya, ami jellemzi az épület kompaktságát. Minél alacsonyabb az A/V arány, annál jobb az épület energetikai szempontból. A családi házakra a magas A/V arány, míg a tömbházakra az alacsony A/V arány a jellemző.

5.1. Európai lakóépület állomány főbb jellemzői

Berndgen-Kaiser et. al szerint az Egyesült Királyságban az egyedülálló családi házak és családi ikerházak aránya 86%, míg Belgiumban, Hollandiában és Franciaországban 79%, 77% és 67% [79]. Németországban a családi házak aránya a legalacsonyabb: mindössze 45%. A

családi házak aránya Szerbiában 73%, míg Magyarországon 62%; Bulgáriában 56%; a Cseh Köztársaságban pedig 45% [80]. A fennmaradó lakások többlakásos épületekben található. A legmagasabb lakásarány Németországban és Csehországban (55%), míg a legalacsonyabb az Egyesült Királyságban, Belgiumban és Hollandiában található. A családi és ikerházak aránya az EU27+Egyesült Királyságban 58% [79].

A közép-kelet-európai országokban (Bulgária, Csehország, Magyarország, Lengyelország, Románia, Szerbia és Szlovákia) a lakóépület-állomány hasonló jellemzőket mutat. A falvakban, városokban a legrégebbi épületek a legkisebb alapterületűek, és a 40-50 cm vastag külső falak főként vályogból készülnek.

A nagyobb városokban a legrégebbi épületek főként égetett agyagtéglából épülnek, a külső falak vastagsága 40–60 cm. Ezek az épületek egy vagy több lakásosak lehetnek. A falvakban és a városokban kisebb számban található még kőből épült házak. A második világháború után az égetett agyagból készült falazóblokkok mellett betont is használtak különféle falazóelemekhez, majd az iparosított technológiával épült épületek terjedtek el. Az előregyártott panelek 6-8 cm-es polisztirol réteget tartalmaztak. Ezekben a tömbházakban több száz lakás is lehet.

A szendvicspanelek mellett a függőleges üregekkel ellátott kerámia falazóelemek elsősorban családi házaknál és négy-, ötszintes társasházaknál alkalmazták. A téglából épült épületeknél csak az elmúlt két évtizedben alkalmaztak hőszigetelő réteget (főleg polisztirolhabot, de kőzetgyapotot is).

Egyéb fontos adatok az épületek és lakások tulajdonjogával kapcsolatosak. Szerbiában 99%, míg Bulgáriában és Magyarországon 96% a saját tulajdonú lakások aránya; a Cseh Köztársaságban 91%; Belgiumban 72%; az Egyesült Királyságban 68%; Hollandiában 67%; Franciaországban 63%; Németországban pedig 53% [79-80]. A tulajdonjog azért fontos, mert az energetikai jellegű felújítások (további szigetelések, új nyílászárók, új hőforrás) általában költségesek, és a tulajdonosoknak kell elvégezniük. Itt rendkívül fontos újra megemlíteni az ambiciózus Európai Uniósi célt, nevezetesen azt, hogy 2030-ra az NZEB-ről a zéró kibocsátású épületekre térjenek fokozatosan át. Továbbá a tervek szerint legkésőbb 2040-re fokozatosan kivonják a fosszilis tüzelőanyagok használatát a fűtésben és a hűtésben [81].

5.2. Hazai lakóépület állomány

Egy ország vagy város épületállománya rendkívül változatos. Magyarországon mintegy 4,6 millió háztartás van, ebből mintegy 2,8 millió családi házban található. 2024-ben 13295 új lakás épült [85]. A dekarbonizációs célok elérése érdekében amellet, hogy az új épületekben

hatékony energiakoncepciókat biztosítsanak, a kutatóknak figyelmet kell fordítaniuk a meglévő épületekre is. A meglévő épületek különböző időszakokban, más-más anyagokkal és technológiával épültek, és különböző hőtechnikai követelményeknek feleltek meg, az építés évében hatályos előírások szerint. Így az épületek között nagy az eltérés energetikai szempontból, ezért megbízható és költséghatékony beavatkozási csomagokat kell kidolgozni a dekarbonizációs célok elérése érdekében.

Az Építésügyi Minőségellenőrző és Innovációs Nonprofit Kft. a nemzeti Fejlesztési Minisztérium megbízása alapján kidolgozta a Nemzeti Épületenergetikai stratégiát, mely az 1073/2015. (II. 25.) Kormányhatározattal került elfogadásra [82]. A stratégia alapját két rendkívül alapos tanulmány jelentette [83-84].

A hazai lakóépületállományra vonatkozóan Csoknyai 15 épülettípust határozott meg és modellezett [82]. Az épületeket a lakásszám, az alapterület, az építési év és az építési technológia alapján csoportosította. A stratégiában megfogalmazott energiamegtakarítási célok, illetve a beavatkozások költségei ezen épülettípusok alapján kerültek meghatározásra. A legnagyobb számban a 4-ik épülettípus jelenik meg (1946-1980 között épült családi ház 80 m² felett) melyet a 3-ik (1946-1980 között épült családi ház 80 m² alatt) és az 5-ik típus (1980-1990 között épült családi ház). Ez a három épülettípus összesen 1610023 lakást takar. Jelentős még a panellakások száma 517522, illetve a régi -1946-2000 között épült (191179) és az új, 2001 után épült többlakásos társasházak száma (216563).

A társasházak esetében az épületek kb. 40%-a a 2001 előtti hagyományos építésű kis társasházi épület. A panel és egyéb iparosított technológiával épült épületek aránya a társasházi épületeken belül valamivel meghaladja 25%-ot. Az 1945 előtt épült társasházi épületek aránya 10% körül van [82].

A társasházi lakások esetében lakásállománynak közel 16%-a található a 2001 utáni hagyományos építésű kis és nagy társasházi épületekben. A panel és egyéb iparosított technológiával épült lakások aránya a társasházi lakásokon belül 42% [82].

Családi házak esetében országos szinten legelterjedtebb a saját gázkazán (36,6%), ezt követik a fatüzelésű berendezések (kazán, kályha) (30,3%) és gázkonvektor (21,6%). Panellakások esetében 99%-ban távfűtést alkalmaznak, míg 10 lakás feletti társasházak esetében a gázkonvektor a legelterjedtebb (27,4%), saját gázkazán 19,8%-ban fordul elő [82].

A Nemzeti Épületenergetikai Stratégia az épületek energiefelhasználásánál 2030-ra 111 PJ/év primerenergia megtakarítás elérését tűzte ki célul.

Felmerült a kérdés, hogy a Hajdú Bihar vármegyei lakóépület állomány jellemzői mennyiben térnek el az országos átlagos értékektől, milyen az épületek hőtechnikai állapota, illetve van-e

különbég Debrecen és a megye többi településén épült épületek között? Ennek érdekében a magam, illetve mérnöktársaim által energetikai és hőtechnikai szempontból felmért lakóépületekre vonatkozó energetikai tanúsítványokból kigyűjtöttem a fűtési energiafogyasztásra vonatkozó adatokat.

5.3. Hajdú-Bihar vármegyei lakóépület állomány

A 2022 népszámlálás adatai alapján Debrecen város lakossága 199858 fő, a lakásállomány 99856 db (2019-ben 95.772 db), melynek 87,8%-a lakott (átlagosan 2,28 fő/lakás). A lakott lakások 8,9%-a egyszobás, 33,1%-a két szobás, 30,7%-a három szobás és 27,3%-a négy vagy négynél több szobával rendelkezik [85].

Az energiafogyasztás tekintetében meghatározó az épület építési éve, mivel a hőtechnikai követelmények és a rendelkezésre álló építési anyagok és technológiák jelentősen változtak az évek során. A lakásállomány 11,1%-a 1960 előtt épült, 37,8%-a 1961-1980 közötti időszakban, 31%-a 1981-2000 között, 12,7%-a 2001-2010 között, 7,4%-a pedig 2010 után [85]. A debreceni lakásállomány főbb építési adatait tartalmazza az alábbi táblázat.

4. táblázat: Debreceni lakásállomány építési mód szerinti megoszlásban (számarányok), [85]

Építési mód	Arány, [%]
Tégla, kő, kézi falazóelem	61,5
Panel	25,7
Beton, közép vagy nagy blokk falazat	7,0
Vályog	3,1
Egyéb	2,7

A debreceni lakásállomány csaknem teljes egészében összkomfortos vagy legalább komfortos. A lakások 31,6%-a távfűtéssel van ellátva, 59,4%-a gázzal fűtött, 7,4%-a árammal fűtött, 12,9%-a fával fűtött és 0,9% fűtésére egyéb tüzelőanyagot használnak [85].

A 87688 lakott lakás az alábbi épülettípusokban található (2022) [85]:

Családi ház (1-3 lakásos)	37 615
Társasház (4 vagy több lakásos)	50 008
Nem lakóépület	65

A több lakásos társasházak esetében 26233 db. lakás panelépületen, míg 23775 db. lakás pedig egyéb falazatú épületben található [85].

A Debreceni Hőszolgáltató Zrt. Debrecenben 87,8 km nyomvonalhosszúságú primer távhőhálózatot üzemeltet. A Debreceni Hőszolgáltató Zrt. a hőt többféle technológiából, több társaságtól vásárolja. 2022-ben a hő arányai a következők voltak: 35,13% közvetlen hőtermelés gázkazánban, 63,95% kombinált ciklusú erőműblokkban kapcsoltan termelt, 0,44% gázmotorban földgáz bázison termelt, 0,47% gázmotorban biogáz bázison termelt. A Debreceni Hőszolgáltató Zrt. a tevékenységéhez az előzőekben felsorolt hőforrások mellett még földgázt és villamosenergiát használ fel [86].

A debreceni háztartások energiafogyasztására vonatkozó adatokat az 5. táblázat tartalmazza.

5. táblázat: Háztartások energiafogyasztási adatai Debrecenben [85]

Év	Háztartások száma	Villamosenergia fogyasztók száma	Háztartások villamosenergia fogyasztása, [MWh]	Gázfogyasztók száma	Fűtési gázfogyasztók száma	Gázfogyasztás, [1000 m ³]
2018	96654	114912	220006	69180	58045	70492,2
2019	97012	114893	216757	69501	58379	68168,8
2020	98493	115626	213078	69794	58785	69110,1
2021	98940	116249	224061	70553	59611	77478,1
2022	100040	116931	216012	69491	69490	71992,5

A debreceni háztartások 86,2%-a fűtésre vagy földgázt, vagy villamosenergiát vagy távhőt használ. A távhőre (374 g/kWh), illetve a földgázra (297 g/kWh) és a villamos energiára (455 g/kWh) vonatkozó fajlagos CO₂-kibocsátást figyelembe véve a debreceni háztartások 86,2%-nak összes szén-dioxid-kibocsátása 2022-ben 395 824,3 tonna volt (~4 tonna/háztartás).

Néhány tipikus épület energiafogyasztásának elemzését, a felújításban rejlő lehetőségeket az 1. Melléklet tartalmazza.

6. Debrecen fűtési energiafogyasztást befolyásoló éghajlati paraméterei

A 201582 lakosú Debrecen [85] Magyarország második legnagyobb városa. Közép-európai fekvésű éghajlata nedves kontinentális (Köppen Dfb), Európa egyik legnagyobb erdőterülettel rendelkező városa. Területének 34%-a (több mint 15 000 ha) erdő.

Egy épület energiafogyasztásának elemzésekor a külső hőmérséklet lényeges tényező. Különböző források szerint egy épület teljes energiafogyasztásának legnagyobb százalékát a fűtés teszi ki [87]. A napi külső hőmérsékletek Debrecenben 1901-től 2020-ig állnak rendelkezésre [88]. Az épületek hőtároló képességét figyelembe véve a napi középhőmérséklet értékeket megfelelőnek tartottam az épületek energiahatékonyságának elemzéséhez. Ez az állítás azonban már nagy valószínűséggel nem igaz a jól szigetelt, az

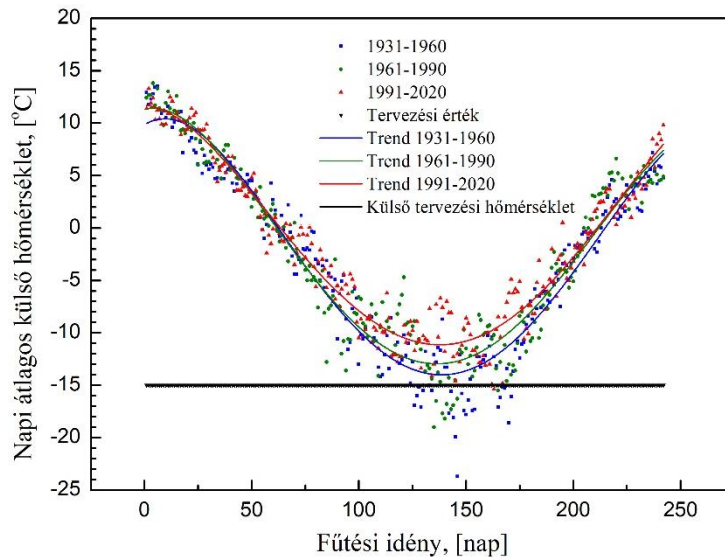
energiarendszerek intelligens vezérlésével rendelkező épületek esetében. Ezekben az esetekben az óránkénti elemzés pontosabb eredményeket ad.

Ami a külső tervezési hőmérsékletet illeti, Magyarországon jelenleg három éghajlati régiót különböztetnek meg, és ezeket figyelembe kell venni: $(-11)^{\circ}\text{C}$ (Délnyugati régió); $(-13)^{\circ}\text{C}$ (az Északnyugati régiótól kiindulva Budapesten keresztül le a Délkeleti régiót is magába foglaló sáv); és $(-15)^{\circ}\text{C}$ (Északkeleti régió). Debrecen a leghidegebb régióhoz, az Északkeletihez tartozik, $(-15)^{\circ}\text{C}$ külső tervezési hőmérséklettel.

Napjainkban több publikációban utalnak a klímaváltozásra és ennek hatására az épületek energiafogyasztására [89-92]. A klímaváltozás miatt a fűtési energiafogyasztás csökken, a hűtési energiafogyasztás részaránya viszont növekszik. Debrecenben a külső hőmérséklet változásának pontosabb megismeréséhez fűtési szezonban egy elemzést végeztem el. Szeptember 1-től április 30-ig három harmincéves időszakra 1931–1960, 1961–1990 és 1991–2020 vonatkozóan elemeztem a napi átlaghőmérsékletek alakulását. A napi átlaghőmérsékletek minimum értékeinek változását a vizsgált időszakokban a 1. ábra mutatja be [93].

Az egyes időszakok pontfelhőire illesztési görbéket helyeztem el. Az illesztési görbék negyedfokú polinom függvények. Megfigyelhető, hogy eltérések vannak a vizsgált időszakok napi átlagértékei között és az abszolút minimum értékek között is. Megvizsgáltam, hogy szignifikáns-e az eltérés az egyes időszakok között. $p=0,05$ -ös szignifikanciaszinten végzett elemzésből kiderült, hogy az összes vizsgált időszak között szignifikáns különbségek vannak. Az illesztési görbék által mutatott külső hőmérséklet abszolút minimum értékei (a napi átlaghőmérsékletek minimum értékének éves minimuma): $(-14,00)^{\circ}\text{C}$ (1930–1960), $(-12,96)^{\circ}\text{C}$ (1960–1990), és $(-11,14)^{\circ}\text{C}$ (1990–2020). Elmondhatjuk tehát, hogy az elmúlt évtizedekben a külső hőmérséklet emelkedése miatt szignifikánsan csökkent a vizsgált időszakok között a fűtési energiafelhasználás is. Ennek a ténynek legalább három szempontból van jelentősége:

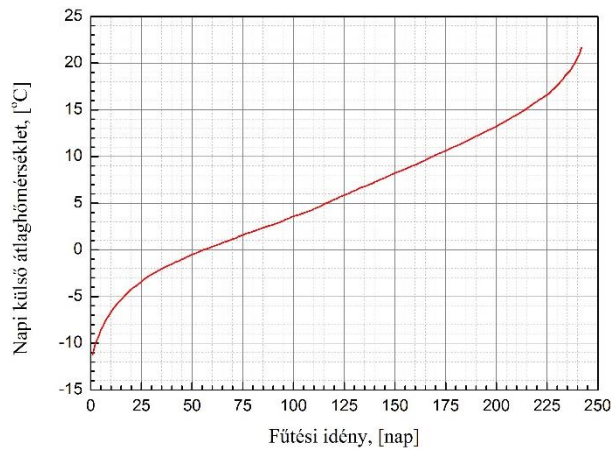
- A legtöbb épületfelújítást az önkormányzat, az állam vagy az Európai Unió támogatja. A felújítások után várható energiamegtakarítást és a CO_2 -kibocsátás csökkenést ki kell számítani és a pályázatban megadni. Szignifikáns eltérést kapunk a valódi értéktől, ha egy épület energiahatékonysági elemzése 40-50 évvel ezelőtti külső hőmérsékletek alapján történik.



1. ábra: A napi átlaghőmérsékletek minimumértékei Debrecenben (Szeptember 1 – Április 30).

- Második szempont a külső tervezési hőmérséklet kérdése. Ha egy épület hőigényét a több évtizede megállapított külső tervezési hőmérsékletek alapján számítjuk ki, akkor a fűtési rendszer minden eleme túlméretezett lesz. Szabályozó elemekkel természetesen illeszthető a teljesítmény az igényekhez, de ez bizonyos esetekben a rendszer hatásfokának csökkenését eredményezi. Az elmúlt 30 évben például egyszer fordult elő a jelenleg érvényes külső tervezési hőmérséklet.
- Harmadik szempont a levegő-víz hőszivattyúk SCOP számításával kapcsolatos. A szakirodalom elemzés alapján megállapítható, hogy ezeket a hőtermelőket egyre nagyobb számban alkalmazzák hazánkban is. Viszont a levegő-víz hőszivattyú SCOP értéke függ a külső hőmérséklettől. A magasabb külső hőmérsékletek miatt a valóságban jobb a szezonális hatásfok, mint amit a több évtizede meghatározott külső hőmérsékletértékek alapján meghatározhatunk.

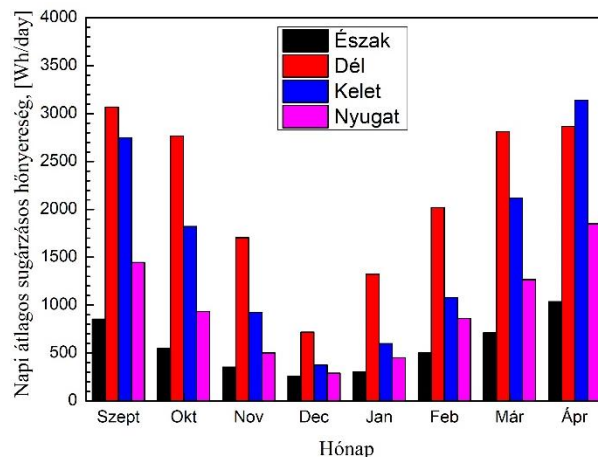
A Debrecenben 1991-2020 közötti időszakban mért napi külső átlaghőmérsékletek alapján elkészítettem a hőfokgyakorisági görbét (2. ábra, [93]).



2. ábra: Debrecenre vonatkozó hőfokgyakorisági görbe (1991–2020).

Magyarországon 1990-ig a távfűtött épületekben akkor kapcsolták be a fűtést, amikor három egymást követő napon a külső napi középhőmérséklet $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál alacsonyabb volt (gyakorlatilag ezt a hőmérsékletet tekintették fűtési határhőmérsékletnek). A legtöbb családi házat magasabb egyensúlyi pont hőmérséklet jellemezte. Így a fűtési szezon a távhőrendszerre kapcsolt társasházak esetében körülbelül hat hónap volt, míg a családi házaknál a fűtési szezon több mint fél évig tartott. Napjainkban a közel nulla energiaigényű épületek fűtési határhőmérséklete a 2020 előtt épült épületekkel összehasonlításban kisebb, így a fűtési szezon rövidebb. Megfigyelhető továbbá, hogy a napi átlaghőmérséklet $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál csaknem 60 napon át alacsonyabb. Vagyis egy közel nulla energiaigényű épület esetében marad 90 fűtési nap, melyeknek az átlaghőmérséklete $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál magasabb. Ez ismételten azt bizonyítja, hogy energetikai szempontból előnyös a levegő-víz hőszivattyúkat jellemző SCOP értéket az 1990-2020 időszakra meghatározott hőfokgyakorisági görbe alapján számolni.

A függőleges felületekre érkező napi sugárzásos energiamennyiséget a DE Meteorológiai Állomáson mért órai globálsugárzási adatok alapján határoztam meg (3. ábra) [93].



3. ábra: Napi átlagos sugárzásos energiamennyiség a fűtési időny során (Debrecen).

Amennyiben az órai globálsugárzási adatok nem állnak rendelkezésre egy adott településre az átlagos napi értékek a havi átlagos globálsugárzás értékei alapján is számíthatók [94].

7. Debreceni családi házak elemzése

7.1 A kutatás algoritmusa

Összesen 1200, 2018-2022 években készült energetikai számítást, tanúsítványt tekintettem át. Ezeknek többségét én készítettem, így nem csak a tanúsítványokban rögzített adatok álltak rendelkezésemre, hanem a felmérés során gyűjtött adatok és tapasztalatok is. Az 1200 energetikai elemzésből és tanúsítványból 236 volt olyan, amely az elmúlt 90 évben épült debreceni családi házra vonatkozott. Az elkészítésük időpontjában hatályos energetikai rendelet alapján, a tanúsítványok tartalmazták a kutatáshoz szükséges adatokat. Meghatározásra került az épületek fűtési energiaigénye és a CO₂ kibocsátása. A kigyűjtött épületenergetikai adatok alapján a statisztikai elemzéseket az ORIGIN LAB 9.55 szoftverrel készítettem el. Ez az adatelemző és grafikus szoftver a Debreceni Egyetemen elérhető és minden olyan funkciót kínál, amely a jelen kutatás során az összegyűjtött adatok elemzéséhez szükséges. Miután a vizsgált 236 épületet építési év szerint nyolc kategóriába soroltam (mindegyik kategóriába legalább 20 db. épületet), kategóriánként készítettem egy mintaépületet a rendelkezésre álló adatok alapján (nyolc különböző épületmodell). Az egyes kategóriák a következők voltak: 1960 előtt épült épületek, 1960-1969 között, 1970-1979 között, 1980-1989 között, 1990-1999 között, 2000-2009 között, 2010-2019 között és 2020-2023 között épült épületek. Az egyes kategóriákra meghatározott átlagos nettó alapterület figyelembevételével, és azt feltételezve, hogy az egyes határolószerkezetek hőátbocsátási tényezője megfelelt az építési évben éppen érvényes javaslatoknak/előírásnak/rendeletnek, meghatároztam az épületmodellek hőigényét és fűtési hőszükségletét és az így kapott elméleti értékeket összehasonlítottam az energetikai felmérésekből nyert valós értékekkel. Természetesen voltak épületkategóriák, melyekre azonos hőtechnikai paraméterek vonatkoztak, azonban más geometriai jellemzőkkel kellett számolni. Azonos geometriával és határolószerkezetekkel rendelkező családi házak mért energiafogyasztási adatait (villany- és gázfogyasztás) felhasználtam a lakók viselkedésének a felhasznált energiára gyakorolt hatásának vizsgálatára, valamint felújítási (dekarbonizációs) csomagok és jó példák bemutatására a családi házak dekarbonizációs lehetőségeit illetően. Figyelembe véve a piaci árakat meghatároztam az egyes dekarbonizációs csomagok költségeit. Az elvégzett kutatás lépéseit és a kutatás algoritmusát a 4. ábra mutatja be [125]. A vizsgálatok során minden

esetben a fűtési energiafogyasztásra és a fűtési energiaigényt befolyásoló hőtechnikai és energetikai jellemzőkre fókuszáltam.

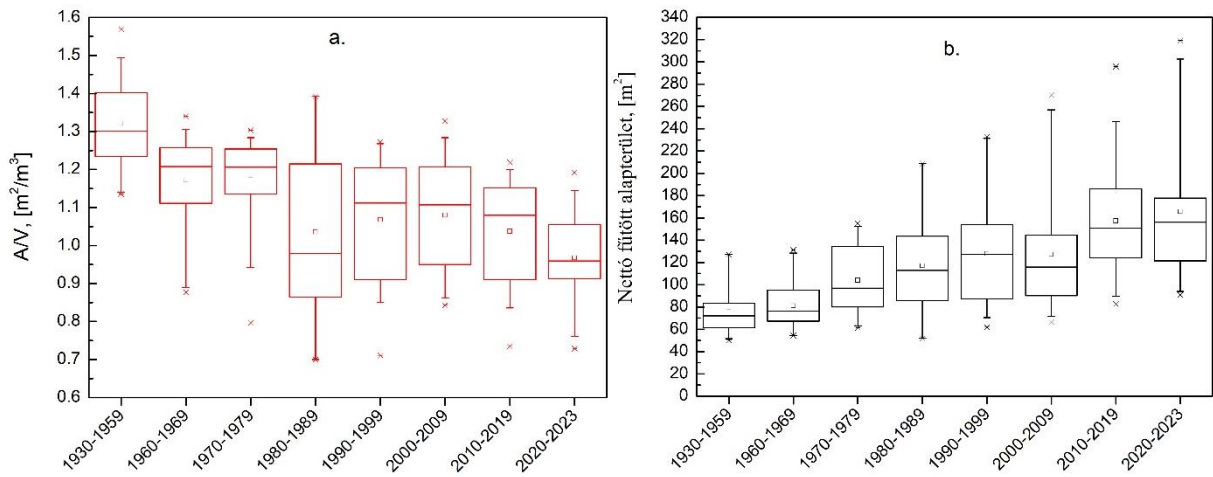


4. ábra: A kutatás lépései

7.2 Debreceni családi házak hőtechnikai jellemzői

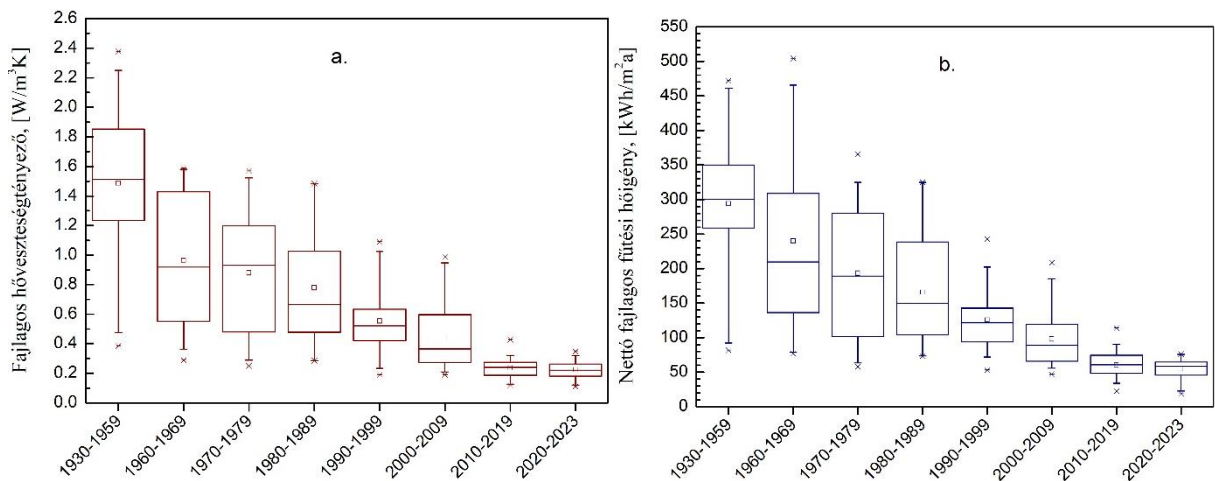
Az épületek energetikai elemzését az érvényben lévő épületenergetikai Rendelet alapján készítettem el 2017 és 2023. július között. Az elemzés alapjául szolgáló 236 családi ház 1930-2023 években épült. Az épületek határolószerkezetinek hőtechnikai paramétereit, valamint a fűtési rendszerek energetikai jellemzőit helyszíni felmérések alapján állapítottam meg. Az energetikai számításokat a WinWatt Gólya 7.63 szoftverrel végeztem el, mely integrálja az energetikai Rendelet által előírt számítási lépéseket.

A 236 családi házat az építési évek szerint nyolc kategóriába soroltam: 1960 előtt, 1960-1969 között, 1970-1979 között, 1980-1989 között, 1990-1999 között, 2000-2009 között, 2010-2019 között és 2020-2023 között épült csoport. Az épület A/V arányát, a nettó fűtött alapterületet, a fajlagos hőveszteségtényezőt, a nettó fűtési energiaigényt, valamint az épület CO₂ kibocsátást mutatják be a 5-7 ábrák [125].



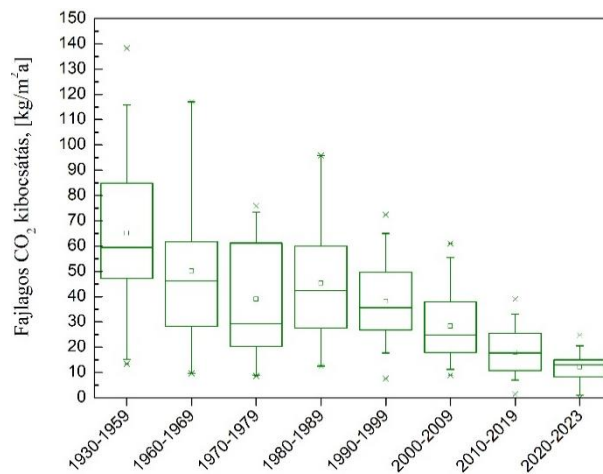
a) A/V arány; b) nettó fűtött alapterület

5. ábra: A vizsgált családi házak geometriai jellemzői kategóriánként



a) fajlagos hővesztéskoefficiens b) nettó fűtési energiaigény.

6. ábra: Fűtési energiaigényre vonatkozó adatok, kategóriánként



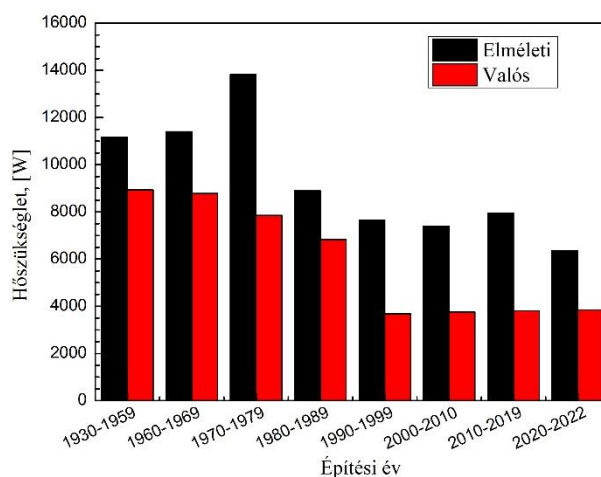
7. ábra: Fűtési széndioxid kibocsátás, kategóriánként

Ha elemezzük a vizsgált családi házak hőtechnikai és energetikai jellemzőit az alábbi tanulságokat vonhatjuk le:

- az elmúlt évtizedekben az építészek már a tervezési fázisban is figyeltek az általuk tervezett épületek energiahatékonyságára, hiszen az A/V arány folyamatosan csökken (természetesen ennek magyarázata lehet az is, hogy a növekvő igények miatt nagyobb, többszintes épületek épülnek, melyek kisebb A/V aránnyal rendelkeznek);
- a lakástulajdonosok komfort és helyigénye folyamatosan növekszik, mivel a fűtött alapterülete az újabb épületeknek egyre nagyobb;
- az egyre növekvő fűtött alapterület nem eredményezi a nagyobb fűtési energiaigényt úgy a térfogatra vetített fajlagos hőveszteségtényező, mint a nettó fűtési energiaigény csökken), ami arra utal, hogy az új épületeknél a határolószervezetekegyre jobb hőtechnikai paraméterekkel rendelkeznek;
- a megfelelően hőszigetelt épületek fűtési energiaigénye egy adott határon túl már nem csökken tovább.

Az egyes évtizedekben épült családi házak számát, illetve az adott évtizedben épült épületek átlagos széndioxid kibocsátást figyelembe véve, a debreceni családi házak fűtési széndioxid kibocsátása eléri a 289746 tonnát.

A vizsgált épületek valós hőigényei alacsonyabbak az elméleti értékeknél, amelyeket abban az esetben kapnánk, ha a határolószervezetek hőtechnikai tulajdonságai az építés évében érvényes követelményeknek felelnek meg (8. ábra, [125]), ami azt jelenti, hogy a vizsgált épületek egy része legalább egyszer hőtechnikai felújításon esett át (különösen az 1960-1969-es és az 1970-1979-es kategóriák esetében, továbbá a 2010 után épült épületek hőtechnikai paraméterei is jobbák az elvárnál. Utóbbi épületek esetében nem beszélhetünk hőtechnikai felújításról (hiszen az épületek életkora max. 12 év). Ezeket az épületeket nagy valószínűséggel az érvényben lévő követelményeknél eleve jobb hőtechnikai minőségben építették meg.



8. ábra: A vizsgált épületek hőszükséglete, kategóriánként

A közel nulla energiaigényű épületekre vonatkozó követelményrendszert 2015-ben foglalták jogszabályba azzal, hogy ezek a követelmények a 2021.01.01. után használatbavételi engedélyt igénylő lakóépületekre már érvényesek lesznek (a bevezetés végül halasztásra került). Ugyanakkor a támogatással elvégzett felújítások esetében a költségoptimum követelményeket kellett betartani. A költségoptimum épületszerkezetekre vonatkozó követelményértékei viszont megegyeztek a közel nulla energiaigényű épületekre vonatkozó követelményekkel, így a felújított épületek többségénél a határolószervezetek hőtechnikai paraméterei teljesítik a közel nulla energiaigényű épületek követelményeit. Ugyanakkor megállapítható, hogy a 2010-2019 években épült épületeknél a CO₂ kibocsátás nagyobb, mint a 2020 év után épült épületeknél. Ez annak tudható be, hogy 2010-2019 között még kisebb figyelmet kaptak a megújuló energiaforrások, míg 2020 után több épületnél is megjelennek a napelemek és a hőszivattyúk.

7.3 Felhasználói szokások hatása a fűtési energiafogyasztásra

A felhasználói szokások vizsgálatához azonos geometriával és hőtechnikai paraméterekkel rendelkező családi házakat kerestem. Végül csupán öt 2014-2020 években épült családi ház teljesítette ezeket az igényeket (9. ábra, [125]).



9. ábra: Mintaépület a felhasználói szokások elemzéséhez (b1-b5 épületek)

Az épületek fűtött alapterülete 128 ± 2 m², a külső falszerkezetek PTH30 N+F melyet 15 cm EPS hőszigeteléssel láttak el. Minegyik családi ház fűtetlen padlástérrel rendelkezik. A gerendafödém a belső oldalon gipszkartonnal, majd 20 cm ásványgyapot hőszigeteléssel és további 10 cm EPS hőszigeteléssel rendelkezik. A talajra fektetett padló mindegyik épületnél a vasbeton, vízszigetelés és egyéb rétegek mellett, 10 cm EPS hőszigeteléssel rendelkezik. Mindegyik családi házban a lakók száma öt (két felnőtt és három gyermek). A szükséges friss levegőt természetes szellőzéssel (ablaknyitással) biztosítják. A fűtési hőigényt valamint a használati melegvíz előállításához szükséges hőmennyiséget kondenzációs kazánnal állítják elő. A tervezett összesített energetikai jellemző 100 kWh/m²a volt (ez magában foglalja a fűtést, használati melegvíz előállítást és a légkondicionálást is). Mindegyik épületben két-két db. légkondicionáló van elhelyezve (egy a földszinten a nappaliban, egy pedig az emeleten). A vizsgált öt családi házban a mért éves (2022.03.01-2023.02.28) energiafogyasztás értékeit a 6. táblázat tartalmazza. A szobatermosztáton beállított belső hőmérséklet értékéről a lakástulajdonosok nyilatkoztak.

6. táblázat: A vizsgált épületek gáz- és villamosenergia fogyasztása

Épület	Belső léghőmérséklet a fűtési idény során, [°C]	Gázfogyasztás, [kWh]	Villamosenergia fogyasztás, [kWh]
b1	23	7215,55	3060
b2	26	15602,22	2679
b3	23	9123,33	3294
b4	24	10105,55	3363
b5	25	11899,99	2109

A világítást mindegyik épületben LED lámpákkal biztosítják. A sütést-főzést eltérő módon oldják meg a tulajdonosok: a b2 épületben csak földgázt használnak, míg a b1, b4 és b5 épületben kizárólag villamosenergiát használnak erre a célra. A b3 épületben földgázt használnak főzésre és villamosenergiát sütésre. A tulajdonosok nyilatkozata szerint a légkondicionáló berendezések egy év során 6-10 napot üzemelnek naponta 3-5 órát. A légkondicionáló berendezések által felhasznált villamosenergia fogyasztás 384 ± 96 kWh/a volt. A tulajdonosok nyilatkozata szerint a b5 épületben a légkondicionáló berendezéseket egyáltalán nem kapcsolták be az év során, sőt a villanytűzhelyt is csak nagyon rövid ideig

használják. Elemezve az egyes épületek villamosenergiafogyasztási adatait megállapítottam, hogy a világításra, háztartási berendezések (mikrohullámú sütő, mosógép, mosogatógép, porszívó és egyéb konyhai berendezések), a TV, a számítógépek, töltők és biztonsági rendszer üzemeltetésére évente 1500 ± 150 kWh/a energiát fordítanak. A sütésre-főzésre az éves energiafogyasztás 1200 ± 60 kWh/a. A vizsgált épületekben jelenleg nem alkalmaznak megújuló energiaforrásokat. Figyelembe véve az egyes energiahordozókra vonatkozó CO₂ kibocsátás értékeket (455 kg/kWh a villamosenergia esetében, 297 kg/kWh a földgáz esetében) az öt épületre vonatkozó átlagos széndioxid kibocsátás $4,5 \pm 0,84$ t/a ($35,3 \pm 6,6$ kg/m²a).

Az energetikai számítások során 20 °C belső hőmérsékletet kell figyelembe venni a fűtési idény során. A 7. táblázat alapján megállapítható, hogy a vizsgált épületekben nagyobb a téli időszakban a beállított belső léghőmérséklet. Ha a belső léghőmérséklet 20 °C lenne, akkor a vizsgált épületek fűtési energiafogyasztása átlagosan 4845,3 kWh/a lenne (37,9 kWh/m²a). Ez azt jelenti, hogy az öt épületre vonatkozó átlagos éves széndioxid kibocsátás 3331,2 kg/a lesz vagyis (fűtött alapterületre vetítve) 26 kg/m²a. Ez azt jelenti, hogy ezekben a családi házakban a kibocsátott széndioxid éves mennyisége (átlagos értékeket figyelembe véve) 26%-al lesz nagyobb az elméleti értéknél, azért mert a felhasználók 20 °C-nál nagyobb belső hőmérsékletet tartanak az épületekben a fűtési idény során.

Mindegyik vizsgált épületben két fürdőszoba található. Az egyik a földszinten (kézmosóval, zuhanyzóval) a másik az emeleten (fürdőkáddal és kézmosóval). Amennyiben a szabványokban megadott számítási eljárás alkalmazzuk (melegvízigény, illetve felfűtési energia), akkor a számított hőmennyiség, melyet a HMV előkészítésére fordítanak 3120 kWh/a lesz. Elemezve a mért adatokat (havi villamosenergia- és földgázfelhasználás) a nyári adatokból (amikor biztosan nincs fűtés) levezethető, hogy a HMV előállításra fordított energiamennyiség 1926,66 kWh/a (15 kWh/m²a). Megállapíthatjuk tehát, hogy a használati melegvíz előállítására fordított energiamennyiség 38,2%-al kevesebb a számított elméleti értéknél.

Annak érdekében, hogy megállapíthassuk milyen mértékű energiafogyasztás és széndioxid kibocsátás csökkenés érhető el megújuló energiaforrások felhasználásával egy hatodik családi ház energiafogyasztását is elemeztem mért értékek alapján (16. ábra, [125]).



10. ábra: Családi ház megújuló energiaforrásokkal (b6 mintaépület)

A b6 családi ház 2016-ban épület és nettó fűtött alapterülete 326 m^2 . A lakók száma szintén 5 fő (2 felnőtt és három gyermek). A külső falszerkezetek PTH30 N+F, mely 20 cm ásványgyapot hőszigeteléssel van ellátva. A padlóban 10 cm vastagságú EPS lemezeket helyeztek el, míg a padlásfödémre 30 cm vastagságban ásványgyapot hőszigetelést helyeztek el. Hőtermelőként, úgy a fűtési energiaigény, mint a használati melegvíz előállítás biztosítására talajszondás hőszivattyút alkalmaznak. 2022.03.01-2023.02.28 között az éves villamosenergiafogyasztás 9450 kWh volt. Az épületre telepített napelemes rendszer energiatermelése ugyanabban az időszakban 9280 kWh volt. Az épület nincs bekötve az országos gázhálózatba csak az országos villamosenergia hálózatba. Ha a vizsgált évet elemezzük, akkor a b6 épület a saját napelemes rendszere által megtermelt villamosenergia mellett csupán 170 kWh/a villamosenergiát (azaz $0.52 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ villamosenergiát) fogyaszt, ami összeségében $77,35 \text{ kg/a}$ szén-dioxid kibocsátás eredményez ($0,24 \text{ kg/m}^2\text{a}$). Szükséges megjegyezni, hogy a lakók nyilatkozata szerint ebben az épületben a fűtési idény alatt $26 \text{ }^\circ\text{C}$ a beállított belső léghőmérséklet. Ha figyelembe vesszük, hogy fokenként 10% fűtési energiaigény csökkenéssel számolhatunk, kijelenthetjük, hogy ez az épület több energiát termelne a saját fogyasztásánál, ha legalább $1 \text{ }^\circ\text{C}$ -al alacsonyabb belső léghőmérsékletet tartanának a téli idényben.

7.4 Felhasználható megújuló energiaforrások

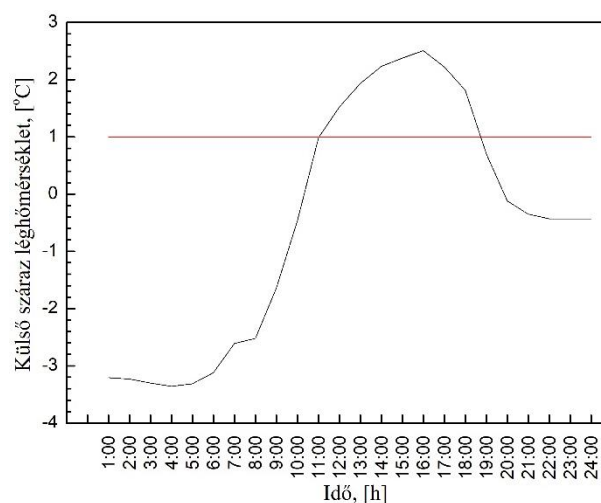
A b6 épület példája mutatja, hogy a megújuló energiaforrások racionális integrálása a családi házak energetikai rendszereibe lehet az egyik lehetőség a dekarbonizációs célok eléréséhez. Érdeemes tehát ezeket a lehetőségeket részletesebb vizsgálat alá vetni.

7.4.1 Napkollektorok

Napkollektorok alkalmazásával elsősorban a használati melegvíz előállítására fordított energiamentiséget csökkenthetjük. Déli tájolás és 35° dőlésszög mellett az éves energiatermelés $646,4 \text{ kWh/m}^2$ lehet (2 db. $2,32 \text{ m}^2$ felülettel rendelkező napkollektor). Természetesen az egyes hónapokban elérhető energiatermelés mértéke között jelentős az eltérés. A havi átlagos energiatermelés $53,86 \text{ kWh/hó}$, azonban a szórás $29,83 \text{ kWh/hó}$.

7.4.2 Levegő-víz hőszivattyúk

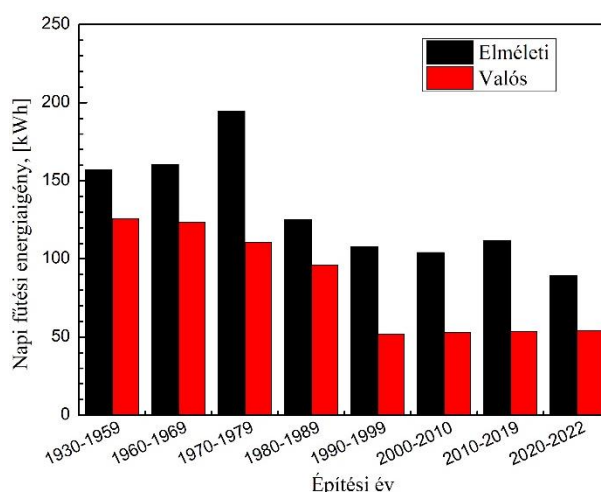
A levegő-víz hőszivattyúkat egyre nagyobb számban alkalmazzák a családi házaknál. Mivel a berendezés a külső levegő hőtartalmát hasznosítja az üzemeltetés során kihasználhatjuk a léghőmérséklet napi ingadozását annak érdekében, hogy nagyobb hatásfokkal állítsuk elő a hőenergiát. Erre azért is van lehetőség, mert a hőszivattyúk teljesítményét úgy választják meg, hogy akár $(-15)^\circ\text{C}$ mellett is biztosítsa az épület számára a szükséges hőigényt. Ennek megfelelően a $(-15)^\circ\text{C}$ hőmérsékletnél magasabb átlaghőmérséklettel rendelkező fűtési napokon a hőtermelő a szükségesnél nagyobb teljesítménnyel rendelkezik, így a napi fűtési energiát rövidebb idő alatt állítja elő. Ezt a hőmennyiséget egy megfelelően méretezett pufferben el lehet tárolni. Ha a napi hőmérséklet lefutást elemezzük, akkor megállapíthatjuk, hogy számos olyan nap van, melyeknek az átlaghőmérséklete ugyan 0°C alatti, de van olyan időszak a nap során, mikor a hőmérséklet meghaladja a $+1^\circ\text{C}$ értéket (11. ábra, [125]). Ha a hőszivattyú abban az időszakban állítja elő a napi szükséges hőmennyiséget, amikor a külső léghőmérséklet $>+1^\circ\text{C}$ akkor a berendezés adott napra vonatkozó COP értéke 3,0-nál nagyobb lesz (40°C előremenő hőmérséklet mellett), így aztán a teljes fűtési idényre vonatkozó SCOP érték is magasabb lesz.



11. ábra: A külső léghőmérséklet napi lefutása (2010.02.06).

Hőszivattyús rendszer esetében hatékonyan alkalmazhatók az alacsony hőmérsékletű sugárzó felületfűtések. A belső épületszerkezetek (födémek és válaszfalak) hőtárolásra alkalmazhatók, azonban tekintettel kell lenni a felülethőmérsékletek maximális értékeire.

A 11. ábrában bemutatott hőmérsékletlefutás alapján (napi átlaghőmérséklet $(-0,51) \text{ }^{\circ}\text{C}$) meghatároztam a nyolc épületkategóriára vonatkozó átlagos napi fűtési energiaigényt (12. ábra, [125]). A valós energiaigény az adott évtizedben a felmérés alapján meghatározott geometria és hőtechnikai paraméterek alapján került kiszámításra. Meghatároztam ugyanakkor az elméleti energiaigényt is az adott kategóriákra vonatkozóan (azonos geometriai paraméterek a valós épületekkel, de a határolószerkezetek hőtechnikai jellemzői az adott évtizedben érvényes előírás, szabvány vagy rendeletben megadott érték. Megállapítható, hogy a felmérés eredményeként kapott valós értékek alapján alkotott épületmodellek esetében a napi fűtési energiaigény 50 kWh – 155 kWh között változik.



12. ábra: Napi fűtési energiaigény, kategóriánként

Elvégeztem a szükséges számításokat és bizonyítást nyert, hogy a napi fűtési energiamennyiség puffertartályokban eltárolható, azonban a tartály térfogata eltérő: 2 m^3 az 1990 évek után épült épületeknél, még az 1959 előtt épült épületeknél 5 m^3 tartály szükséges. Ha rendszerünkben megfelelően puffereljük a napi hőmennyiséget, akkor a vizsgált napon 8,0 órás üzem elegendő a hőszivattyúnak ahhoz, hogy előállítsa a szükséges hőmennyiséget (gyakorlatilag az az időszak, amikor a külső léghőmérséklet értéke meghaladja $a+1,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ -t).

7.4.3 Talajszondás hőszivattyúk

A talajszondás hőszivattyúk telepítése nagyobb befektetési költségekkel jár, azonban nagyobb COP érték jellemzi ezeket a hőtermelőket, ami ráadásul az év során csekély mértékben változik. A gyakorlatban egy családi ház esetében két 63 mm átmérővel rendelkező 100 m mély szondát készítenek (hőforrás). A talajszonda teljesítménye elsősorban a talaj összetételétől és fizikai jellemzőitől függ [95]. Hajdú-Biharban jellemzően az 50 W/m értéke alkalmazzák, de ez számos tényezőtől függ, így egy adott szonda esetében a valós értéket csak szondatesztel lehet megállapítani. Megállapítható, hogy 50 W/m fajlagos teljesítmény mellett egy 100 m mélységű szonda már kielégítené (sőt meghaadná) a 2010 után épült és a felmérésben vizsgált családi házak hőszükségletét ((-15) °C külső hőmérséklet mellett) is (14 ábra, [125]).

7.4.4 Fotovoltaikus rendszerek

Ha a fűtési hőigény kielégítésére hőszivattyút alkalmazunk, akkor az épület villamosenergia igénye jelentősen növekszik. Optimális tájolás és dőlésszög esetében egy napelemes rendszer éves szinten megtermelheti a szükséges villamosenergia mennyiséget (beleértve a hőszivattyút is). Egy Debrecenben telepített 5 kW_p teljesítménnyel rendelkező napelemes rendszer ideális tájolás és dőlésszög esetében éves szinten 5750 kWh villamosenergiát termel, azonban a napelemek telepítéséhez 42 m² tetőfelület szükséges. Amennyiben nem áll rendelkezésre megfelelő kiterjedésű tetőfelület a napkollektorok és a napelemek együttes telepítésére, akkor a napelemes rendszert ajánlott telepíteni tekintettel arra, hogy exergetikai szempontból értékesebb energiát termel. Ugyanakkor, ebben az esetben érdemes azt is megvizsgálni, hogy az építési telken nem lenne-e mégis elegendő hely mindkét rendszer telepítésére.

7.5 Dekarbonizációs csomagjavaslatok a meglévő családi házak számára

7.5.1 b1-b5 épületek

Ezek az épületek az elmúlt évtizedben épültek, de az energiaigények kielégítésére nem alkalmaznak megújuló energiaforrásokat. Két síkkollektor (2 × 2.32 m²) beépítésével, déli tájolás és 30° dőlésszög esetében a b1-b5 épületek használati melegvíz előállításra fordított energiaigénye jelentősen csökken, hiszen az éves szinten előállított hőmennyiség 2999,3 kWh/a. Természetesen a napsugárzás energiahozamának változása miatt havonta másként

alakul az előállított hő, illetve hőigény mérleg. Márciustól októberig az előállított hő gyakorlatilag 100%-ban fedeti a hőigényt, azonban Januárban a hőigény 44,8%-át, Februárban 72,8%-át, Novemberben 69,4%-át és Decemberben csupán 31,3%-át állítja elő a rendszer. A fentebb ismertetett paraméterekkel rendelkező napkollektoros rendszer éves szinten 2902 kg/a mennyiségű széndioxid kibocsátás csökkenést eredményez a b1-b5 épületek esetében (fajlagosan 22,7 kg/m²a csökkenést érünk el).

Amennyiben a kondenzációs kazánt levegő-víz hőszivattyúra cserélik melyek szezonális hatásfoka SCOP=3,0 akkor a széndioxid kibocsátás 2347 kg/a értékkel csökkenthető (fajlagosan 18,3 kg/m²a csökkenés). Ugyanakkor az épületek villamosenergia igénye 6497 ± 899,3 kWh/a lesz. Ezt a villamosenergia mennyiséget ideális tájolás és dőlésszög esetében egy 6,5-7,5 kW_p teljesítményű napelemes rendszer elő tudja állítani.

Amennyiben a kondenzációs kazán helyett talajszondás hőszivattyút telepítenek (SCOP=4,5) akkor a széndioxid kibocsátás évente 2004,7 kg/a mennyiséggel csökkenthető (fajlagosan 15,7 kg/m²a csökkenés). Ugyanakkor ebben az esetben valamivel kisebb lesz az épületek éves villamosenergia igénye, mint a levegő-víz hőszivattyúk esetében: 5298 ± 615,5 kWh/a. Ezt az energiamennyiséget egy 4,7-8,8 kW_p teljesítményű napelemes rendszer elő tudja állítani ideális tájolás és dőlésszög esetében.

A napelemes rendszer által előállított villamosenergia mennyiség fedezi az épület villamosenergia igényét, de a megtermelt és az igényelt energiamennyiségek között jelentős az eltérés, ha ezeket havi vagy napi szinten vizsgáljuk. A megtermelt villamosenergia mennyisége folyamatosan változik a rendelkezésre álló napsugárzás függvényében, így a villamosenergia tárolás megkerülhetetlen kérdés. Jelenleg még üzemben vannak azok a napelemes rendszerek, melyek a tárolásra gyakorlatilag az országos villamosenergia hálózatot használják. Amint ez a lehetőség megszűnik gondoskodni kell a tárolásról (akkumulátorok) melyek jelentősen emelik az ilyen típusú rendszerek befektetési költségeit. Mivel kevés a tapasztalat az akkumulátoros rendszerek üzemeltetésével kapcsolatban, gyakorlatilag lehetetlen nyilatkozni e rendszerek esetében a biztonságos, megbízható energiatárolásról és folyamatos rendelkezésre állásról, illetve meghibásodási kockázatokról és karbantartási költségekről. Jelen kutatási munkám során így a továbbiakban is azt feltételeztem, hogy az épületek napelemes rendszerei csatlakoznak az országos villamosenergia hálózathoz.

Megállapítható, hogy a b1-b5 épületek esetében, amennyiben megújuló energiaforrásokat alkalmaznak a fűtési rendszerek üzemeltetéséből származó széndioxid kibocsátás éves szinten elérheti a nullát sőt negatív értéket vehet fel (az épület éves szinten több energiát állít elő megújuló energiaforrásból, mint amennyit fűtésre felhasznál).

7.5.2 1930-2023 között épült épületek

A nyolc épületkategóriára vonatkozóan az adott kategória átlagos geometriai, hőtechnikai és energetikai paramétereit alapul véve dekarbonizációs csomagokat dolgoztam ki. A vizsgálataim alapján megállapítottam, hogy a 2009 előtt épült épületek esetében nem csak a határolószervezetek hőtechnikai felújítására van szükség, hanem az épületgépészeti rendszert is teljes mértékben fel kell újítani: hőtermelő és hőleadó csere is szükséges. A tüzifa vagy földgázalapú hőtermelést hőszivattyúra kell cserélni. Az épületek határolószervezetét úgy kell felújítani, hogy felújítás után teljesüljenek a közel nulla energiaigényű épületekre vonatkozó követelmények. Napelemes rendszer telepítését javasoltam mindegyik esetben, melyet úgy méreteztem, hogy a rendszer csúcsteljesítménye egyenlő legyen a telepített hőszivattyú teljesítményével. A hőszivattyú teljesítményét úgy határoztam meg, hogy az ne csak a fűtési hőszükségletet, hanem a használati melegvíz előállításához szükséges teljesítményt is fedezze. Amint a b6 épület példája is illusztrálja, ilyen felújítások után az épületek hőigényéből származó széndioxid kibocsátás a nullához konvergál. A felújítások költségeit a 7. táblázat tartalmazza.

7. táblázat: Dekarbonizációs csomagok költségei, kategóriánként

Építési év	Átlagos fűtött alapterület, [m ²]	Teljes felújítási költség, [Euro] Levegő-víz hőszivattyú	Teljes felújítási költség, [Euro] Talajszondás hőszivattyú
1930–1959	65,5	28450	35818
1960–1969	78,7	30678	37257
1970–1979	87,4	34638	41217
1980–1989	100,6	32984	39563
1990–1999	105,8	34422	39685
2000–2009	125,6	36559	41822
2010–2019	142,4	32851	40746
2020–2023	171,7	16842	24737

Talán fontos megemlíteni, hogy jelenleg a bruttó átlagfizetés Magyarországon közel 1500 euro [96]. Amennyiben a javasolt dekarbonizációs csomagok megvalósulnának, figyelembe véve Debrecenben a családi házak számát és paramétereit, Debrecen széndioxid kibocsátása 289746 tonna/a értékkel csökkenne.

7.5.3 Az eredmények értékelése tekintettel az EU elvárásokra és a szakirodalomban közölt korábbi eredményekre

A széndioxid kibocsátás csökkentése számos országban egyik legfontosabb célkitűzés. Ugyanakkor a meglévő épületállomány rendkívül változatos hőtechnikai és energetikai szempontból. Az utóbbi években több országos épületfelújítási program is indult, de a meglévő épületállomány energetikai felújításának üteme messze elmarad a várakozásoktól. Az a tapasztalat, hogy számos országban az épületenergetikával kapcsolatos szakpolitikai döntéseket csak az épületállomány energetikai állapotának ismerete alapján tudják meghozni a döntéshozók. Annak függvényében, hogy milyen szintű döntésekről beszélünk, több ország, egy ország vagy egy országon belüli régió, megye vagy település épületállományának a felmérésére van szükség. Loga et al. például 20 Európai országra vonatkozóan készített épülettípológiát, annak érdekében, hogy az Európai Parlament és Tanács számára az épületenergetikai irányelvek kidolgozásához megfelelő alapot szolgáltatson [97]. A tanulmány alapján megállapítható, hogy Európai szinten nem lehetséges olyan közös optimális megoldás kidolgozása, amely minden ország számára külön-külön is optimális. Theodoridou et al. elemezte Görögország lakásállományát, részletes információkat szolgáltatva a tipikus kis és nagyterjedésű településekről [98]. A szerzők arra a következtetésre jutottak, hogy a nagyobb jövedelemmel rendelkező lakástulajdonosok energiafelhasználása is nagyobb volt. Ez a fajta vizsgálat ugyan nem képezte a kutatásom célját, de ha azt feltételezzük, hogy a nagyobb jövedelemmel rendelkező lakástulajdonosok lakása nagyobb alapterülettel rendelkezik, akkor kijelenthetjük, hogy Debrecenben a családi házak vonatkozásában éppen fordított a helyzet: a nagyobb jövedelemmel rendelkező lakástulajdonosok energetikai költségei kisebbek. A Magyarországi lakóépületállomány modellezését és épületenergetikai elemzését Csoknyai készítette el [99]. Tanulmányában a lakóépületállományt 23 típusba sorolta be. Javaslatokat fogalmazott meg a dekarbonizált épületállomány megerősítése delé vezető út kialakításához. Megállapította, hogy a megújuló energiaforrások alkalmazása önmagában nem elegendő, sőt ésszerűtlen kombinációban történő alkalmazásuk káros hatással bír [99]. Lupisek et al. a Csehországi épületállományra vonatkozóan közölt adatokat és elemzte a széndioxid kibocsátást különböző épületfelújítási scenáriók esetében [100]. Jelen kutatás során nem vizsgáltam épületfelújítási scenáriókat, hanem meghatároztam a jelenlegi széndioxid kibocsátás mértékét és különböző felújítási csomagokat dolgoztam ki annak érdekében, hogy a különböző időszakokban épült családi házak hőtermelésből származó széndioxid kibocsátása nulla legyen. Kijelenthető, hogy az Európai Unió dekarbonizációs céljainak elérése érdekében minden 2020 előtt épült családi

házat valamilyen szinten fel kell újítani energetikai szempontból. A befektetési költségek természetesen épületkategóriánként változók, de megállapítottam, hogy a hőszivattyúk, illetve a napelemes rendszerek telepítése elengedhetetlen. Murray et al. arra a következtetésre jutott, hogy Svájc számára a biomassza alapú hőtermelők vagy a hőszivattyúk jelentik az optimális megoldást [101]. A kutatásom során kapott eredmények alapján arra a következtetésre jutottam, hogy Magyarországon az épületek energiaellátása villamosenergia alapú kellene legyen. Természetesen a megnövekedett energiaigények miatt országos energiahálózat felújítása és bővítése elengedhetetlen. A villamosenergia derbonizációját országos szinten kell megoldani [102]. Ezen a véleménye van Conci et al. is, nevezetesen, hogy a villamosenergia termelését a helyben rendelkezésre álló megülő energiaforrások felhasználásával kell megoldani [103]. A lakástulajdonosok száma a Kelet Európai országokban magasabb. Ez Magyarország viszonylatában is igaz. Kijelenthető, hogy Magyarországon elsősorban a tulajdonos felelőssége a tulajdonában lévő lakás energiafogyasztásának csökkentése. Az energiaigények minimalizálása után a hőszivattyúkat és a napelemeket hatékonyan kell integrálni az épületek energetikai rendszerébe. Tekintettel a hazai jövedelmekre tudomásul kell venni, hogy ezek a felújítások nem valósulhatnak meg országos, regionális vagy települési támogatások nélkül. Egy átlagos éves jövedelemmel rendelkező lakástulajdonos 2,5 éves teljes jövedelme szükséges egy olyan mértékű épületenergetikai felújításhoz, melynek eredményeként a családi ház hőfelhasználásból származó széndioxid kibocsátása nullához konvergál. Az energetikai felmérések eredménye alapján megállapítható, hogy a vizsgált épületek energiaigénye 20-52%-al alacsonyabb az elméleti értéknél (amely az építési évre vonatkozó hőtechnikai paraméterek mellett adódna). Sajnos ez nem tükrözi a teljes épületállomány energetikai állapotát. A felmérések túnyomó részét ugyanis vagy újonnan épített vagy adás-vétel tárgyát képező épületekre vonatkozóan végeztem el. Feltételezhető, hogy adás-vétel előtt a lakástulajdonosok a nagyobb ár érdekében az eladás előtt hőtechnikai felújításokat is elvégeztek az épületen. Gróf et al. kimutatta, hogy egy épületben számos oka lehet a vártnál alacsonyabb energiafogyasztásnak [104]. Ezeknek nagy többsége a felhasználói szokásokból származnak. Ugyanakkor az általam vizsgált 1930-2023 időszakban épült épületeknél nem az energiafogyasztások közötti különbségekre fókuszáltam elsősorban, hanem az épület energiaigényére, valamint a térfogatra vetített fajlagos hőveszteségtényezőre, ami egyértelműen arra utal, hogy az épület kevesebb hőt igényel jelenleg, mint amennyit elméletileg kellene igényeljen, ha a határolószerkezetei az építés évében érvényes hőtechnikai szabványoknak, előírásoknak vagy rendeleteknek felelnének meg. Ez a tény arra utal, hogy a lakástulajdonosok elkötelezettek a tulajdonukban lévő családi házak energiaigényének és

fogyasztásának csökkentésében, azonban az eddig megtett lépéseik sajnos nem elegendők a dekarbonizációs célok eléréséhez. Magyarországon 2023 év végéig több mint 1,6 millió energetikai tanúsítványt készítettek és ezek eredményeként az átlagos energetikai jellemző $250 \text{ kWh/m}^2\text{a}$. 2023 november 1-ig a közel nulla energiaigényű épületekre vonatkozó energetikai jellemző követelményértéke $100 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ volt. 2023. november 1-től az összesített energetikai jellemzőre vonatkozó követelményérték $76 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ értékre csökkent és bevezetésre került a fajlagos széndioxid kibocsátásra vonatkozó követelmény is, ami jelenleg $20 \text{ kg/m}^2\text{a}$. Bene et al. 70000 energetikai tanúsítvány tanulmányozása alapján megállapította, hogy a családi házak 80% közepes vagy a közepesnél jobb minősítést kapott [105]. Mindemellett Magyarországon 2023 év végén több mint 250 ezer háztartás rendelkezett napelemes rendszerrel, melynek az összes beépített teljesítménye 2317 MW volt [106]. Megállapítható tehát, hogy az épületállomány dekarbonizációja elkezdődött, azonban a nulla kibocsátás eléréséhez meg kell győzni a lakástulajdonosokat ennek szükségességéről, valamint biztosítani kell a szükséges támogatást is.

7.5.4 Fontosabb következtetések

A 7.2, 7.3 és 7.5 alfejezetben bemutatott eredmények alapján a fontosabb következtetések:

- Az új épületek fajlagos hőveszteségtényezője, valamint a fajlagos fűtési energiaigény az elmúlt 90 év során 15,2%-ra, illetve 18,5%-ra csökkent.
- A vizsgált épületek többségét legalább egyszer már felújították hőtechnikai szempontból, mivel a hőszükséglet az elméleti értéknél 27,6-41,4%-al alacsonyabb.
- Az épületeket jellemző A/V tényező folyamatosan $p=0,05$ mellett szignifikánsan csökkent az évtizedek során, ami arra utal, hogy az építészek a tervezés során figyelmet fordítanak arra, hogy az alacsonyabb A/V tényezővel rendelkező épületek kisebb energiaigénnyel rendelkeznek.
- A nettó fűtött alapterülete az épületeknek $p=0,05$ mellett szignifikánsan növekedett az évtizedek során, míg a fajlagos fűtési energiaigény $p=0,05$ mellett szignifikánsan csökkent.
- A felhasználói szokások jelentősen befolyásolják az épületek hőfelhasználásából származó energiaigényt. A vizsgált épületek esetében a belső léghőmérséklet $20 \text{ }^\circ\text{C}$ helyett $26 \text{ }^\circ\text{C}$ -ra történő beállítása 26%-al növelte a széndioxid kibocsátást. Ugyanakkor a használati melegvíz előállításra fordított kevesebb hőfelhasználás miatt a valós széndioxid kibocsátás az elméleti értéknél 38,2%-al kisebb.

- A fűtési rendszerek méretezése során nem alkalmazhatók a 90 évvel ezelőtt megállapított tervezési hőmérsékletek. Ezek alkalmazása túlméretezéshez, illetve rosszabb energetikai hatékonysághoz vezet.
- Családi házaknál a hőszivattyúk és a napelemes rendszerek együttes alkalmazása a hőfelhasználás vonatkozásában optimális esetben nulla széndioxid kibocsátást eredményezhet.
- A javasolt dekarbonizációs csomagok alkalmazásával Debrecenben az éves széndioxid kibocsátás 289746 tonna/a értékkel csökkenthető.

8. Hajdú Bihar vármegyei (kivéve Debrecen) családi házak, debreceni panelek és többlakásos téglafalazattal rendelkező társasházak elemzése

A nemzetközi szakirodalom áttekintése során arra a következtetésre jutottam, hogy a vidéki családi házak, illetve a nagyvárosi társasházak vizsgálatát külön-külön szükséges elvégezni. Bearardi megállapította, hogy az országos energetikai elemzések és statisztikák során az épület szektort külön kellene kezelni, hasonlóképpen az iparral és a közlekedéssel, nem pedig a „harmadik szektor” keretén belül [107]. Felhívta továbbá a figyelmet az épületek energiafogyasztására vonatkozó adatok fontosságára és megbízhatóságára. Ezek elengedhetetlenek az energiastratégia alkotása során. Azt javasolta, hogy az országok azonos éghajlati és épülettechnológiai jellemzőkkel rendelkező régiókra bontva adják meg az épületenergetikai adatokat. Parshall et al. azonos véleményen voltak, mivel véleményük szerint a megyéket a legmegfelelőbb földrajzi egységek az energetikai adatok biztosításához [108]. Azzal érveltek, hogy a megyék szinten elérhetők az energetikai adatok és a megyék olyan politikai egységek, melyek képesek helyi (lokális) energiapolitika kialakítására. Néhány kutató vizsgálta az energiafogyasztást nagyvárosi és vidéki környezetben. Heinonen és Junnila bizonyította, hogy Finnországban a nagyvárosokban sokkal nagyobb az energiaintenzitás, mint a vidéki kistelepüléseken [109]. A szerzők ezt a nagyvárosokban élők jobb anyagi helyzetével magyarázták. Ugyanezek a szerzők holisztikusan elemezték a lakossági energiafogyasztási mintákat és a városi és vidéki háztartások általános lakásenergia-szükségletét Finnországban [110]. Három leginkább elterjedt épülettípus energiafogyasztását vizsgálták és arra a következtetésre jutottak, hogy vidéken kisebb az energiaigény, mint nagyvárosokban. Ezek az eredmények arra engednek következtetni, hogy nem csak építőanyagokat, az építési technológiát, illetve az energetikai követelményeket kell figyelembe venni, amikor a dekarbonizációs potenciált vizsgáljuk, hanem azt is, hogy éppen milyen jellegű településen található a vizsgált épület. Cai és Jiang lényeges különbségekre

hívta fel a figyelmet a nagyvárosokban, illetve a vidéki kistelepüléseken alkalmazott energiahordozók tekintetében [111]. Kína Shaanxi tartományában a szén nagyvárosokban a földgáz, vidéken pedig inkább a biomassza váltotta fel. Guan et al. a CO₂ kibocsátást vizsgálták bottom-up model alapján, viszont a fajlagos kibocsátást nagyvárosi és vidéki környezetben kg/fő mértékegységben határozták meg [112]. Az eredményeik azt bizonyították, hogy a nagyvárosi CO₂ kibocsátás minden esetben meghaladta a vidéki kibocsátást. Zhang et al a tanulmányukban azt mutatták ki, hogy úgy nagyvárosi, mint a vidéki településeken a CO₂ kibocsátás gyorsan és jelentősen növekedett az elmúlt évek során [113]. Ugyanakkor, a nagyvárosokban a kibocsátás növekedésének mértéke nagyobb volt, így a vidéki és nagyvárosi CO₂ kibocsátások között a különbség csökkent a vizsgált évek során. Cheshmehzangi rámutatott, hogy a nagyvárosokban az épületek felújítására számos “zöld programot” indítottak, míg vidéken az elmúlt évtizedekben ilyen jellegű lehetőségek alig voltak [114]. Zhou et al. szimulációs szoftvert fejlesztettek annak érdekében, hogy megvizsgálják az épületek CO₂ kibocsátását nagyvárosokban és vidéken [115]. Du et al. a tanulmányukban kimutatták, hogy a felújítások után az épületek energiafogyasztása (és ezáltal a CO₂ kibocsátás) nem csökkent az elvárt mértékben [116]. Ugyanakkor eltéréseket mutathatók ki nagyvárosi és vidéki környezetben: városokban az elért megtakarítások a számított érték 79,43-110%-a, vidéken 115,8-120,4%.

He et al. rámutattak, hogy Kínában az energetikai ismeretek hiánya vidéken, valamint a lakók energiatakarékossági törekvéseinek eltérése eredményezi azt, hogy a vidéki kistelepüléseken a vartál nagyobb az energiafogyasztás [117]. A vidéki települések és a nagyvárosok közötti energiafogyasztási különbségekre a városi hősziget is hatással van [118-120]. Li et al. kimutatta, hogy a városi hősziget 10-120%-al növelheti a hűtési energiaigény, illetve 3-45%-al csökkentheti a fűtési hőigényt [121]. Városokban az éjszakai szellőztetés határfoka rosszabb, mivel akár 3-4%-al is nagyobb lehet az éjszakai hőmérséklet, mint vidéki kistelepüléseken [122].

Összegezve a fent tárgyalt referenciákat, megállapítható, hogy az ambiciózus dekarbonizációs célok eléréséhez a meglévő épületállomány energetikai jellemzőit részletesen ismerni kell. Továbbá a dekarbonizációs stratégiák kidolgozásakor figyelembe kell venni a falusi és városi épületek közötti különbségeket. A foglalkoztatás, a jövedelem, az energiamix és az életmód erősen befolyásolja az energiafogyasztást. Ezek szerencsétlen kombinációja energiaszegénységhez vezethet [123]. Az elmúlt évszázadban hasonló építési politikája miatt közös vonások figyelhetők meg a kelet-közép-európai országok épületállományában. Ezekhez az országokhoz már különböző épülettípológiákat hoztak létre [80, 99, 124]. A nagyvárosi,

illetve vidéki épületek közötti különbségeket azonban eddig nem kutatták az energiafogyasztás és a CO₂ kibocsátás szempontjából. Köztudott, hogy az épület A/V aránya befolyásolja a hőigényt. Így a családi házak fajlagos hővesztesége várhatóan meghaladja a többlakásos épületekét. Céлом az, hogy megvizsgáljam Debrecen és Hajdú-Bihar megye (Magyarország) kistélepülései közötti, épületek hőigényéből származó energiafogyasztási és CO₂-kibocsátási különbségeket.

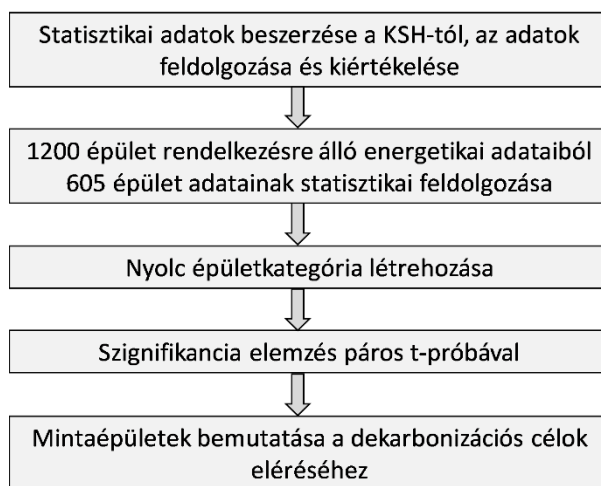
8.1 Alkalmazott kutatási módszerek

A rendelkezésemre álló 1200 energetikai elemzés és tanúsítvány feldolgozása során külön csoportosítottam azokat a családi házakat, melyek nem Debrecenben találhatóak, a debreceni panellakásokat, illetve a debreceni téglafalazattal rendelkező társasházakat. Így az előző fejezetben elemzett 236 családi ház mellett, 372 nem debreceni családi ház, 115 panellakás, valamint 118 téglafalazatú társasházban található lakás energetikai tanúsítványa volt alkalmazható. Összesen tehát 841 épület 2018-2023 közötti időszakban készült energetikai számítását, illetve tanúsítványát dolgoztam fel. Az energetikai számítások a WinWatt Gólya 7.63 szoftverrel készültek, melynek alapja a 7/2006 épületenergetikai rendelet számítási módszere volt. Az energetikai számítás adatait statisztikai feldolgozását ORIGIN LAB 9.55 szoftver segítségével végeztem el. Az eredményeket boxplot ábrázolási módban mutattam be. A debreceni családi házakra vonatkozó adatok a 7. fejezetben kerültek bemutatásra [125]. Az 1930-2023 között épült épületeket az építési év függvényében nyolc kategóriába soroltam: 1960 előtt épült épületek, majd 1960-1969, 1970-1979, 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009, 2010-2019 és 2020-2023 épült épületek. A panel épületeket csak két kategóriába tudtam besorolni: 1970-1979, illetve 1980-1989 között épült épületek.

Az A/V értékek, a nettó fűtött alapterület, a fajlagos hőveszteségtényező, a nettó fűtési energiaigény és a fajlagos széndioxid kibocsátás értékei kerültek feldolgozásra.

Páros *t* próbát alkalmaztam az eltérések mértékének vizsgálatára 95% konfidencia intervallum megbízhatósági szinten minden egyes kategóriára vonatkozóan városi családi házak, vidéki családi házak, valamint téglafalazattal rendelkező társasházak között.

Végül néhány valós épület esetében mutattam be jó példákat a széndioxid kibocsátás csökkentésére vonatkozóan. A kutatás egyes lépéseit a 13. ábra mutatja be [144].



13. ábra: Az elvégzett kutatás lépései

8.2 A vizsgált épületállomány jellemzői

Magyarországon egy átlagos háztartásban felhasznált összes energiának 71%-át a fűtésre fordított energia teszi ki [126]. Természetesen vidéken túlnyomó többségben vannak a családi házak, míg nagyvárosban jelentős a társasházak száma. A Központi Statisztikai Hivatal adatai alapján Debrecenben családi házak száma 37615, míg a társasházi lakások száma 50008, melyből 26233 panel épületben található, 26776 pedig téglá vagy más falazóblokk alapanyagú falazattal rendelkező épület. Hajdú-Bihar vármegyében összesen 208075 háztartás található [85]. Az épületek határolószervezeteit tekintve megállapíthatjuk, hogy rendkívül változatos az épületállomány. Az előírások és szabványok a határolószervezetre vonatkozó követelményeket illetően többször is változtak [127]. Ugyanakkor, az elmúlt évszázad során az egyes évtizedeket néhány fontosabb építőanyag jellemezte. Ez elsősorban a falszerkezetek esetében érzékelhető. Az 1960-as évekig a családi házak falszerkezetét elsősorban vályogból alakították ki, melyhez bizonyos mértékben szalmatöredéket adagoltak (14a. ábra). A bekevert szalmatöredék mennyisége befolyásolta a falazóblokk hővezetési tényezőjét, így ebben az esetben a falazat hővezetési tényezője 0.40-0.65 W/mK közötti érték lehet, az anyag testsűrűségének függvényében, mely 1100-1400 kg/m³ között változhat. Mivel egy külső vályogtégla fal vastagsága legtöbb esetben 40-50 cm, megállapítható, hogy a vályogfalak esetében 0,7-1,28 W/m²K hőátbocsátási tényezővel számolhatunk. A talajra fektetett padló legtöbb esetben kavicsbeton, hőszigetelő réteg nélkül, különböző burkoló rétegekkel kiegészítve. A padlásfödém, pedig favázás szerkezetű, akár 20 cm sártapasztással, melyben szintén található bizonyos mennyiségű szalma, vagy szalmatöredék.

1960-as évek után az agyagot, mint építőanyagot egyre inkább felváltotta az égetett agyagtégla (14b ábra). Ebben az esetben a hővezetési tényező 0,78 W/mK, így a 38 cm

vastagságú vakolt falszerkezet hőátbocsátási tényezője $1,43 \text{ W/m}^2\text{K}$. Az 1970-1990 közötti évtizedeket a B30 falazóblokk jellemezte (14c ábra). A hővezetési tényező $0,64 \text{ W/mK}$, így egy vakolt B30-as falszerkezet hőátbocsátási tényezője $1,47 \text{ W/m}^2\text{K}$. 1980 után már megjelentek a B30 falazóblokknak továbbfejlesztett változatai is, azonban széles körben nem terjedtek el. 1990 után HB30, HB38 falazóblokkok jelentek meg és kezdték ezeket alkalmazni, de 2000 után már a PTH család falazóblokkjait alkalmazták leginkább (14d. ábra). A 2000 évek elején a PTH falazóblokk hővezetési tényezője $0,2 \text{ W/mK}$ volt és készültek 30 cm, 38 cm, de 44 cm vastagságú falszerkezetek is. Ezeknek a falszerkezeteknek a hőátbocsátási tényezője $0,58 \text{ W/m}^2\text{K}$ (30 cm), $0,47 \text{ W/m}^2\text{K}$ (38 cm) vagy $0,41 \text{ W/m}^2\text{K}$ (44 cm). Utóbbi két esetben hőszigetelő vakolatok alkalmazásával a 7/2006 Rendelet követelménye ($0,45 \text{ W/m}^2\text{K}$) is teljesült [74].



a) Vályogfal



b) Égetett agyagtégla



c) B30 tégla



d) PTH 30 falazóblokk

14. ábra: Falszerkezetek, téglák és falazóblokkok [144]

A PTH falazóblokkokat napjainkban is alkalmazzák 15-20 cm EPS hőszigeteléssel ellátva, így $0,2-0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ hőátbocsátási tényező érhető el, és ezzel a jelenleg érvényben lévő 9/2023 ÉKM Rendelet követelményeit is teljesítik ezek a falszerkezetek [128].

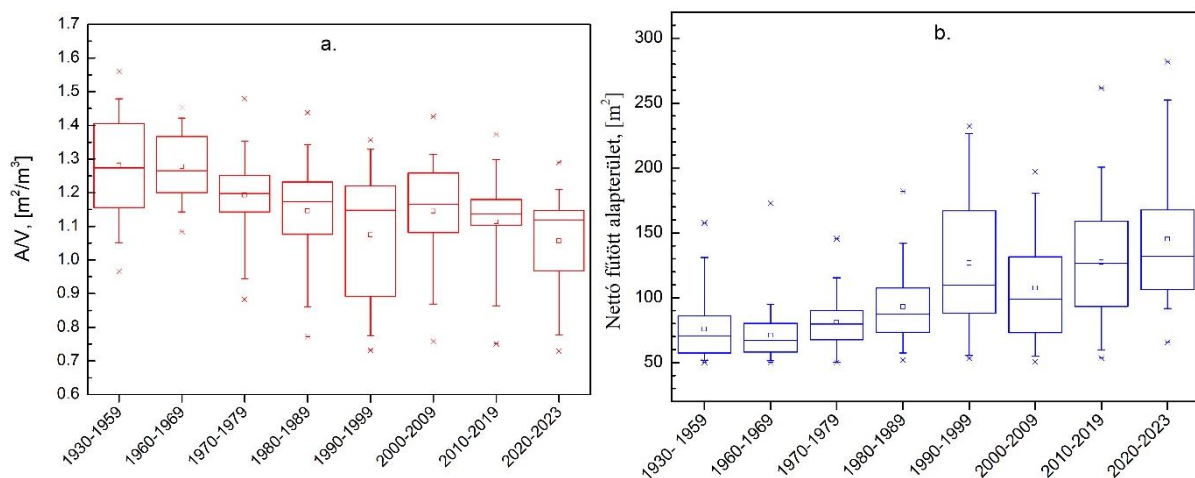
Megállapítható, hogy a vályogfalak felcserélése tömör téglá falszerkezetekre, illetve B30 falszerkezetre a hőveszteségek növekedését eredményezte, azonban a 2000 évektől alkalmazott PTH falazóblokk, illetve ennek hőszigetelt változatai már jelentős hőveszteség csökkenéséhez vezetett. Említésre méltó, hogy a 70-es és 80-as években gázsilikát

falazóblokkokat is alkalmaztak széles körben. A gázszilikát hővezetési tényezője 0,22-0,36 W/mK. A legtöbb esetben a falszerkezet 30 cm, vastagsággal rendelkezett. Az elmúlt két évtizedben pedig több könnyűszerkezetes épületet is építettek. Ezek az épületek vázas szerkezetűek (fa vagy fém), a panelek pedig gipszkarton, OSB, ásványgyapot, OSB, EPS és vakolat rétegrendben készülnek. Az 1970-1990 években Közép- és Kelet-Európában nagyszámban épültek panelépületek. Az előregyártott panelszerkezet 6-8 cm vastagságban tartalmazott EPS hőszigetelő réteget. Ezek a panelépületek több száz lakással is rendelkezhetnek. A panelelemből összeállított határolószerkezetek erősen hőhidasak ezért a külső falszerkezetek hőátbocsátási tényezője 1,04-1,796 W/m²K, egyes esetekben 1,981 W/m²K. Ezek az épületek csaknem minden esetben az adott település távfűtési rendszerére csatlakoznak. A panelépületek A/V tényezője alacsony, vagyis energetikai szempontból előnyös, azonban a rossz hőtechnikai minőségű határolószerkezetek miatt jelentős energiaigénnyel rendelkeznek.

8.3 Vidéki családi házak jellemzői

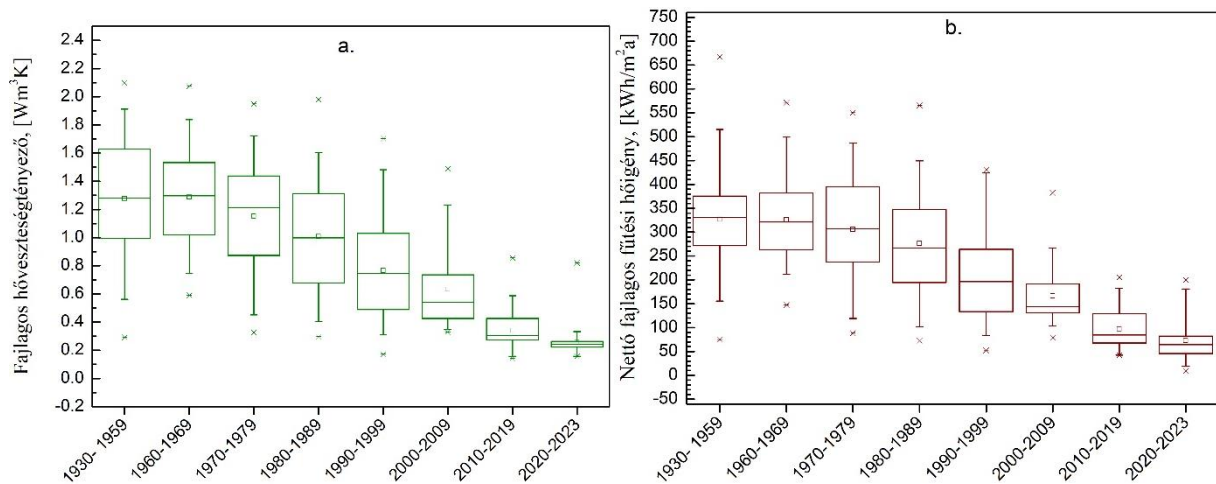
A 7. fejezetben a nagyvárosi (Debrecen) családi házak jellemzői kerültek bemutatásra [125]. Ebben a fejezetben, azonos számítási módszer alkalmazása mellett, a megyei városok, községek és falvak családi házainak jellemzői kerülnek bemutatásra. Ennek megfelelően az épületeket nyolc csoportra osztottam az építési idő szerint.

372 családi ház energetikai felmérése alapján a Hajdú-Bihar vármegyei vidéki családi házak A/V tényezőjét és nettó fűtött alapterületét, kategóriánként a 15. ábra szemlélteti [144].



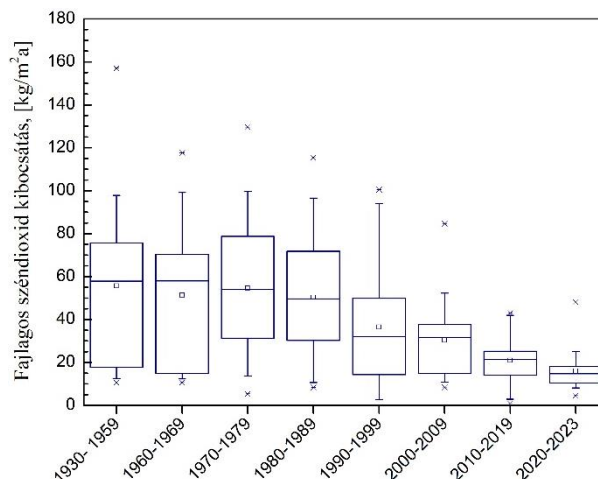
15. ábra: A/V tényező (a) és nettó fűtött alapterület (b) kategóriánként

Megállapíthatjuk, hogy az A/V tényező folyamatosan csökken az évtizedek során, azonban az egymást követő évtizedek közötti csökkenés nem szignifikáns. Ugyanakkor a legrégebbi és legújabb épületek A/V tényezői között már szignifikáns a különbség. A nettó fűtött alapterület folyamatosan növekszik és hasonlóképpen az egymást követő kategóriák közötti különbség nem szignifikáns. Viszont az 1959 előtt épült és 2020 után épült épületek nettó fűtött alapterületei között már szignifikáns a különbség. A fajlagos hővesztésgtényező és a nettó fűtési hőigény alakulását kategóriánként a 16. ábra mutatja be [144]. E két parameter esetében az évtizedek során folyamatos csökkenés tapasztalható.



16. ábra: Fajlagos hővesztésgtényező (a) és nettó fűtési hőigény (b), kategóriánként

Az épületek energiafogyasztásából származó fajlagos széndioxid kibocsátást a 17. ábra szemlélteti [144].



17. ábra: Vidéki családi házak fajlagos CO₂ kibocsátása

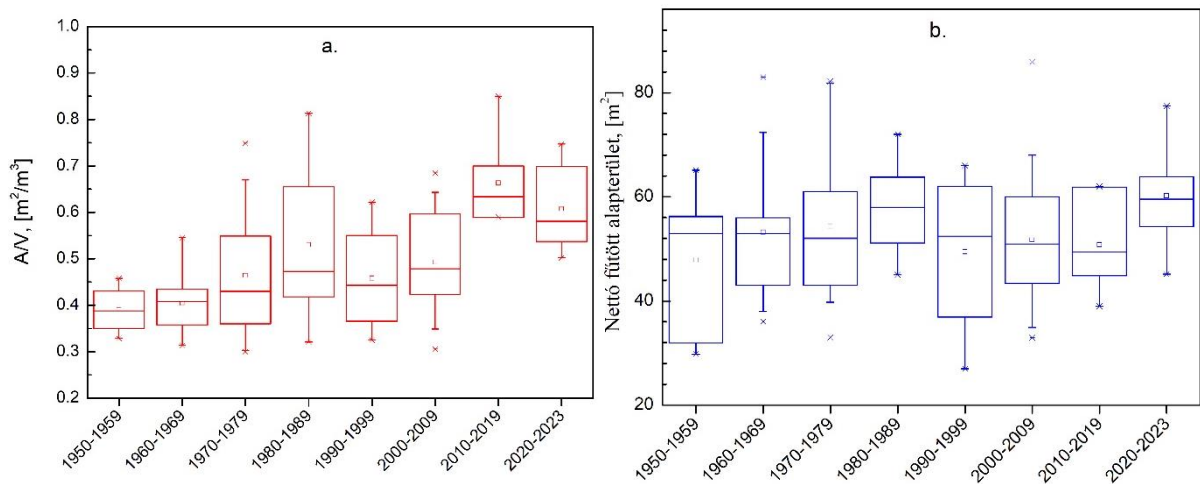
Megállapítható, hogy 1989-ig gyakorlatilag nincs különbség a kategóriák között a fajlagos CO₂ kibocsátás átlagos értékét illetően. Ezután viszont kategóriánként folyamatos csökkenés tapasztalható. Ez a hőtechnikailag jobb minőségű falazóblokkok alkalmazásának, illetve a 7/2006 TNM Rendelet követelményeinek köszönhető.

Az első épületkategóriában (1959 előtt épült épületek) található egy kiugróan magas fajlagos CO₂ kibocsátás érték. Ezt egy vegyes ülső falazatú (tömör téгла és vályog) családi ház esetében tapasztaltam, melyben ráadásul a fűtési hőigény előállítására szén, a használati melegvíz előállítására villamosenergiát alkalmaztak. A legtöbb épület esetében egyébként villamosenergiát alkalmaznak a használati melegvíz előállítására. Ugyanakkor azt is megállapíthatjuk, hogy minden egyes évtizedben vannak olyan épületek, melyek fajlagos széndioxid kibocsátása 10 kg/m²a, vagy ez alatti. A 2023 novemberben érvénybe lépett 9/2023 ÉKM Rendelet szerinti követelmény 20 kg/m²a [128]. Megállapítható tehát, hogy mindegyik vizsgált kategóriában számos épületet felújítottak hőtechnikai és energetikai szempontból mégpedig olyan mértékben, hogy még a jelenleg érvényben lévő Rendelet követelményét is messze túlteljesíti.

8.4 Téglafalazattal rendelkező többlakásos társasházak

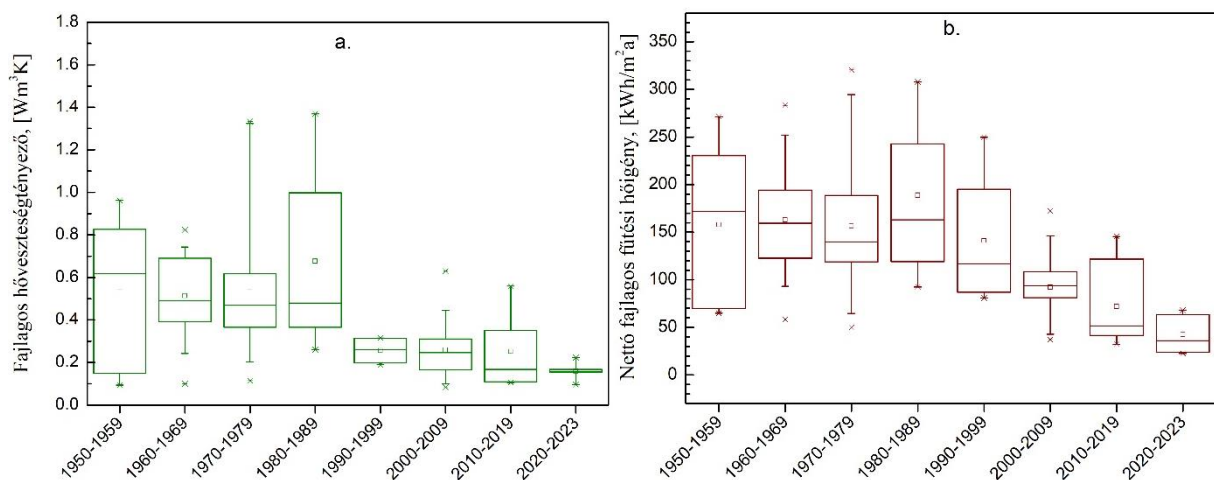
118 olyan lakás energetikai felmérését végeztem el, melyek téglafalazattal rendelkező debreceni társasházakban találhatóak. A vizsgált értékek alakulását a 18-20 ábrák mutatják be [144].

Az A/V tényező az első négy évtizedben folyamatosan növekszik, ami arra utal, hogy az első kategóriához viszonyítva egyre kisebb méretekkel és kevesebb lakásszámmal rendelkező társasházak építettek. A rendszerváltás utáni első évtizedben egy csökkenés tapasztalható (vagyis ismét nagyobb méretű és több lakásszámmal rendelkező társasházak építettek) majd ismét növekedés tapasztalható az A/V tényező értékében.



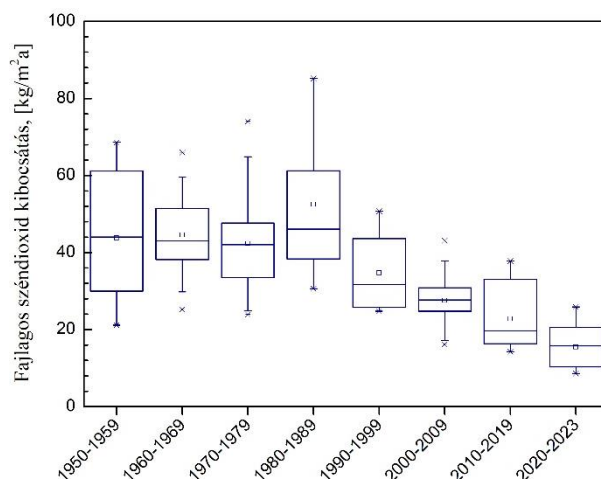
18. ábra: A/V tényező (a) és a fűtött lakás alapterület (b) téglafalazatú társasházakban

Az egyes lakások nettó fűtött alapterületét illetően ugyanaz a változás tapasztalható, mint az A/V tényező esetében. Az első négy évtizedben lassú növekedés, majd a rendszerváltás után csökkenés és utána ismét növekedés tapasztalható. Az átlagértékek vonatkozásában, szignifikáncs különbség csak az 1980-1989 és 1990-1999 között, valamint a 2010-2019 és 2020-2023 kategóriák között tapasztalható.



19. ábra: Fajlagos hővesztésgtényező (a) és nettó fűtési hőigény (b) téglafalazattal rendelkező társasházaknál

Rendkívül jól kivehető a jó minőségű falazóblokkok megjelenése és elterjedése a fajlagos hővesztésgtényezőt szemléltető ábrán. Szignifikáncs csökkenés tapasztalható az 1989 előtt épült épületek és az 1990-1999 épületkategória között. Az ezt követő két évtizedben nincs szignifikáncs változás, de 2020 után ismét szignifikáncs a csökkenés.

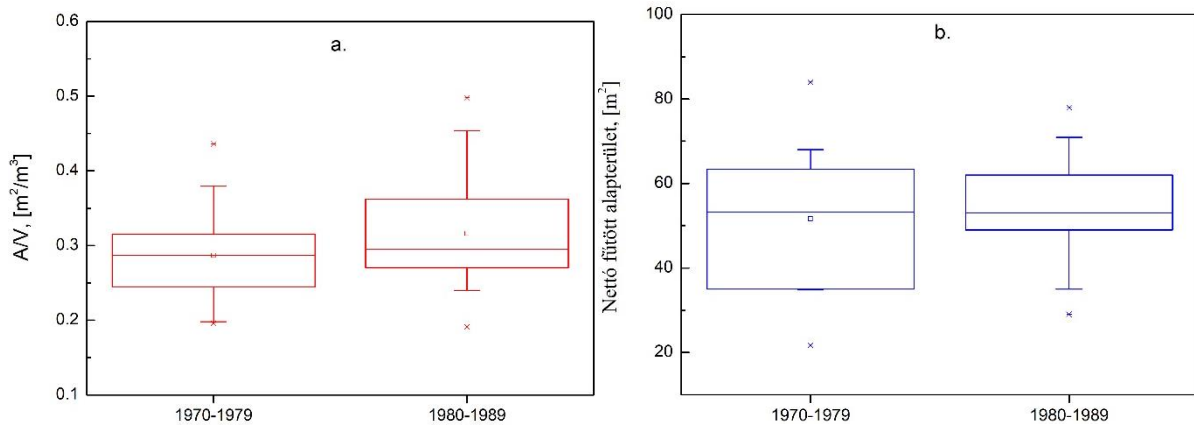


20. ábra: Téglafalazattal rendelkező társasházak fajlagos CO₂ kibocsátása

A 2020-2023 kategóriában már számos épület rendelkezik 20 kg/m²a alatti fajlagos CO₂ kibocsátással, azonban az előző évtizedekben ennél jóval magasabb értékek jellemzik a többlakásos téglafalazattal rendelkező társasházakat és nem jelennek meg (még kisebb számban sem) olyan felújított épületek, melyek a 20 kg/m²a alatti (vagy éppen a 10 kg/m²a alatti) értéket el tudják érni (szemben a családi házakkal). Az 1989 előtt épült épületekben, a legtöbb esetben, gázkonvektorral fűtik a lakásokat és villamosenergiát vagy földgázt használnak használati melegvíz előállítására. Emiatt ezeket az épületeket magas fajlagos CO₂ kibocsátás jellemzi.

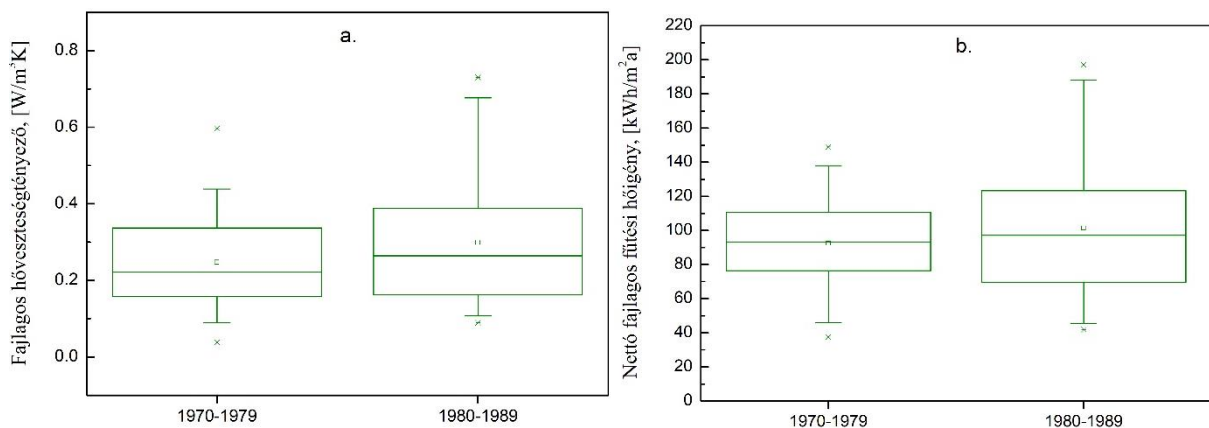
8.5 Panelépületek

A kutatás során 115 debreceni panellakás energetikai felmérése készült el. Az eredmények feldolgozása és összesítése során kiderült, hogy ebben az esetben csupán két kategóriába lehet sorolni az épületeket, mivel a vizsgált lakások 1970-1989 között épült épületekben találhatóak. Az eredményeket a 21-23 ábrák szemléltetik [144].

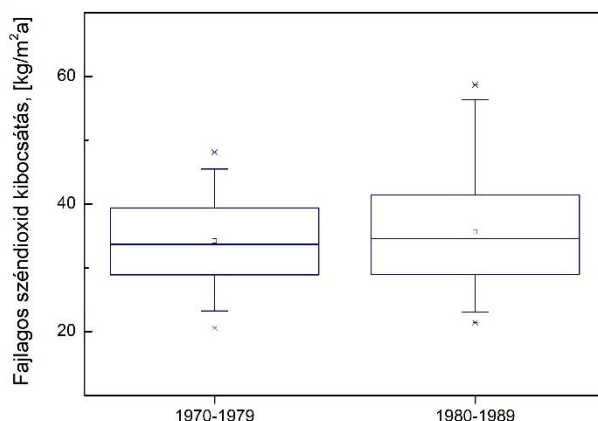


21. ábra: A vizsgált panelépületek A/V tényezője (a), illetve a lakások nettó fűtött alapterülete (b)

A vizsgált épületek túlnyomó többsége tíz vagy tizenegy szintes, de néhány épület csak ötszintes. A szendvicspanelben lévő polisztirol hőszigetelő réteg vastagsága 6-8 cm. Ami az A/V tényezőt, illetve a lakások nettó fűtött alapterületét illeti, a két kategória között nincs szignifikáns különbség. Megállapíthatjuk, hogy nincs szignifikáns különbség a panellakások és az azonos évtizedben épült a téglafalazatú épületekben található lakások között sem. A téglafalazatú többlakásos épületekhez hasonlóan, bár ebben az esetben is több épületet felújítottak hőtechnikai szempontból, nem volt olyan épület, amely 20 kg/m^2 -a alatti értéket ért volna el.



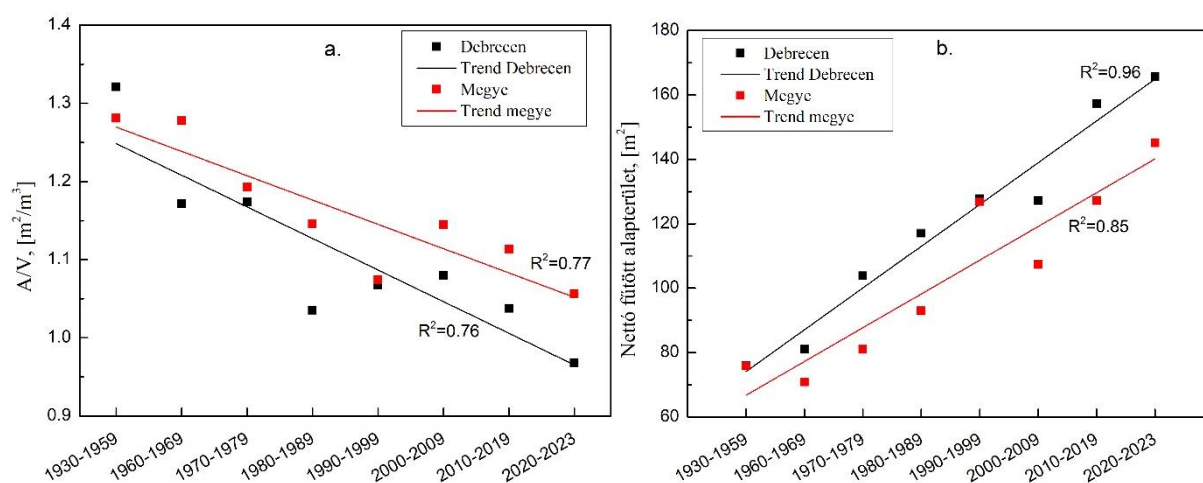
22. ábra: Fajlagos hővesztéstényező (a) és nettó fűtési hőigény (b) panelépületek esetében



23. ábra: Fajlagos széndioxid kibocsátás panelépületek esetében

8.6 Debreceni (nagyvárosi) és vármegyei (vidéki) családi házak összehasonlítása

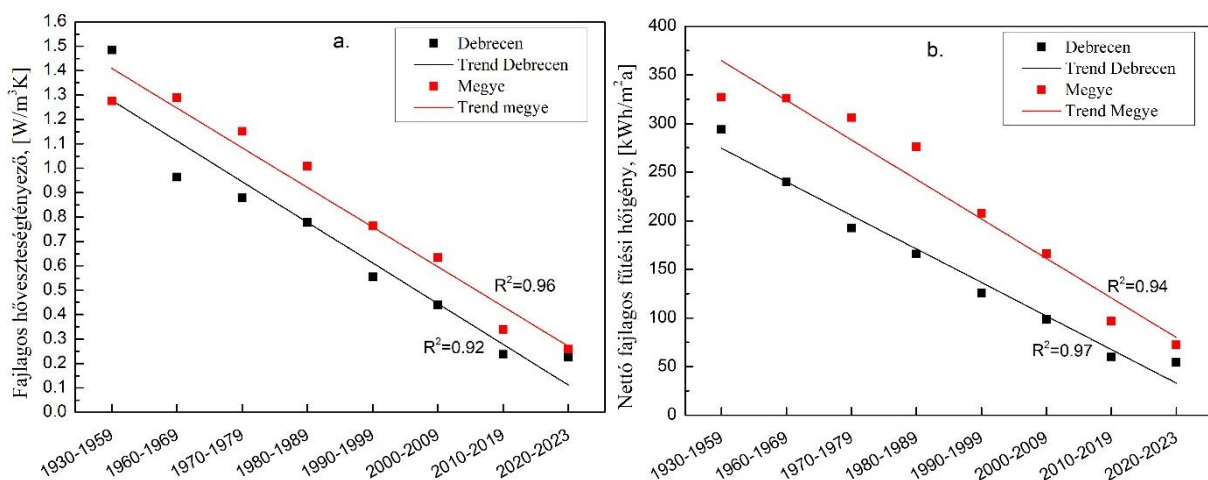
Annak érdekében, hogy érzékeltessem az évtizedek alatt történt változásokat, a vizsgált debreceni, illetve vármegyei családi házak esetében ORIGIN LAB szoftver segítségével elkészítettem a lineáris regressziós trendvonalakat és meghatároztam a trendvonalak korrigált R-négyzet értékét. Ezeket a 24-26 ábrák szemléltetik [144].



24. ábra: Az A/V tényező (a) és a nettó fűtött alapterület (b) trendvonalai, illetve a korrigált R^2 érték debreceni és vidéki családi házakra vonatkozóan

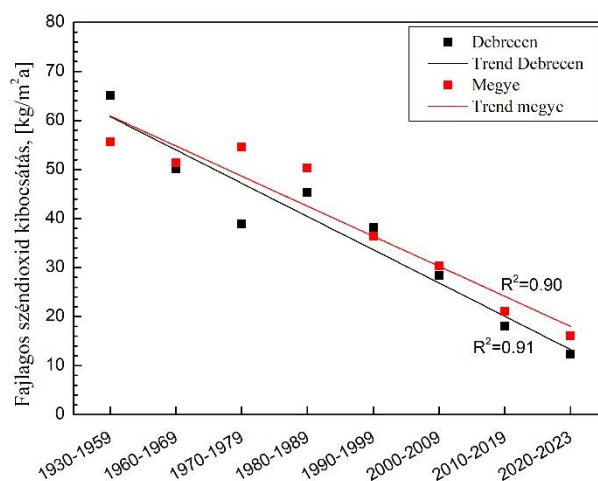
A két csoport közötti eltérést (páros t -próba) $p=0,05$ szignifikancia szint mellett végeztem el. Megállapítható, hogy az A/V tényező esetében az egyes kategóriák átlagai nagyobbak a vidéki családi házak esetében, mint Debrecenben. Ez azt jelenti, hogy nagyvárosban a családi házak kompaktabbak, mint vidéken. Ennek több oka is lehet: a kisebb/keskenyebb építési telkek miatt (és a beépítési szabályok miatt) nem egy, hanem két vagy többszintes családi házak épülnek. Feltételezem továbbá, hogy a városi családi házak esetében a tervezés

energiatudatosabb, ezért is kisebb lehet az A/V tényező. Páros t -próba alkalmazásával kimutattam, hogy $p=0,05$ szinten a két vizsgált csoport között az eltérés szignifikáns. A nettó fűtött terület esetében a nagyvárosi családi házak kategóriánkénti átlagai nagyobbak. A nagyvárosi épületek tehát nem csak tömörebbek a vidéki épületeknél, hanem nagyobb fűtött alapterülettel rendelkeznek. Páros t -próba alkalmazásával kimutattam, hogy $p=0,05$ szinten a két vizsgált csoport között az eltérés szignifikáns. A fajlagos hővesztésgtényező és a nettó fűtési hőigény trendvonalait és a korrigált R^2 értéket debreceni és vármegyei családi házak esetében a 25. ábra mutatja be [144].



25. ábra: A fajlagos hővesztésgtényező (a) és a nettó fűtési hőigény (b) trendvonalai, illetve a korrigált R^2 érték debreceni és vidéki családi házakra vonatkozóan

Megállapítottam, hogy a fajlagos hővesztésgtényező kisebb a debreceni családi házak esetében. Páros t -próba alkalmazásával kimutattam, hogy $p=0,05$ szinten a két vizsgált csoport között az eltérés szignifikáns. Továbbá megállapítottam, hogy a nettó fűtési hőigény is kisebb a debreceni családi házak esetében összevetésben a vármegye településeinek családi házaival. Páros t -próba alkalmazásával kimutattam, hogy $p=0,05$ szinten a két vizsgált csoport között az eltérés szignifikáns. A fajlagos CO_2 kibocsátást a két vizsgált csoport esetében a 26. ábra szemlélteti [144].



26. ábra: A fajlagos CO₂ kibocsátás trendvonala, illetve a korrigált R² érték debreceni és vidéki családi házakra vonatkozóan

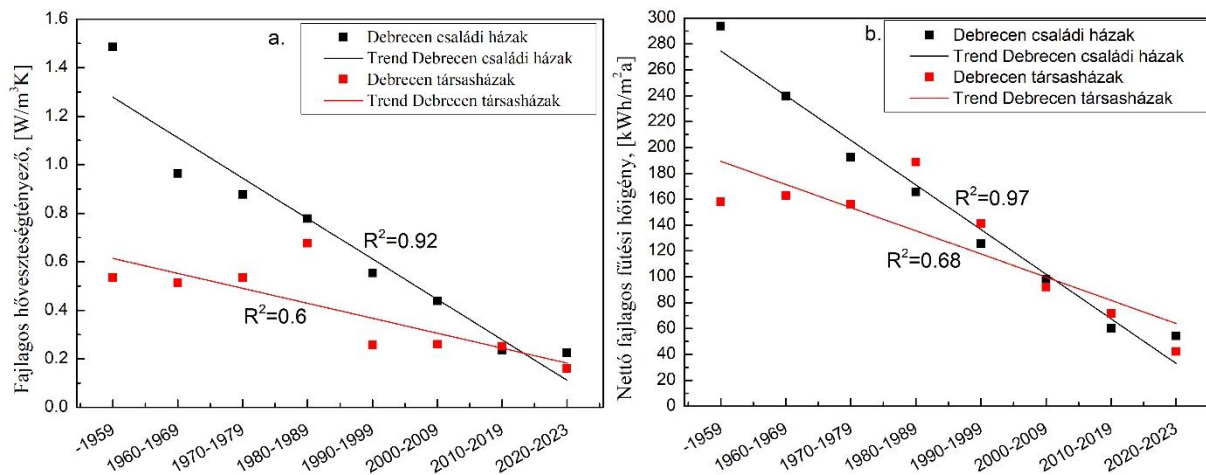
Megállapítottam, hogy a fajlagos CO₂ kibocsátás a vidéki családi házak esetében csekély mértékben haladja csupán meg a debreceni családi házakra meghatározott értéket. Páros *t*-próba alkalmazásával kimutattam, hogy $p=0,05$ szinten a két vizsgált csoport között az eltérés nem szignifikáns. Ennek okát abban látom, hogy a vidéki családi házakban széles körben alkalmaznak tüzfát vagy egyéb biomasszát, amit a földgáznál kisebb fajlagos CO₂ kibocsátás jellemez. Azonban a nagyvárosban a legelterjedtebb energiahordozó a földgáz, a fajlagos hővesztésgtényező, illetve a nagyobb nettó fűtési hőigényt kompenzálja a környezetbarátabb energiahordozó.

8.7 Debreceni (nagyvárosi) családi házak és debreceni téglafalazatú társasházak

összehasonlítása

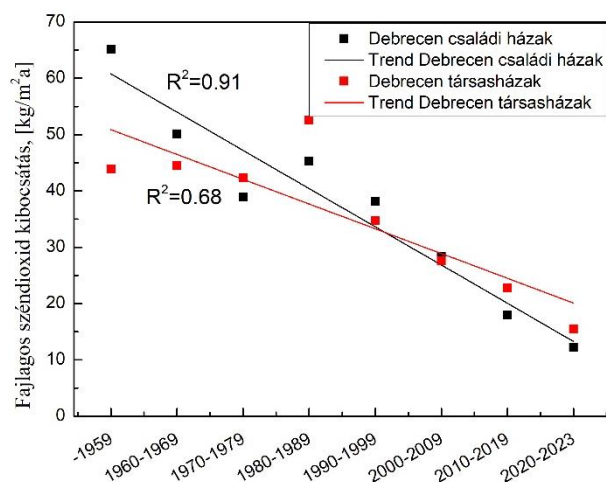
Ebben az összehasonlításban az A/V tényező, illetve a fűtött alapterület nem vizsgálható, hiszen családi házat hasonlítanánk össze társasházzal, így eleve nagymértékben eltérő értékeket vizsgálnánk. Azonban a fajlagos értékek (hővesztésgtényező, nettó fűtési hőigény és CO₂ kibocsátás) már összehasonlíthatók. Ezen értékek trendvonalait a két vizsgálati csoportban a 27. és 28. ábrák szemléltetik [144]. A vizsgált paraméterek mindkét csoportban jelentős csökkenést mutatnak a vizsgált időszakban. Megállapítható, hogy a családi házak trendvonala nagyobb dőlésszöggel rendelkezik, vagyis a csökkenés esetükben nagyobb mértékű (évtizedenként nagyobb előrelépés történt az energiatakarékosság területén). Így egy adott ponton a két trendvonal metszi egymást. Természetesen úgy a fajlagos hővesztésgtényező, mint a fajlagos nettó fűtési igény nagyobb a családi házak esetében,

azonban minkét paraméter esetében van olyan épület kategória, ahol az állapot fordított, illetve a különbségek nem szignifikánsak.



27. ábra: A fajlagos hővesztésgtényező (a) és a nettó fűtési hőigény (b) trendvonalai, illetve a korrigált R² érték debreceni családi házak és debreceni téglafalazatú társasházak esetében

Páros *t*-próba alkalmazásával kimutattam, hogy $p=0,05$ szinten a két vizsgált csoport között az eltérés szignifikáns a fajlagos hővesztésgtényező esetében és nem szignifikáns a nettó fűtési hőigény esetében. Ennek az lehet a magyarázata, hogy bár mindkét épülettípusban földgázt alkalmaznak energiahordozóként, a családi házak esetében a hőtermelés és a hőleadás nagyobb hatékonysággal történik.



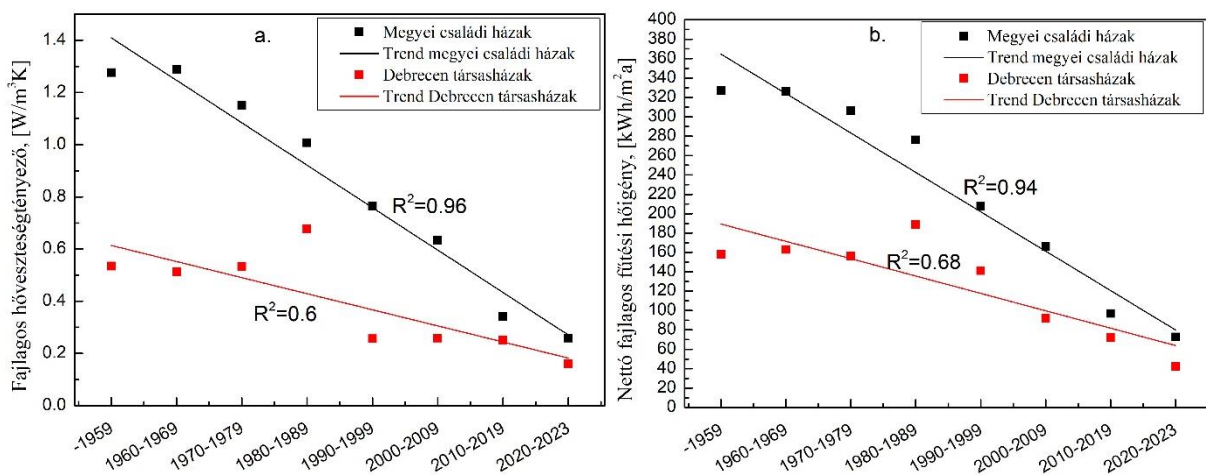
28. ábra: A fajlagos CO₂ kibocsátás trendvonala, illetve a korrigált R² érték debreceni családi házak és debreceni téglafalazatú társasházak esetében

A társasházak esetében a gázkonvektor az elterjedt fűtési mód, a családi házak esetében ezzel szemben radiátoros központi fűtés kombi gázkazánnal, vagy kondenzációs gázkazánnal a

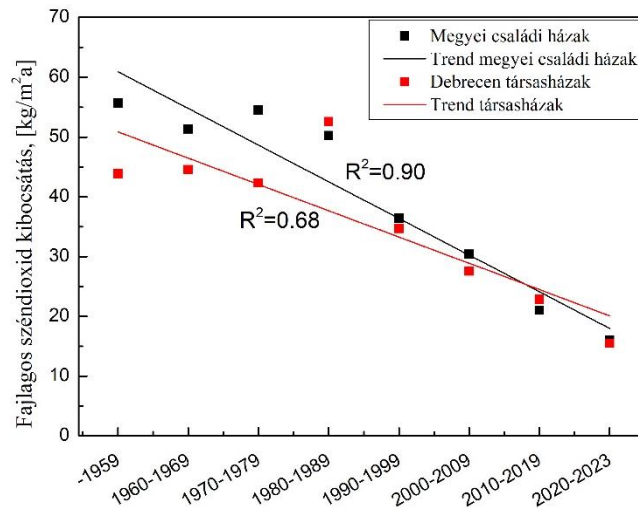
legelterjedtebb megoldások. A fajlagos széndioxid kibocsátás esetében is elmondható, hogy a társasházakra vonatkozó trendvonal laposabb, ennek megfelelően a két vonal metszi egymást. Megállapítható, hogy a családi házak fajlagos széndioxid kibocsátásának átlagos értéke a téglafalazatú társasházak átlagos fajlagos kibocsátásánál kisebb lett 2010-2023 között. Páros t -próba alkalmazásával kimutattam, hogy $p=0,05$ szinten a két vizsgált csoport között az eltérés nem szignifikáns a fajlagos széndioxid kibocsátás esetében.

8.8 Vidéki családi házak és debreceni téglafalazatú társasházak összehasonlítása

Ebben az esetben az előző alfejezetben bemutatott trendvonalakhoz és értékekhez hasonló diagramokat és eredményeket kaptam (29. és 30. ábrák, [144]). Páros t -próba alkalmazásával kimutattam, hogy $p=0,05$ szinten a két vizsgált csoport között az eltérés szignifikáns úgy a fajlagos hőveszteségtényező, mint a nettó fűtési hőigény esetében. Ugyanakkor páros t -próba alkalmazásával kimutattam, hogy $p=0,05$ szinten a két vizsgált csoport között az eltérés nem szignifikáns a fajlagos széndioxid kibocsátás esetében. Véleményem szerint ezt ismét csak a felhasznált energiahordozók közötti eltérés eredményezi: vidéken elterjedt a tűzifa és biomassza alkalmazása, míg a vizsgált társasházakban leginkább földgázt alkalmaznak (utóbbi nagyobb fajlagos CO₂ kibocsátást eredményez).



29. ábra: A fajlagos hőveszteségtényező (a) és a nettó fűtési hőigény (b) trendvonalai, illetve a korrigált R^2 érték vidéki családi házak és debreceni téglafalazatú társasházak esetében



30. ábra: A fajlagos CO₂ kibocsátás trendvonala, illetve a korrigált R² érték vidéki családi házak és debreceni téglafalazatú társasházak esetében

8.9 Panelépületek elemzése

Panel épületek vonatkozásában, melyeket két kategória adatai jellemeznek nem végezhető el ugyanaz a szignifikancia vizsgálat. Az átlagos A/V érték 0,286 m⁻¹ (SD=0,055) az 1970-1979 évtizedben, illetve 0,316 m⁻¹ (SD=0,065) az 1980-1989 időszakban épült épületek esetében. Az átlagos fajlagos hővesztésgtényező 0,247 W/m³K (SD=0,122) az 1970-1979 évtizedben, illetve 0,298 W/m³K (SD=0,161) az 1980-1989 időszakban. Az átlagos fajlagos nettó hőigény 92,4 kWh/m²a (SD=27,92) 1970-1979 közötti, illetve 101,38 kWh/m²a (SD=38,27) 1980-1989 közötti épületek esetében. A fajlagos széndioxid kibocsátás 38,18 kg/m²a (SD=7,26) 1970-1979 között épült és 35,63 kg/m²a az 1980-1989 között épült épületek esetében. Szükséges megemlíteni, hogy csaknem az összes vizsgált panelépület a városi hőszolgáltató távfűtési rendszerére csatlakozik, ahol a hőmennyiség túlnyomó részét földgáz felhasználásával állítják elő. Ha megvizsgáljuk, hogy ugyanazokban az évtizedekben a téglafalazatú többlakásos társasházak esetében hogyan alakult a fajlagos széndioxid kibocsátás, akkor 42,35 kg/m²a (SD=12,62), illetve 52,55 kg/m²a (SD=18,05) értékeket találunk. Debreceni családi házakra az 1970-1979 időszakban 38,97 kg/m²a (SD=21,55), az 1980-1989 időszakban pedig 45,31 kg/m²a (SD=23,38) értékek vonatkoznak. A vármegyei vidéki családi házak esetében ezek az értékek 54,53 kg/m²a (SD=30,17) illetve 50,25 kg/m²a (SD=26,73). Megállapítottam, hogy a panelépületek az építés évtizedeiben korszerű, energiatakékos megoldásnak számítottak, hiszen a fajlagos széndioxid kibocsátásuk jelentősen kisebb volt, mint a családi házak, illetve a téglafalazattal rendelkező társasházak fajlagos széndioxid kibocsátása. Ugyanakkor, úgy a családi házaknál, mint a téglafalazatú

társasházaknál jelentős előrelépések történtek az elmúlt évtizedek során az épületek energiahatékonyságát illetően. Ezzel szemben a panelépületeknél, a panelprogramok ellenére az energiahatékonyság oly mértékű növelése, hogy a fajlagos széndioxid kibocsátás $20 \text{ kg/m}^2\text{a}$ érték alá csökkenjen egyelőre még várat magára. Ennek elsődleges oka az energiaellátás. Az épület külső szerkezeteit megfelelő módon fel tudják újítani, hogy azok megfeleljenek a jelenleg érvényben lévő követelményeknek, azonban az energiaellátást továbbra is a hőszolgáltató biztosítja, így a lakástulajdonos nem tudja közvetlenül befolyásolni a primerenergia átalakítási tényező értékét. Még azokban a mintavárosokban is, ahol a távhőszolgáltatás hőforrása biomassza erőmű, vagy geotermikus rendszer a kiterjedt rendszer hőveszteségei, illetve a többletenenergia igények miatt a primerenergia átalakítási tényező meghaladja a megújuló energiaforrásokat jellemző nulla értéket. Ugyanakkor, Szentes város esetében a primerenergia átalakítási tényező jelen pillanatban $0,023$, ami már nagyon közel áll az ideális nulla értékhez. Sajnos ez az érték a napelemekkel termelt villamosenergia elszámolási szabályok miatt várhatóan növekedni fog a jövőben.

8.10 Jó példák

A felmért és elemzett 841 épület és lakás között beazonosíthatók olyan megoldások, melyek alapján igazolható, hogy az épületek hőfelhasználásának vonatkozásában, éves mérlegben elérhető a nulla CO_2 kibocsátás, sőt családi házak esetében negatív értékek is produkálhatók (feltételezve, hogy a szolgáltató a napelemekkel termelt villamosenergiát átveszi).

8.10.1 Családi házak

Úgy a nagyvárosi, mint a vidéki családi házak esetében a napjainban elérhető legalább 30 cm vastagságú falazóblokkok alkalmazása mellett legalább 15 cm vastagságú hőszigetelő réteg szükséges. A padlásfödém vagy lapostető legalább 30 cm , a talajra fektetett padló vagy pincefödém legalább 10 cm vastagságú hőszigetelő réteget igényel. A nyílászárók $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ alatti hőátbocsátási tényezővel kell rendelkezzenek. Ezekkel a határolószerkezetekkel elérhető a $0,2 \pm 0,04 \text{ W/m}^3\text{K}$ fajlagos hőveszteség tényező. Vidéken fa és/vagy biomassza energiahordozó esetében puffertárolót szükséges beépíteni. A felsorolt feltételek mellett, időjárásfüggő szabályozással ellátott központi fűtési rendszer esetében, $9,8\text{-}10,6 \text{ kg/m}^2\text{a}$ CO_2 kibocsátás érhető el. Nagyvárosokban a fa-, illetve biomassza tüzelés elkerülendő, így a levegő-víz hőszivattyú alkalmazásával $10,0 \pm 0,4 \text{ kg/m}^2\text{a}$ CO_2 kibocsátás érhető el. $5,1 \text{ kW}_p$ naplemes rendszer beépítésével a fajlagos széndioxid kibocsátás $4,0 \pm 0,4 \text{ kg/m}^2\text{a}$ értékre

csökkenthető, míg $15,0 \text{ kW}_p$ napelemes rendszer esetében elérhető a $-11,8 \text{ kg/m}^2\text{a}$ fajlagos CO_2 kibocsátás is.

8.10.2 Téglafalszerkezettel rendelkező társasházak

Egy ötszintes, 48 lakásos, B30 falszerkezetű társasházat két lépésben újítottak fel. Az épület lapostetővel rendelkezett 20 cm vasbeton és 15 cm átlagos vastagságú perlibeton réteggel. A pince feletti födém hőszigetetlen vasbeton szerkezettel rendelkezett. Az épület nettó fűtött alapterülete $2486,1 \text{ m}^2$, az A/V tényező 0,52. A nyílászárók elavultak, $2,5\text{-}3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ hőátbocsátási tényezővel rendelkeztek. A fajlagos hőveszteségtényező $0,871 \text{ W/m}^3\text{K}$, a nettó fajlagos fűtési hőigény $251,67 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ volt. A fűtést gázkonvektorokkal, a használati melegvíz előállítását pedig átfolyós gázmelegítővel biztosították. A fajlagos CO_2 kibocsátás $58,8 \text{ kg/m}^2\text{a}$ volt. Az épületenergetikai felújítás első lépéseként a falszerkezetet 12 cm EPS hőszigeteléssel látták el, a lapostetőre 15 cm, a pincefödémre 10 cm EPS hőszigetelő réteg került. A régi ablakokat $1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$ hőátbocsátási tényezővel rendelkező korszerű ablakokra cserélték, a bejárati ajtó cseréje is megtörtént. A fajlagos hőveszteségtényező ezzel $0,189 \text{ W/m}^3\text{K}$, a nettó fajlagos fűtési hőigény pedig $34,11 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ lett. A szükséges hőt lapostetőre elhelyezett levegő-víz hőszivattyúval állították elő, a központi fűtési rendszer puffer tárolóval, $55/45 \text{ °C}$ előremenő/visszatérő hőmérséklettel és időjárásfüggő szabályozással rendelkezett. A használati melegvizet külön közvetett módon fűtött központi tárolóban állították elő. A fajlagos széndioxid kibocsátás $10,82 \text{ kg/m}^2\text{a}$ értékre csökkent (ami csaknem fele a jelenleg érvényes követelménynek). Az energetikai felújítás második lépése a napenergia hasznosítására fókuszált. A lapostető összfelülete $702,1 \text{ m}^2$. A tetőre egy $47,3 \text{ kW}_p$ fotovoltai rendszer került telepítésre (egy panel teljesítménye 430 W , a panelsorok közötti távolság $1,71 \text{ m}$, $1,0 \text{ kW}$ teljesítmény helyigénye $8,78 \text{ m}^2$, a dőlési szög 20° , D-i tájolás). Az új szabályozásnak megfelelően 100 kWh tárolókapacitás került beépítésre. A teljes rendszer helyigénye 450 m^2 . Ezen kívül 10 m^2 napkollektor került még a tetőre, D-i tájolással és 40° dőlésszöggel. Ezzel az épület fajlagos CO_2 kibocsátása $2,59 \text{ kg/m}^2\text{a}$ értékre csökkent. Megállapítható, hogy elérhető lenne ezen gépészeti megoldásokkal a nulla széndioxid kibocsátás, amennyiben az energetikai felújítások első lépéseként a falszerkezetekre legalább 15 cm, a tetőszerkezetre pedig legalább 25 cm vastagságú utólagos EPS hőszigetelés került volna elhelyezésre.

8.10.3 Panelépületek

Panelépületek esetében az a megkötés, hogy ezek a nagyszámú lakással rendelkező épületek esetében a hőigényt a nagyvárosok távfűtési rendszerei biztosítják. Ennek megfelelően a lakók nem tudnak beavatkozni a hőtermelési, hőszállítási folyamatokba, ezek a hőszolgáltató cég feladatai. A mintaépület 88 lakásos, 0,302 A/V tényezővel és 5579,37 m² fűtött alapterülettel rendelkezik. A felújítás előtt a szendvicspanel szerkezete: 15 cm vabeton, 5 cm EPS polisztirol és 7 cm vasbeton. A lapostető 20 cm vasbeton és 15 cm átlagos vastagságú perlibeton réteggel, a pincefödém hőszigetetlen vasbeton szerkezettel rendelkezett (a szokásos burkolórétegekkel). A fűtési rendszer egycsöves, átkötő-szakaszos, a külső hőmérséklet függvényében szabályozott. Az előremenő/visszatérő hőmérsékletek 90/70 °C, a radiátorok termosztatikus szelepekkel rendelkeztek. A használati melegvíz közvetett fűtésű tárolókban került előállításra. A távfűtési rendszer primerenergia átalakítási tényezője 1,26 volt. Az épület fajlagos hőveszteségi tényezője 0,509 W/m³K volt, a nettó fűtési energiaigény pedig 160,6 kWh/m²a. A fajlagos széndioxid kibocsátás 44,9 kg/m²a volt. Az épület energetikai felújítása során a külső falszerkezeteket 12 cm vastagságú, a lapostetőt 20 cm vastagságú, a pincefödémeket pedig 12 cm vastagságú EPS utólagos hőszigeteléssel látták el. A felújított épület fajlagos hőveszteségtényezője 0,102 W/m³K lett, a fajlagos nettó fűtési energiaigény pedig 25,78 kWh/m²a értékre csökkent. A tetőn a fűtési és használati melegvíz rendszer villamos segédenergiájának fedezésére egy 4,0 kW_p fotovoltaikus rendszer került elhelyezésre, melyhez szükséges egy 8,0 kWh tárolóegység. Amennyiben a távfűtési rendszer számára biomassza alapú hőerőmű, vagy geotermikus alapú hőforrások szolgáltatnák a hőenergiát, akkor a primerenergia átalakítási tényező 0,5394 értékre csökkenthető. Ha a szivattyúk napelemmel termelt villamosenergiát használnak, akkor természetesen ez az érték tovább csökkenthető (jelenleg Szentes esetében ez az érték 0,023). Az épület fűtési rendszerében keringetett melegvíz előremenő/visszatérő hőmérséklete 75/55 °C-ra csökkenthető. Ezekkel a peremfeltételekkel a fajlagos széndioxid kibocsátás 22,99 kg/m²a lenne. Megállapítható, hogy a panelépületekben is teljesíthető a jelenleg érvényben lévő 20 kg/m²a követelmény, azonban a nulla fajlagos CO₂ kibocsátás (főleg a 10-11 szintes épületek esetében) még nem. A távfűtési rendszerek hőveszteségei és segédenergia igénye, a napelemekkel termelt villamosenergia tárolása ugyanis jelenleg nem teszi lehetővé a nullaértékű primerenergia átalakítási tényező alkalmazását a számítások során még akkor sem, ha a szállított hő megújuló energiaforrásokból származik.

8.11. Fontosabb eredmények, összefoglalás

372 megyei családi ház, 115 panellakás és 118 téglafalazattal rendelkező többlakásos társasházi lakás energetikai vizsgálata alapján, figyelembe véve a 7. fejezetben vizsgált 236 debreceni családi ház energetikai adatait is, az eredményeket az alábbiak szerint foglaltam össze:

- Hajdú-Bihar vármegyében úgy a nagyvárosi, mint a vidéki környezetben a családi házak A/V tényezője csökken az évtizedek során, viszont Debrecenben a csökkenés nagyobb mértékű. A nettó fűtött alapterület úgy Debrecenben, mint a vidéki településeken növekszik, azonban a növekedés jelentősebb a nagyvárosban. Páros t -próba alkalmazásával bizonyítottam, hogy $p=0,05$ szinten a debreceni és a vidéki családi házak közötti különbség szignifikáns, úgy az A/V, mint a fűtött alapterület vonatkozásában.
- Hajdú-Bihar vármegyében a vidéki családi házak esetében az 1960 előtt, illetve a 2020 után épült épületek fajlagos hőveszteségtényezői közötti arány 6,7 Debrecenben, és 5,4 vidéki épületekben. Ugyanez az arány a nettó fajlagos fűtési hőigény esetében 5,4 a debreceni családi házak esetében és 4,5 a vidéki családi házak esetében. A trend tehát hasonló a két csoportban, azonban ezek a paraméterek szignifikánsan nagyobbak a vidéki családi házak esetében.
- Hajdú-Bihar vármegyében a fajlagos széndioxid kibocsátások aránya 5,3 Debrecenben és 3,5 vidéki családi házak esetében. Páros t -próba alkalmazásával bizonyítottam, hogy $p=0,05$ szinten a debreceni és a vidéki családi házak közötti különbség nem szignifikáns a fajlagos széndioxid kibocsátás vonatkozásában. Megállapítottam, hogy a debreceni családi házak hőtechnikai és energetikai paraméterei jobbak azonban a fajlagos széndioxid kibocsátás esetében a különbség nem szignifikáns. Ez annak tudható be, hogy 2000-ig vidéken inkább a tűzifa és a biomassza az elterjedt energiahordozó, nagyvárosban azonban a földgáz. Az új építésű épületekben úgy a vidéki, mint a nagyvárosi épületekben egyre nagyobb a hőszivattyúk aránya.
- Debrecenben a téglafalazattal rendelkező többlakásos családi házak esetében a vizsgált időintervallumban a fajlagos hőveszteségtényező csökkenése 3,5-szörös, a nettó fűtési hőigény csökkenése 3,7-szeres a fajlagos széndioxid kibocsátás csökkenése pedig 2,8-szoros. Összehasonlításban a debreceni családi házak jellemzőivel, megállapítottam, hogy a $p=0,05$ szinten a különbségek csak a fajlagos hőveszteségtényező esetében szignifikánsak. A vidéki családi házakkal történt összehasonlításban, $p=0,05$ szinten a

fajlagos hőveszteségtényezők és a fajlagos nettó fűtési energiaigények közötti eltérések is szignifikánsak.

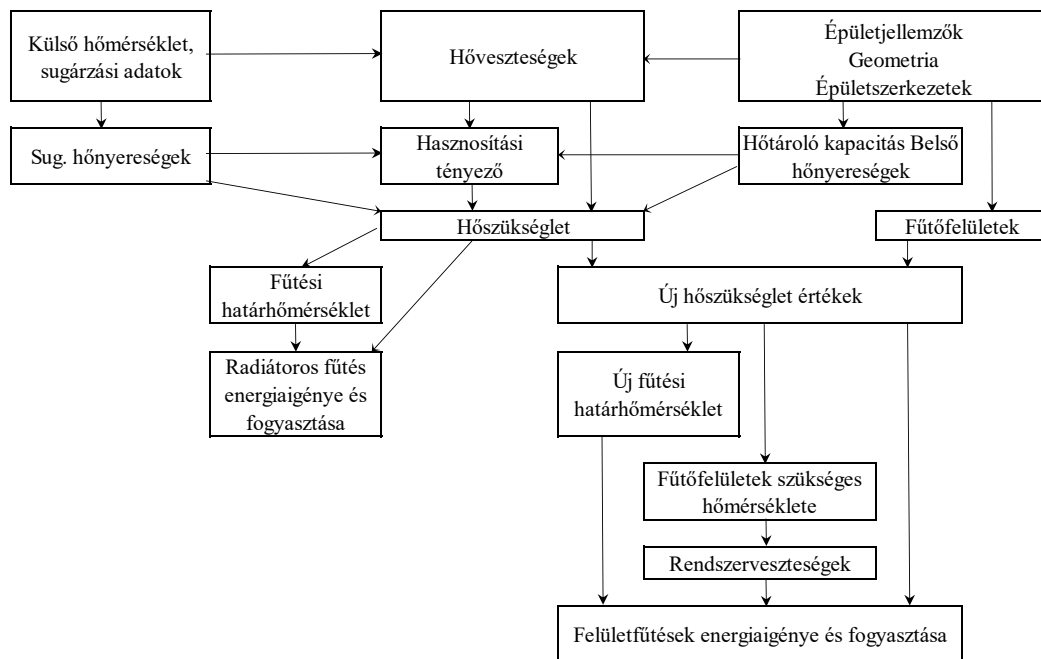
- Az építés időpontjában (1970-1989) Hajdú-Bihar vármegyében a panelépületek a legjobb hőtechnikai és épületenergetikai jellemzőkkel rendelkeztek. Ezek az épületek túlnyomó részben távfűtési rendszerre kapcsolódnak. A távfűtési rendszerek azonban nagy mennyiségű segédenergiát igényelnek, illetve jelentős hőveszteséggel rendelkeznek. Emiatt összességében az energiahatékonyság és a széndioxid kibocsátás vonatkozásában is a panelépületek jelenleg az utolsó helyen állnak a vizsgált épülettípusok között.
- Úgy a vidéki, mint a nagyvárosi családi házak esetében, hőszivattyús hőtermelés és megfelelően méretezett energiatárolós napelemes rendszer alkalmazásával (tehát a napjainkban ismert és elérhető technológiák alkalmazásával) elérhető a nulla széndioxid kibocsátás és akár a pozitív energiamérleg is. Ez megvalósítható a téglafalazattal rendelkező többlakásos társasházak esetében is, azonban a panelépületeknél úgy az energiamérlegnek, mint a fajlagos széndioxid kibocsátásnak is van egy alsó határa, melynél a jelenleg ismert technológiák mellett ezek a paraméterek nem csökkenthetők tovább.

9. Alacsony hőmérsékletű felületfűtések hőveszteségei

Az energiamegtakarítási törekvésekkel egyidőben kiemelt figyelmet kell fordítani az épületben tartózkodók komfortérzetére is. Rhee et al. szerint a felületfűtések és hűtések előnyösek úgy energetikai, mint hőérzeti szempontból is, [54]. Hesaraki és Huda szerint összevetésben a légfűtésekkel az alacsony hőmérsékletű felületfűtések alkalmazásával 10-30% energiamegtakarítás érhető el és jobb hőérzeti viszonyok biztosíthatók. Amennyiben a felületfűtések (fal-, padló-, mennyezet-) a külső szerkezetekben helyezik el, akkor ezek megszüntetik a transzmissziós hőveszteségeket az adott szerkezeteken, mintegy hőgátként működnek, mivel a belső léghőmérsékletnél feltétlenül magasabb (vagy legalább azonos) hőmérséklettel rendelkeznek. Ugyanakkor a fűtési rendszer hőveszteségei növekednek, mivel a fűtőfelületek által leadott hő egy része nem a belső tér felé, hanem a külső tér felé áramlik. Li et al. bemutatják hogyan alakulnak a rendszer hőveszteségek egy mennyezetfűtés/hűtés esetében [130]. A felületfűtések esetében kiemelt figyelmet kell fordítani a hőveszteségekre is, hiszen ezek is jelentősek lehetnek és hozzájárulnak az épület által kibocsátott összes széndioxid mennyiséghez. Ebben a fejezetben a „hagyományos” radiátoros fűtés és az alacsony hőmérsékletű felületfűtés hőveszteségeit hasonlítom össze egy családi ház esetében.

9.1. A számítások peremfeltételei, lépései

Figyelembe véve az épület és a fűtési rendszer hőtehetlenségét az energetikai számításokat napi szinten végeztem el. A vizsgált időszak szeptember 1.–április 30., tehát összesen 242 nap. Az elmúlt 20 évre vonatkozó hazai hőtechnikai követelményeket és a 2009-2013 években mért debreceni éghajlati paramétereket vettem figyelembe. A kutatási algoritmust a 31. ábra mutatja be [93].

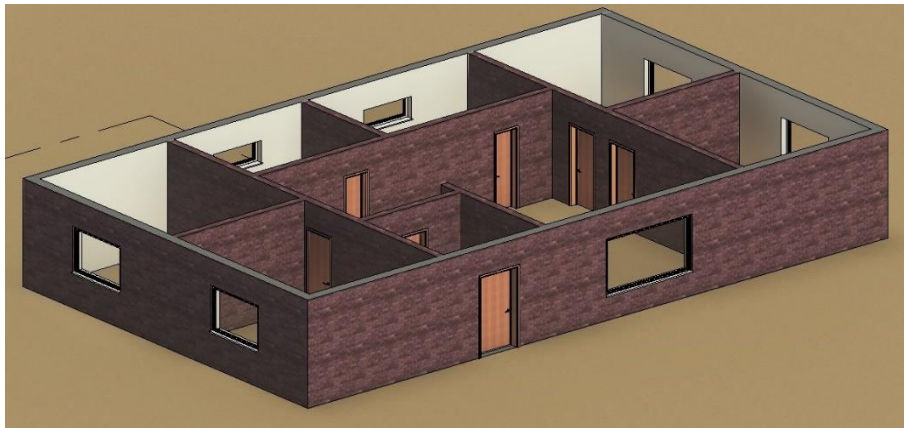


31. ábra: A hőveszteségek vizsgálatának egyes lépései

Minden egyes napra meghatározottan a napi hőnyereséget és hőveszteséget, majd ezek függvényében a hőnyereségek hasznosítási fokát. Ezek alapján kiszámítottam a napi fűtési energiaigényt, illetve a fűtési határhőmérsékletet. A felületfűtések esetében azonos a hőveszteség és a fűtési határhőmérséklet, de mivel ezek külső szerkezetekbe kerültek elhelyezésre néhány napot a fűtési idény kezdetén és végén a fűtés csak hógátként működik (elegendő a belső léghőmérséklettel azonos hőmérsékleten tartani a szerkezet belső felületét, mivel így néhány napig még a hőnyereségek fedezik a helyiség hőveszteségét). Meghatároztam azokat az új határhőmérsékleteket, amikor már magasabb előremenő-visszatérő hőmérséklettel kell működjön a fűtés (üzemi határhőmérséklet). A kisebb hőigények alapján megállapítottam a fűtőfelületek igényelt hőmérsékletét, majd a rendszer hőveszteségét a szerkezetek rétegrendjének ismeretében.

Az érvényben lévő épületenergetikai rendelet előírásai szerint a belső hőmérséklet 20 °C, a belső hőnyereségek pedig 5,0 W/m², a légcsereszám pedig 0,5 h⁻¹ [74].

Az esettanulmányt egy 2002-ben épült családi házra vonatkozóan végeztem el (32. ábra, [93]). Az épület teljesen alapincézett és fűtetlen padlástérrel rendelkezik (a nettó fűtött alapterület megegyezik a nettó alapterülettel és a padlásfödém felületével). Az épület főbb geometriai adatait a 9. táblázat tartalmazza.



32. ábra: Az elemzett épület elrendezése

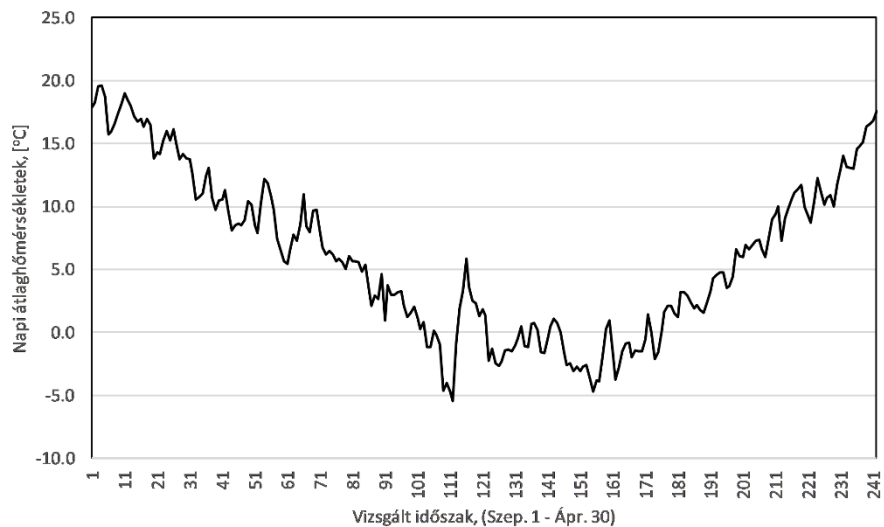
8. táblázat: Fontosabb geometriai jellemzők

Paraméter	Érték	
Nettó fűtött alapterület, [m ²]	154,48	
Fűtött térfogat, [m ³]	432,54	
ΣA/V, [m ⁻¹]	1,1	
Ablakok/ajtók felülete, [m ²]	D	4,05
	K	4,32
	Ny	4,32
	É	0,9
WWR*, [%]	D	8,8
	K	15,4
	Ny	15,4
	É	2,8
Hőtároló tömeg, [kg]	49923	

* - ablak/fal arány

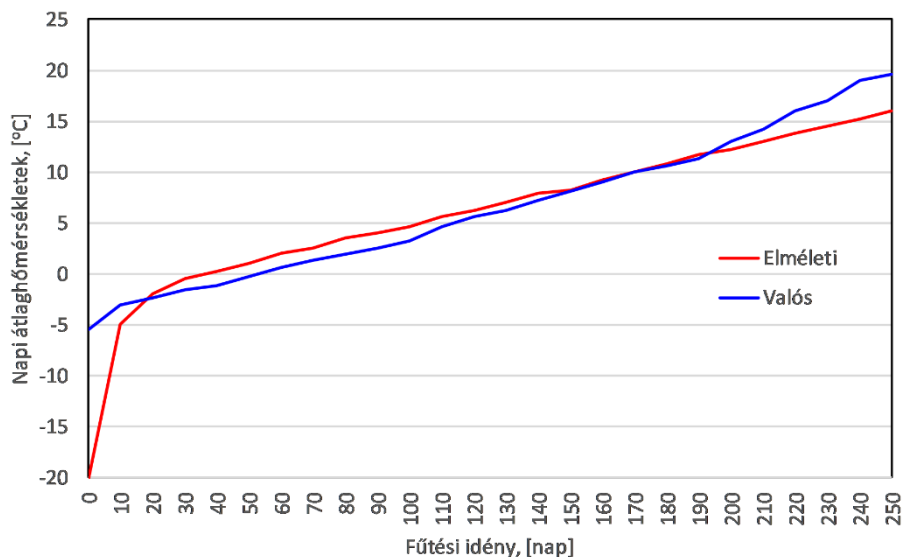
Korábbi fejezetben bizonyításra került, hogy a tervezési külső hőmérsékleteket át kellene értékelni Magyarországon [131]. Ennek megfelelően a kutatás során a Debreceni Egyetem Meteorológiai Állomás adatai kerültek felhasználásra, melyek 2009-2013 időszakra vonatkozóan álltak rendelkezésemre. Meghatároztam az északi, a déli, a keleti és a nyugati tájolású függőleges felületekre érkező sugárzási energia órai (2. Melléklet), majd napi átlagos értékeit. A 2009-2013 évek, szeptember 1.-április 30. időszakra vonatkozóan meghatározásra

kerültek a napi átlagos hőmérsékletek és a sugárzási energia értékek. A napi átlaghőmérsékletek alakulását a 33. ábra szemlélteti [93]. A vizsgált öt év napi átlaghőmérsékletei alapján elkészítettem erre az időszakra is a hőfokgyakorisági görbét és azt összevettem a Magyarországon ismert és széles körben alkalmazott hőfokgyakorisági görbével (34. ábra, [93]). Megállapítható, hogy a két görbe között jelentős eltérések csak a nagyon alacsony (max. 10 nap) és a magas hőmérséklet tartományokban alakul ki.



33. ábra: Napi átlaghőmérsékletek alakulása 09.01-04.30 között, Debrecen (2009-2013)

A köztes tartományban (ahol a fűtési idény legtöbb napja található, nincs jelentős különbség). Az eredményeket korábbi kutatások eredményei is alátámasztják [132].



34. ábra: Az elméleti és a valós (2009-2013) hőfokgyakorisági görbék (fűtés idény)

Mivel a 2002, 2012 és 2022 hőtechnikai követelmények jelentősen eltérnek egymástól az épületek hővesztesége is eltérő lesz, miközben a hőnyereségek, nem vagy kismértékben változnak csak.

A hőnyereségek hasznosítási fokát Yohanis és Norton által javasolt összefüggéssel határoztam meg [135]:

$$\eta_H = 1 - e^{\frac{-k}{\gamma_H - D}} \quad (3)$$

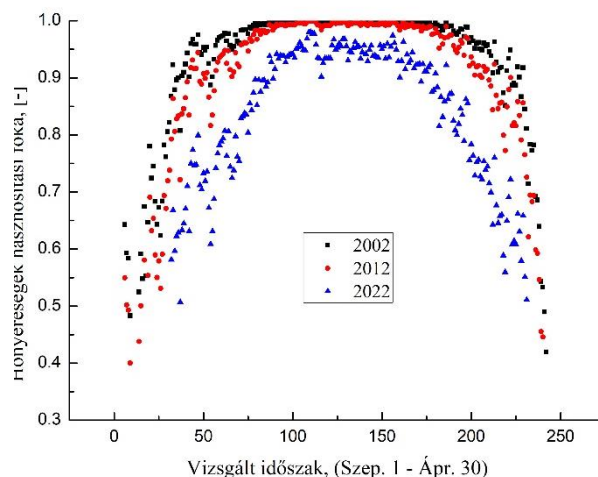
ahol k és D korrelációs tényezők melyek a (4) és (5) egyenletekkel számíthatók:

$$k = 1,0785 + 0,0041\tau - 6 \times 10^{-7} \tau^2 \quad (4)$$

$$D = -0,0087 - 0,007\tau + 7 \times 10^{-8} \tau^2 \quad (5)$$

ahol: τ a helyiség/kondicionált zóna/épület időállandója, melyet EN ISO 52016-1 előírásai alapján határoztam meg, [136].

Ennek megfelelően a három esetben eltérő lesz a hőnyereségek hasznosítási foka, melynek értékét napi szinten határoztam meg (35. ábra, [93]).

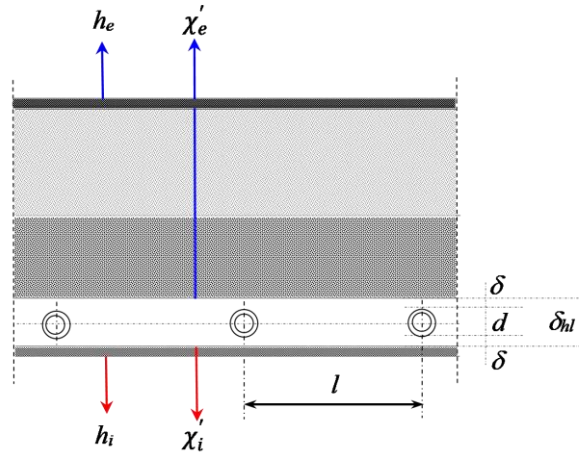


35. ábra: A hőnyereségek hasznosítási foka három különböző hőtechnikai követelmény esetében (Debrecen, 09.01.-04.30.), 2009-2013

9.2 Felülethőmérséklet és energiafogyasztás az alacsony hőmérsékletű felületfűtések esetében

9.2.1 Számítási eljárás

A hőátviteli folyamatok és az alkalmazott jelölések megértését a 36. ábra segíti [93], amely a rétegrendet mutatja be mennyezetfűtés esetében [133, 134].



36. ábra: Mennyezetfűtés metszete

A legnagyobb mértékű hőleadást úgy érhetjük el, hogy a fűtőréteget a belső tértől a lehető legvékonyabb réteggel választjuk el. A felület túlhőmérséklete (vagyis a felülethőmérséklet és a belső hőmérséklet közötti különbség) a Kollmar egyenlettel határozható meg, [133, 134]:

$$\theta'_m = \frac{\theta_w t h \frac{ml}{2}}{(1 + h_i \frac{\delta}{\lambda}) \frac{ml}{2}} \quad [\text{K}] \quad (6)$$

ahol: δ – a fűtőréteget (fűtőcsöveket tartalmazó réteget) burkoló réteg vastagsága, [m]; θ_w – a fűtővíz átlagos túlhőmérséklete:

$$\theta_w = \frac{t_s + t_r}{2} - t_i \quad [\text{K}] \quad (7)$$

az m tényező pedig:

$$m = \frac{\chi'_i + \chi'_e}{\delta_{hl} \lambda} \quad (8)$$

ahol: t_s – a fűtővíz előremenő hőmérséklete [$^{\circ}\text{C}$]; t_r – a fűtővíz visszatérő hőmérséklete, [$^{\circ}\text{C}$]; δ_{hl} – a fűtőréteg vastagsága, [m]; λ – a fűtőréteg anyagának hővezetési tényezője, [W/mK].

A fűtőréteg gyakorlatilag két részre osztja a szerkezetet. A belső tér és a fűtőréteg közötti szerkezet részre vonatkozó rész-hőátbocsátási tényező (χ'_i) az alábbi összefüggéssel számítható:

$$\chi'_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{\delta_p}{\lambda_p}} \quad (9)$$

ahol: h_i – a belső levegő és a szerkezet belső felülete közötti hőátadási tényező, [W/m²K]; δ_p – a fűtőréteget burkoló vakolat vastagsága, [m]; λ_p – a fűtőréteget burkoló vakolat anyagának hővezetési tényezője, [W/mK].

A fűtőréteg és a külső tér közötti rész-hőátbocsátási tényező (χ'_e) az alábbi egyenlettel számítható:

$$\chi'_e = \frac{1}{\frac{1}{h_e} + \sum_{j=1}^n \frac{\delta_j}{\lambda_j}} \quad (10)$$

ahol h_e – a szerkezet külső oldali hőátadási tényezője, [W/m²K]; δ_j – a fűtőréteg és a külső tér közötti szerkezet rész j rétegének vastagsága, [m]; λ_j – a fűtőréteg és a külső tér közötti szerkezet rész j rétegének hővezetési tényezője, [W/mK].

A szerkezet belső felületének átlagos túlhőmérséklete a (11) egyenlettel számítható:

$$\theta_{mi} = \theta'_m \frac{\chi'_i}{h_i} \quad (11)$$

Ennek ismeretében a belső tér felé leadott fajlagos hőmennyiség:

$$\dot{q}_i = h_i \theta_{mi} \quad [\text{W/m}^2] \quad (12)$$

A rendszer fajlagos hővesztesége viszont a (13) összefüggéssel határozható meg:

$$\dot{q}_e = \theta'_m \chi'_e \quad [\text{W/m}^2] \quad (13)$$

A (9) és (10) összefüggések alapján a j -ik napon a teljes fűtési energiaigény (\dot{Q}_{totd}) a (14) összefüggéssel számítható:

$$Q_{totd} = 0.024 \sum A(\dot{q}_i + \dot{q}_e)_j \quad [\text{kWh/nap}] \quad (14)$$

ahol: A a szerkezet (fal, padló, mennyezet) felülete belméretek szerint, [m²].

A teljes fűtési szezonban az összes energiaigény:

$$Q_{tot} = \sum_{j=1}^N Q_{totdj} \quad [\text{kWh}] \quad (15)$$

ahol: N a fűtési napok száma.

Természetesen a számításokhoz szükséges a fűtési határhőmérséklet pontos ismerete. A fűtési határhőmérséklet a (16) összefüggéssel határozható meg:

$$t_b = t_i - \eta_H \frac{\dot{Q}_i + \dot{Q}_s}{K} \quad (16)$$

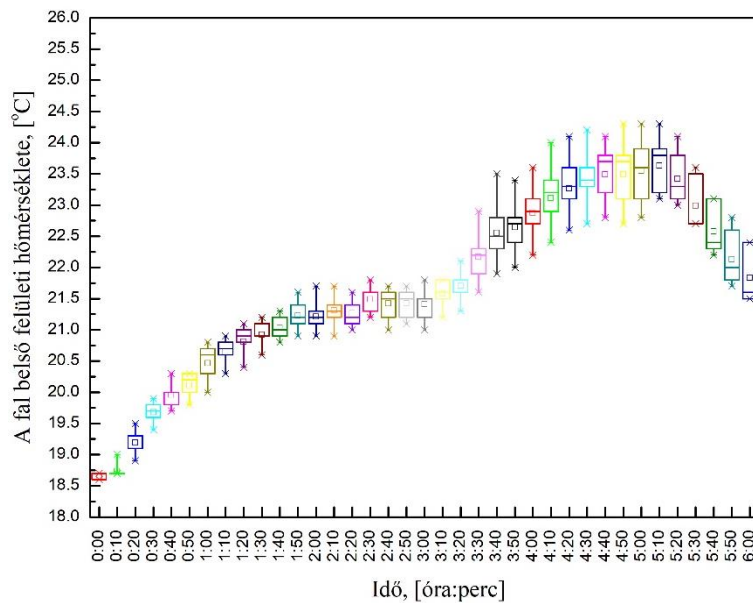
ahol: \dot{Q}_i – a belső hőnyereségek, [W]; \dot{Q}_s – a sugárzásos hőnyereségek, [W]; K – az épület hőveszteségtényezője, [W/K]; η_H – a hőnyereségek hasznosítási foka.

Az épület hőveszteségtényezője a transzmissziós és a szellőzési hőveszteségtényezők összege.

9.2.2 A számítási módszer validációja

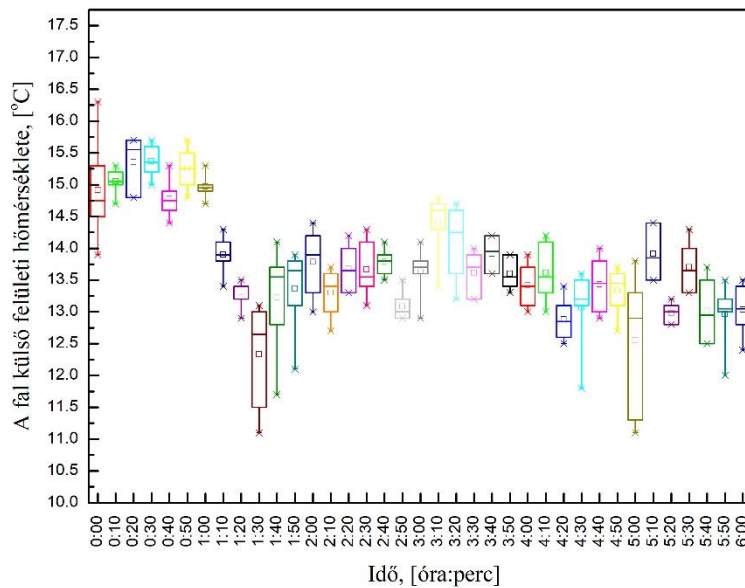
A Debreceni Egyetem Belső Környezet Minősége laboratóriumban méréseket végeztem annak érdekében, hogy validáljam a 9.2.1 alfejezetben bemutatott számítási módszert. A laboratóriumban egy hűtőházi panelekből épült klimatizált térben található a teszthelyiség melynek méretei (szélesség×hosszúság×magasság): 2,49m×3,65m×2,56m. A teszthelyiségben ki van építve a padló-, fal- és mennyezetfűtés is. Az adiabatikus kamrában a teszthelyiség körül a léghőmérséklet (-15) °C és +35 °C között állítható be. A validációhoz a falfűtést alkalmaztam. A falszerkezetet rétegei a következők (belső felülettől kezdve): 1,5 cm mészvakolat ($\lambda=0.81$ W/mK), 1,5 cm fűtőréteg (14 mm átmérővel rendelkező fűtőcsövekkel),

tömör tégl (λ=0.78 W/mK) és 1,5 cm mészvakolat. A mérés időtartama 6 óra volt. A belső hőmérsékletet 20 °C-ra a “külső” hőmérsékletet 10 °C-ra állítottam be. A fűtési előremenő/visszatérő hőmérsékletek: 31°C/24°C volt, de három óra után 40°C/32°C-ra emeltem, majd két óra üzem után (a mérés utolsó órájában) kikapcsoltam a fűtést. A falszerkezet belső és külső felületi hőmérsékletét TESTO905 T2 tapintó hőmérővel kilenc egyenletesen elosztott ponton mértem, de ellenőrzésképpen a mérés során TESTO 882 hőkamerával felvételeket is készítettem. A belső felületen a hőmérsékletértékeket a 37. ábra szemlélteti [93]:



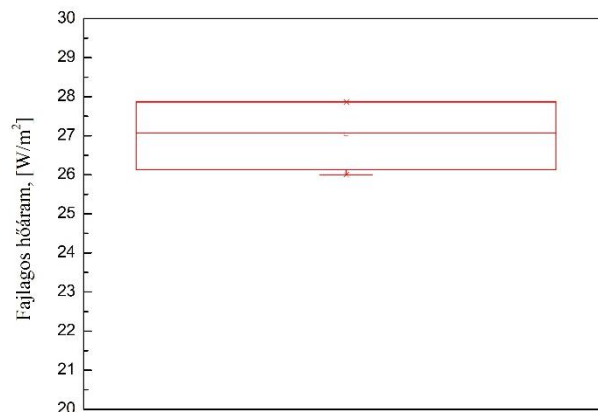
37. ábra: A mért belső felületi hőmérsékletek falfűtés esetében

Az egyes időpontokban a 9 pontban mért értékeket ábrázolja egy-egy “doboz”. A szerkezet külső felületén mért hőmérsékletértékeket a 38. ábra mutatja be [93].



38. ábra: Mért külső felületi hőmérsékletek falfűtés esetében

A mérési adatok elemzése során megállapítottam, hogy a folyamatok állandónak tekinthetők 2:00-3:00 óra között. Ebben az időszakban a falszerkezet külső felületén a fajlagos hőáram 27.07 W/m^2 ; $SD=0,8$ (39. ábra, [93]).

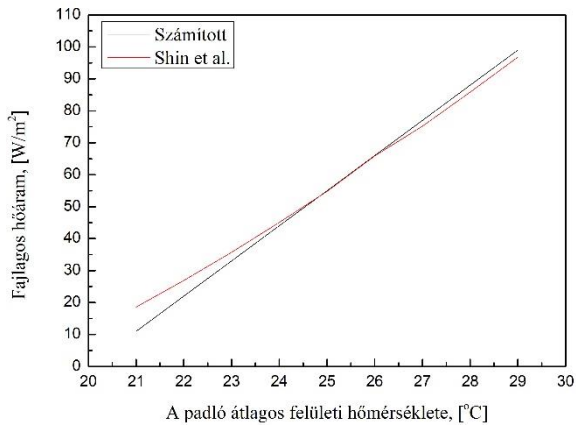


39. ábra: A fajlagos hőveszteség falfűtés esetében

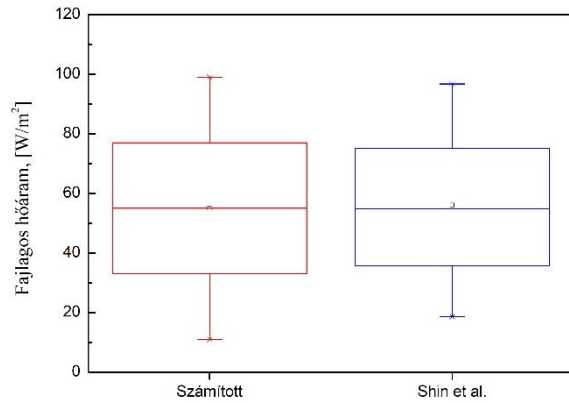
A számítási módszer alkalmazásával, figyelembe véve a szerkezet rétegrendjét és fűtővíz hőmérsékleteket a fajlagos hőveszteség értéke $26,36 \text{ W/m}^2$ értékre adódik. A különbség a mért és számított értékek között 2,5%, ami a gyakorlatban elfogadható hiba. Csupán érdekesség, hogy (fal)fűtés nélkül az adott belső és külső léghőmérsékletek mellett a szerkezeten a hőveszteség $17,0 \text{ W/m}^2$ lenne.

Padlófűtés esetében a számítási módszer validációját Shin et al. mérései alapján végeztem el [137]. A 40. ábra [93] mutatja be a számított illetve a mért értékeket, míg a statisztikai elemzés eredményét box-plot diagramban a 41. ábra [93] mutatja be. Páros t -próba

alkalmazásával bizonyítottam, hogy a mért és a számított értékek közötti különbségek $p=0,05$ szinten nem szignifikánsak. A statisztikai elemzéseket ORIGIN LAB 9.55 szoftverrel készítettem el.



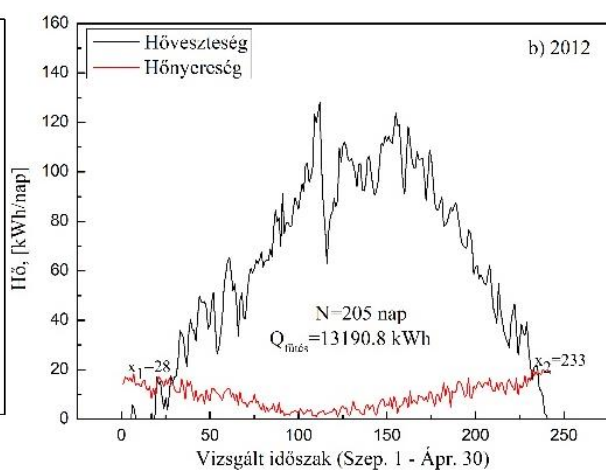
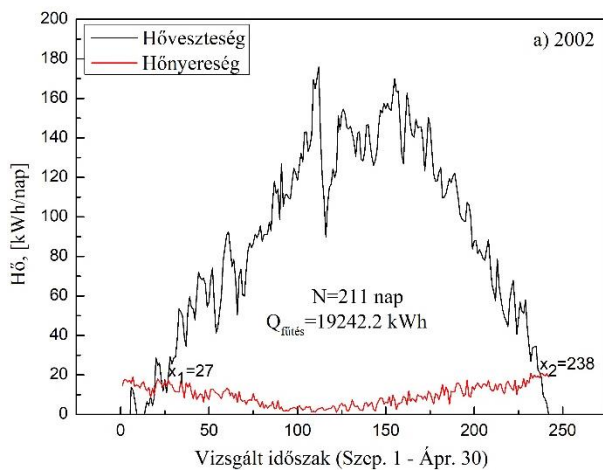
40. ábra: Mért és számított fajlagos hővesztés értékek padlófűtés esetében

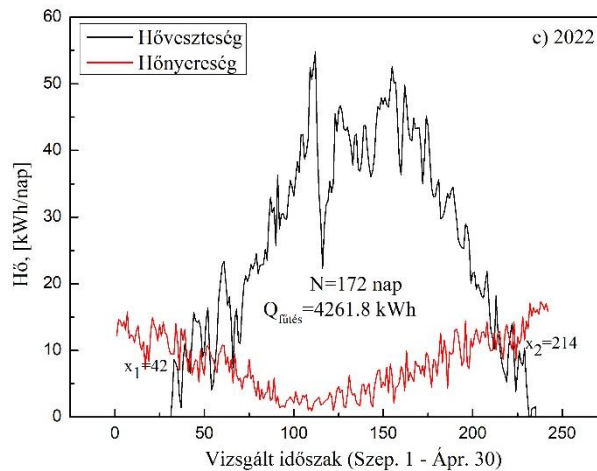


41. ábra: A mért [137] és számított értékek box-plot diagramja

9.3 A vizsgált épület fűtési hőigénye és energiafogyasztása

Figyelembe véve a 2002, 2012 és 2022-ben érvényes hőtechnikai előírásokat és követelményeket, a külső hőmérséklet valamint a sugárzási hőnyereségek alakulását a meghatároztam az épület hővesztését és hőnyereségét, valamint a fűtési hőigényét (42. ábra, [93]).





42. ábra: A különböző hőtechnikai követelményeket teljesítő épület fűtési hőigénye
a) 2002; b) 2012; c) 2022

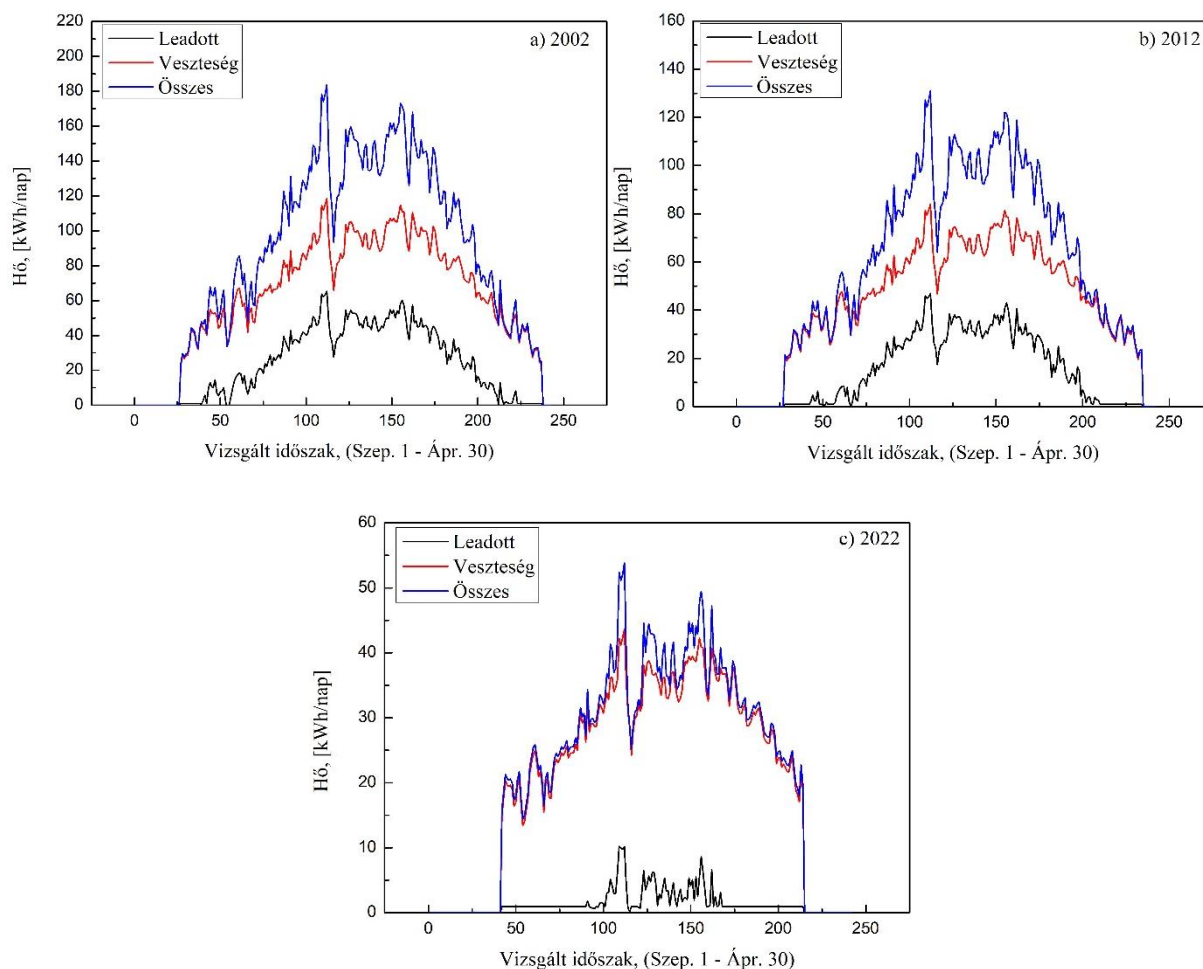
A hővesztések, illetve a hőnyereségek közötti terület jelenti a fűtési hőigényt, a két vonal metszési pontjai pedig a fűtési szezon kezdetét és végét jelentik. Megállapítható, hogy a 2002-2012 hőtechnikai követelményekben történt változások csupán hat nappal rövidítik meg a fűtési időt, azonban a fűtési energiaigény 31,4%-al csökken. A második lépcső (2012-2022) során történt szigorítások már 33 nappal rövidebb fűtési időt és 67,7%-al kisebb fűtési energiaigényt jelentettek. Két hőtermelő esetében (kondenzációs kazán és levegő-víz hőszivattyú) a primerenergia mennyiségét is meghatároztam. Földgáz esetében a primerenergia átalakítási tényező 1,0, míg villamosenergia esetében 2,5 [74]. Ezen felül két hőleadási módot vizsgáltam: hagyományos radiátoros fűtést és alacsony hőmérsékletű sugárzófűtést. Utóbbi esetben ismét háromféle megoldást elemeztem: egyidejű padló-, fal- és mennyezetfűtést, egyidejű padló- és mennyezetfűtést, valamint az egyedülálló padlófűtést. A radiátoros fűtési mód esetében a hőmérséklet szabályozási görbéit a 3. Melléklet tartalmazza. A kondenzációs kazán hatásfokának alakulását a napi külső átlaghőmérséklet alapján Satyavada és Baldi kutatásai alapján határoztam meg [138]. A levegő-víz hőszivattyú COP értékeit is napi külső átlaghőmérsékletek alapján határoztam meg [139]. Az alacsony hőmérsékletű felületfűtések tervezési hőmérsékleteit a (6)-(11) összefüggések alapján határoztam meg (4. Melléklet). A fűtési energiafogyasztás meghatározásánál figyelembe vettem az energiaigényt, az előremenő-visszatérő hőmérsékleteket és a kazán/hőszivattyú hatásfokát az adott külső hőmérséklet mellett. Radiátoros fűtés esetében az energiafogyasztási adatokat a 9. táblázat tartalmazza.

9. táblázat: Fűtési energiafogyasztás radiátoros fűtési mód esetében

	2002	2012	2022
Külső hőmérséklet (fűtés bekapcsolása), [°C]	15,1	13,7	9,6
Külső hőmérséklet (fűtés leállítása), [°C]	14,8	13,0	9,0
Fűtési napok száma, [nap]	211	205	172
Fűtési energiaigény, [kWh]	19242,2	13190,8	4261,8
Fűtési energiafogyasztás (kondenzációs kazán), [kWh]	20578	14106,3	4578
Fűtési energiafogyasztás (levegő-víz hőszivattyú), [kWh]	6673,4	4592	1511,5
Primerenergia fogyasztás (kondenzációs kazán), [kWh]	20578	14106,3	4578
Primerenergia fogyasztás (levegő-víz hőszivattyú), [kWh]	16683,5	11480	3778,8

Megállapítható, hogy a fűtési rendszer bekapcsolási és a kikapcsolási határhőmérséklete eltérő. Az eltérés ugyan nem szignifikáns, de meghaladhatja a 0,5 °C-t. Ez annak köszönhető, hogy a napsugárzás energiahozama és a külső napi átlaghőmérséklet nem pontosan egyenlő az egyes fűtési napokon ősszel és tavasszal. A fűtési kikapcsolási határhőmérséklet alacsonyabb, ami arra enged következtetni, hogy tavasszal egy adott külső hőmérséklethez valamivel magasabb sugárzási energianyereségek társulnak.

Ha az épület külső határolószervezeteire (padló, fal és mennyezet) felületfűtéseket helyezünk el, akkor ezek a fűtési idény során hűgátként üzemelnek mivel magasabb hőmérséklettel rendelkeznek, mint a belső léghőmérséklet. Sőt, amikor a fűtési rendszer bekapcsolása megtörténik, néhány napig elegendő ezeket a felületeket azonos hőmérsékleten tartani a léghőmérséklettel, ugyanis ebben az esetben némileg csökken az épület hővesztesége, azonban a hőnyereségek változatlanok maradnak, így a léghőmérsékletnél magasabb felületi hőmérsékleteket csak néhány nap eltolódással kell majd biztosítani. Azonban, amint melegvizet cirkuláltatunk a rendszerben, számolni kell a rendszer hőveszteségével is. Ez (mint láthattuk a validálásnál is, nagyobb lesz mint a fűtőréteg nélküli szerkezeten fellépő hőveszteség). A 43. ábra [93] bemutatja az épület fűtési hőigényének, a rendszer hőveszteségének és a teljes fűtési hőigénynek az alakulását abban az esetben, ha a vizsgált épület összes határolószervezetét (padló, fal és mennyezet) felületfűtésre használnánk (1. eset). Ebben az esetben a kiterjedt fűtési felületek miatt rendkívül alacsony fűtési hőmérsékletekre lesz szükség.



43. ábra: Leadott hő, hőveszteség és teljes fűtési hőigény (1. eset)
a) 2002; b) 2012; c) 2022

A számított energetikai adatokat a 10. táblázat tartalmazza. Megállapítható, hogy két különböző határhőmérsékletet különböztetünk meg. Az első (kisebb külső hőmérséklet) arra vonatkozik, amikor bekapcsoljuk a fűtést, de a felületek hőmérséklete éppen egyenlő a léghőmérséklettel (a helyiségbe leadott hő nulla de a hőveszteség is nulla). A második külső hőmérséklet (a nagyobb érték) arra az esetre vonatkozik, amikor már a felületek hőmérséklete nagyobb, mint a belső léghőmérséklet (vagyis lesz hőleadás is).

10. táblázat: Fűtési energiafogyasztás alacsony hőmérsékletű felületfűtések esetében (1. eset)

	2002	2012	2022
Külső hőmérséklet (fűtési rendszer bekapcsolása), [°C]	15,1	13,7	9,6
Külső hőmérséklet (elkezdődik a hőleadás), [°C]	10,5	9,6	1,0
Külső hőmérséklet (fűtési rendszer kikapcsolása), [°C]	14,8	13,0	9,0
Külső hőmérséklet (leáll a hőleadás), [°C]	8,7	7,5	-1,5
Fűtési rendszer működése, [nap]	211	205	172
Hőleadás a belső terekbe, [nap]	176	161	75

Fűtési energiaigény, [kWh]	5689,9	3611,8	342,8
Rendszer hőveszteségei, [kWh]	15180,1	10700,7	5073,4
Teljes fűtési energiaigény, [kWh]	20870	14312,5	5416,2
Fűtési energiafogyasztás (kondenzációs kazán), [kWh]	21739,6	14908,9	5641,8
Fűtési energiafogyasztás (levegő-víz hőszivattyú), [kWh]	7208,6	4953,4	1886,3
Primerenergia fogyasztás (kondenzációs kazán), [kWh]	21739,6	14908,9	5641,8
Primerenergia fogyasztás (levegő-víz hőszivattyú), [kWh]	18021,5	12383,5	4715,8

Megállapítható, hogy az energiafogyasztás nagyobb, mint a hagyományos radiátoros fűtési rendszernél. Ez egy extrém eset, hiszen minden külső határoló szerkezetbe fűtőfelület került beépítésre. Azonban, ha a fűtőfelületet csökkentjük, akkor növekszik az épület hővesztesége és növelni kell a fűtővíz hőmérsékletét is, így nagyobbak lesznek a rendszer hőveszteségei. Arra az esetre vonatkozóan, amikor padló- és mennyezetfűtés (2. eset), vagy csak padlófűtés (3. eset) kerül alkalmazásra az energiaigények alakulását az 6. Melléklet tartalmazza. Az energiafogyasztási adatokat a 2. esetre a 11. táblázat, a 3. esetre vonatkozóan pedig a 12. táblázat mutatja be.

11. táblázat: Fűtési energiafogyasztás alacsony hőmérsékletű felületfűtések esetében (2. eset)

	2002	2012	2022
Külső hőmérséklet (fűtési rendszer bekapcsolása), [°C]	15,1	13,7	9,6
Külső hőmérséklet (elkezdődik a hőleadás), [°C]	13,9	10,6	8,0
Külső hőmérséklet (fűtési rendszer kikapcsolása), [°C]	14,8	13,0	9,0
Külső hőmérséklet (leáll a hőleadás), [°C]	13,1	10,0	4,5
Fűtési rendszer működése, [nap]	211	205	172
Hőleadás a fűtött terekbe, [nap]	202	197	125
Fűtési energiaigény, [kWh]	11299	7549,3	1706,6
Rendszer hőveszteségei, [kWh]	8739,5	6139,6	2948,5
Teljes fűtési energiaigény, [kWh]	20038,5	13688,9	4655,2
Fűtési energiafogyasztás (kondenzációs kazán), [kWh]	20873,4	14259,3	4849,1
Fűtési energiafogyasztás (levegő-víz hőszivattyú), [kWh]	6934,6	4753,8	1635,3
Primerenergia fogyasztás (kondenzációs kazán), [kWh]	20873,4	14259,3	4849,1
Primerenergia fogyasztás (levegő-víz hőszivattyú), [kWh]	17336,5	11884,5	4088,3

Megállapítható, hogy a hőleadás indítása és leállítása szignifikánsan magasabb külső napi átlaghőmérsékletek mellett történik. Ez azt jelenti, hogy jelentősen hosszabb lesz a hőleadási időszak és ezzel a fűtött terekbe leadott hőmennyiség is. Ugyanakkor a rendszer hőveszteségei nagymértékben csökkennek, így az energiafogyasztás is jelentősen csökken. A 3. esetben

(csak padlófűtés) tovább csökkennek a rendszer hőveszteségei, viszont a leghosszabb lesz a hőleadási üzemmód (12. táblázat).

12. táblázat: Fűtési energiafogyasztás alacsony hőmérsékletű felületfűtések esetében (3. eset)

	2002	2012	2022
Külső hőmérséklet (fűtési rendszer bekapcsolása), [°C]	15,1	13,7	9,6
Külső hőmérséklet (elkezdődik a hőleadás), [°C]	13,7	13,4	7,4
Külső hőmérséklet (fűtési rendszer kikapcsolása), [°C]	14,8	13,0	9,0
Külső hőmérséklet (leáll a hőleadás), [°C]	13,0	12,9	7,25
Fűtési rendszer működése, [nap]	211	207	172
Hőleadás a fűtött terekbe, [nap]	208	201	153
Fűtési energiaigény, [kWh]	15014,3	10295,2	2931,8
Rendszer hőveszteségei, [kWh]	4912,1	3234	1465
Teljes fűtési energiaigény, [kWh]	19926,4	13529,2	4396,8
Fűtési energiafogyasztás (kondenzációs kazán), [kWh]	20756,7	14092,9	4580
Fűtési energiafogyasztás (levegő-víz hőszivattyú), [kWh]	6898,7	4702,6	1551,9
Primerenergia fogyasztás (kondenzációs kazán), [kWh]	20756,7	14092,9	4580
Primerenergia fogyasztás (levegő-víz hőszivattyú), [kWh]	17246,7	11765,5	4655,7

9.4 Összefoglalás

A közel nulla energiaigényű épületek esetében az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtési rendszerek alkalmazása széles körben elterjedt. Ennek egyik oka az, hogy ezzel a fűtési megoldással jobb hőérzetet lehet biztosítani a belső terekben. A szakmában azt is tényként kezelik, hogy az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtések esetében kisebb lesz az energiafogyasztás. Ez rendkívül fontos kérdés, mivel az épület széndioxid kibocsátása az összes energiafogyasztástól (leadott hő és hőveszteségek összege) függ. Egy családi ház esetében, mely akár mintaépületnek is tekinthető, megvizsgáltam hagyományos radiátoros fűtési mód, illetve az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtési mód esetében az összes energiafogyasztást. Utóbbi esetben három különböző megoldást elemeztem: együttes padló-, fal- és mennyezetfűtés (1. eset), padló- és mennyezetfűtés (2. eset) és csak padlófűtés (3. eset). Meteorológiai adatokként a 2009-2013 években Debrecenben mért külső hőmérséklet és sugárzási adatok álltak rendelkezésemre kellő részletességgel.

Megállapítottam, hogy minél több külső szerkezeten helyezünk el sugárzó felületfűtést, annál nagyobb lesz a teljes energiafogyasztás (az alacsonyabb üzemeltetési hőmérsékletek ellenére). Összevetésben a hagyományos radiátoros fűtéssel, százalékosan a legnagyobb eltérések a közel nulla energiaigényű épületek esetében adódnak (természetesen abszolút értékben a felhasznált energiamennyiségek jóval kisebbek a közel nulla energiaigényű épületek

esetében). Ezeknél az épületeknél éves szinten a hőveszteségek jelentősen meghaladják a fűtött terekbe leadott hőmennyiséget. Közel nulla energiaigényű épületek esetében energetikai szempontból a legjobb megoldást tehát a 3. esetben kapjuk, amikor csak padlófűtést alkalmazunk.

10. Különböző fűtési rendszerek összehasonlítása azonos operatív hőmérséklet mellett

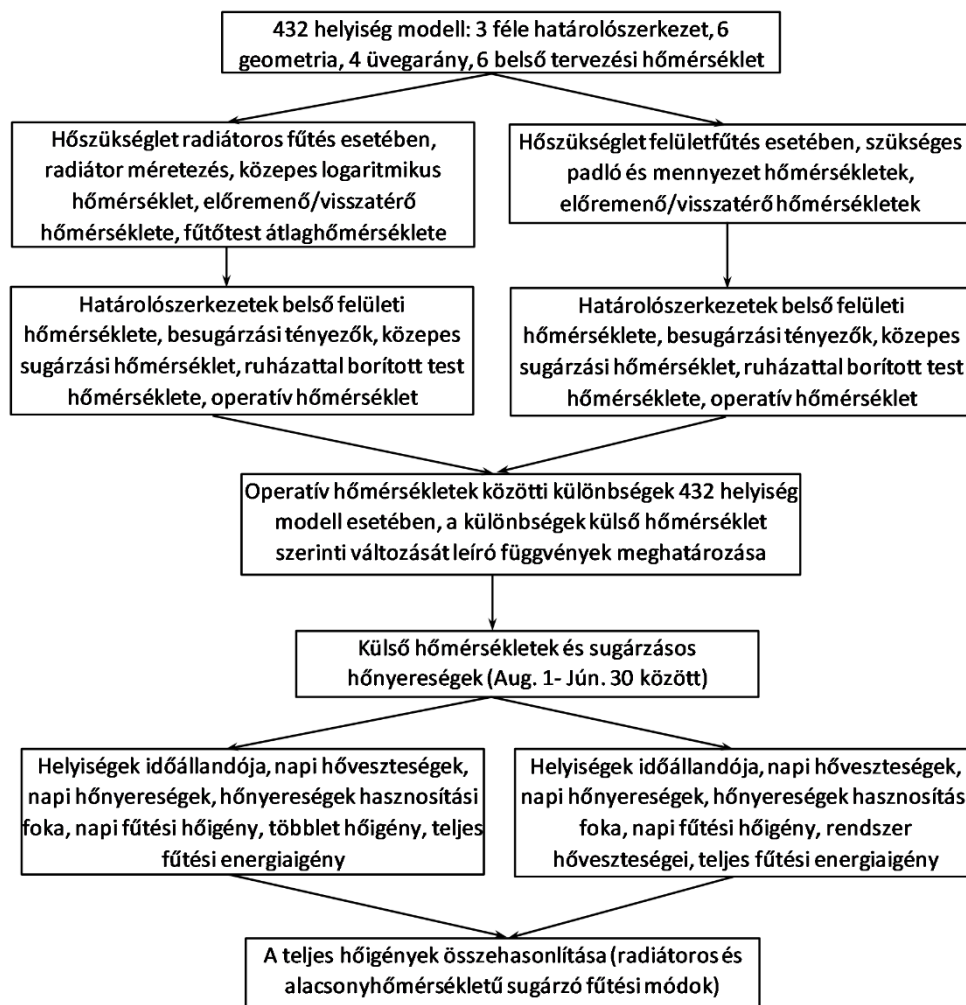
Az előző fejezetben bizonyítást nyert, hogy a beágyazott alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtési rendszerek esetén a magasabb hőmérsékletű réteg (fűtőréteg) beépítése a külső épületszerkezetbe (fal, padló vagy födém) a hőveszteség növekedéséhez vezet. Ennek megfelelően az adott épületelemen a hőveszteség nagyobb lesz, mint a hagyományos radiátoros fűtési rendszerek esetén. Ezek a hőveszteségek összemérhetőek, vagy bizonyos esetekben akár meg is haladhatják a sugárzó felület által a fűtött térbe leadott hőt [93]. A rendszer hővesztesége a választott előremenő/visszatérő hőmérséklettől, míg a rendszer üzemi hőmérséklete a helyiségek hőigényétől függ. Az előző fejezetben azonos léghőmérsékletek mellett vizsgáltam a kétféle (radiátoros és alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtés) rendszer energiafogyasztását, azonban felmerült a gondolat, hogy mi történik az energiafogyasztással, ha a térben azonos operatív hőmérséklet biztosítása a cél. A vizsgálat tárgyát képezte a tér méretének, az üvegezési aránynak, a tervezési belső léghőmérsékletnek és a határolószerkezetek hőátbocsátási tényezőjének az energiafogyasztásra gyakorolt hatása is.

10.1 A számítások peremfeltételei, lépései

Tekintettel a vizsgált helyiségek és a fűtési rendszerek hőtehetetlenségére, a vizsgálatokat napokra vonatkozóan végeztem el. A külső hőmérsékleteket 1991-2020 évek adatai alapján vettem figyelembe, az átlagos sugárzási hőnyereség értékeket a Debreceni Egyetem Meteorológiai Állomásán mért órai átlagértékek alapján határoztam meg. A kutatás lépései:

1. A helyiségek hőigényének meghatározása (6 geometria \times 4WWR \times 3határolószerkezet \times 6 belső tervezési hőmérséklet=432 különböző eset radiátoros és 432 eset alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtés esetében);
2. A radiátoros fűtés 432 különböző esetében radiátorok méretezése és kiválasztása termékkatalógusból [140]. Minden esetben 600 mm magaságú, 22K típusú fűtőtest került kiválasztásra.
3. A fűtési előremenő és visszatérő hőmérsékletek meghatározása radiátoros fűtés esetében a fűtőtest felületének, a belső hőmérsékletnek és a hőszükségletnek az ismeretében.

4. A padló és a mennyezet felületi hőmérsékletének meghatározása alacsony hőmérsékletű sugárzófűtés esetében.
 5. A helyiséget határoló szerkezetek belső felületi hőmérsékletének a számítása (a belső válaszfalak hőmérsékleteit a léghőmérséklettel azonos értéknek vettem fel). A külső szerkezetek belső felületi hőmérsékleteit hét külső hőmérséklet mellett határoztam meg: (-15) °C; (-10) °C, (-5) °C; 0 °C; +5 °C; +10 °C; +15 °C.
 6. A helyiségben egy embert feltételeztem, arccal az ablak irányában, ülő helyzetben. A besugárzási tényezők értékeit 24 különböző esetben határoztam meg (6 helyiség-geometria \times 4 WWR), míg a közepes sugárzási hőmérséklet értékét 6048 esetben határoztam meg (432 \times 7 db. külső hőmérséklet = 3024 eset a radiátoros, illetve ugyanannyi eset az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtés esetében).
 7. Meghatároztam a konvektív és a sugárzásos hőátadási tényezők értékeit a helyiségben tartózkodó emberre vonatkozóan figyelembe véve a belső környezeti paramétereket.
 8. A 6048 esetben meghatároztam az operatív hőmérséklet értékeit.
 9. A két fűtési mód esetében kapott operatív hőmérsékletek közötti különbséget kiszámítottam.
 10. Az operatív hőmérsékletek közötti különbségeket diagramban ábrázoltam és regressziós módszerrel meghatároztam a lineáris leíró egyenleteket (átlagos $R^2=0,99928$, minimum $R^2=0,93773$).
 11. Meghatároztam a radiátoros fűtés esetében az új léghőmérsékleteket, melyek segítségével azonos operatív hőmérsékletek érhetők el a két fűtési mód esetében.
 12. Az energetikai számításokhoz szükséges hőnyereségek és a hőnyereségek hasznosítási fokát kiszámítottam.
 13. A vizsgált 432 esetben meghatároztam a radiátoros fűtés esetében az energiafogyasztást, illetve a többlet energiafogyasztást is, ami a léghőmérséklet emeléséhez szükséges.
 14. Az alacsony hőmérsékletű fűtési mód esetében meghatároztam a helyiségbe leadott hőmennyiséget és a hőveszteségeket is.
 15. Elemeztem a kapott eredményeket és levontam a következtetéseket.
- A kutatás algoritmusát az 44. ábra szemlélteti [142].

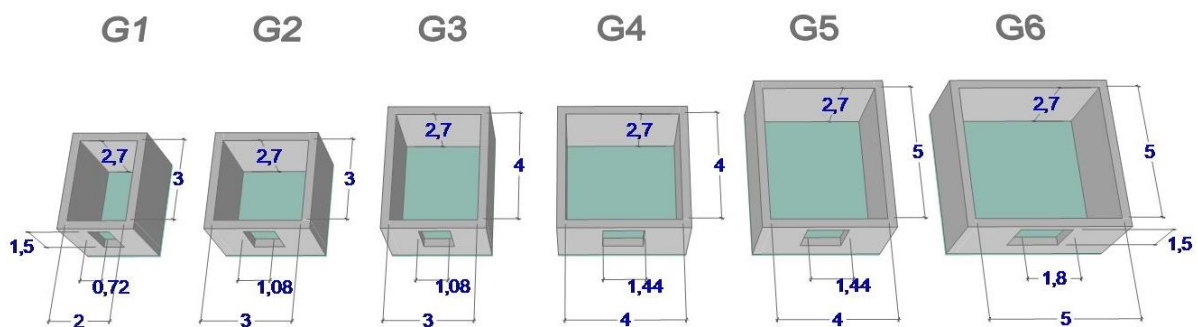


44. ábra: Az elvégzett kutatás lépései

10.1.1 A vizsgált helyiségek

Egy helyiség fűtési hőigényét a méretezési belső és külső hőmérséklet, illetve a határolószerkezetek hőátbocsátási tényezői mellett a helyiség épületen belüli elhelyezkedése is befolyásolhatja. Egy társasházban előfordulhat, hogy egy helyiség egyetlen külső szerkezettel rendelkezik. Egy ilyen helyiségnek kisebb a hőigénye, mint egy földszinti, vagy utolsó emeleti helyiségnek, vagy sarokhelyiségnek. A jelen vizsgálataim során egy olyan 2,7 m belmagassággal rendelkező sarokhelyiséget vizsgáltam, ami alatt fűtetlen pince, felette pedig fűtetlen padlástér helyezkedik el. Hat különböző geometriát feltételeztem: 2.0m×3.0m (G1); 3.0m×3.0m (G2); 3.0m×4.0m (G3); 4.0m×4.0m (G4); 4.0m×5.0m (G5), and 5.0m×5.0m (G6).

Ezek a helyiségméretek a lakóépületekben megtalálhatók (45. ábra, [142]). Az MSZ EN 16798-1 szabvány szerint a II, komfortkategóriába tartozó épületek esetében, a fűtési idény során az ajánlott hőmérséklet $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [35]. Ugyanakkor, az épületben tartózkodók hőérzeti igényeinek megfelelően a belső hőmérséklet eltérhet az ajánlott értéktől (legtöbbször meghaladja a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -t. A helyiség egyik külső falán egy $1,5\text{ m}$ magassággal rendelkező ablak található. Az ablak szélessége a nyílászáró/falszerkezet arány (WWR) alapján lett meghatározva. Négy különböző WWR értéket feltételeztem a számítások során: 20% (W1), 30% (W2), 40% (W3), and 50% (W4). Az ablak alatti parapetmagasság minden vizsgált esetben $0,9\text{ m}$.



45. ábra: A vizsgált helyiségek geometriája

Radiátoros fűtés esetében a fűtőtestet minden esetben a nyílászáró alatt helyeztem el, a fűtőtest hosszúságát pedig úgy választottam ki a gyártókatalógusból, hogy egyenlő (vagy csaknem egyenlő) legyen az ablak szélességével [140]. Így a fűtőtest mérete adott volt és ezt, illetve a helyiség hőszükségletét figyelembe véve, meghatároztam a logaritmusos hőmérsékletkülönbségeket, valamint a szükséges előremenő és visszatérő hőmérsékleteket ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$ tervezési hőfoklépcsőt feltételezve). Hat különböző belső léghőmérsékletet vizsgáltam a kutatás során: $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T1); $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T2); $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T3); $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T4); $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T5), and $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (T6). A külső szerkezeteket illetően három különböző szabványnak vagy rendeletnek megfelelő szerkezetet feltételeztem: E1 (2002), E2 (2012) és E3 (2022). A hőátbocsátási tényezők, illetve a légcserezszámok értékeit a 13. táblázat tartalmazza.

14. táblázat: Határolószerkezetek hőátbocsátási tényezői és légcserezszámok

Kód/Előírás	Épületszerkezet	U, [W/m ² K]	Légcserezszám, [1/h]
E1, [71]	Külső fal	0,70	0,7
	Padló	0,70	
	Födém	0,40	
	Ablak	2,00	

E2, [74]	Külső fal	0,44	0,5
	Padló	0,47	
	Födém	0,29	
	Ablak	1,60	
E3, [128]	Külső fal	0,23	0,5
	Padló	0,25	
	Födém	0,16	
	Ablak	1,15	

Figyelembe véve mindezeket a paramétereket 432 különböző eset adódik. A kutatás során mindegyik vizsgált eset külön kóddal rendelkezik. Így pl. E1G2W3T4 kód azt jelenti, hogy egy 3,0m×3,0m×2,7m méretekkkel, 40% üvegezési aránnyal és 23 °C belső tervezési léghőmérséklettel rendelkező helyiséget vizsgálunk melynek határolószerkezeteit a 13. táblázatban megadott U hőátbocsátási tényezők jellemzik és 0,7 h⁻¹ légcsereszámmal rendelkezik.

Az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtés esetében a kombinált padló- és mennyezetfűtés mellett döntöttem, mivel a szakirodalom szerint ez a fűtési mód biztosítja a megfelelő hőérzetet a legkevesebb energiafogyasztás mellett [56]. A szükséges felületi hőmérsékleteket, illetve az előremenő és visszatérő hőmérsékleteket a helyiségek hőigénye alapján határoztam meg a 9. fejezetben bemutatott algoritmus szerint figyelembe véve a szakirodalomban megadott felületi hőátadási tényezőket.

10.1.2 Operatív hőmérséklet számítása

Az operatív hőmérséklet a (17) összefüggéssel számítható:

$$t_o = \frac{h_c \cdot t_i + h_r \cdot \bar{t}_r}{h_c + h_r} \quad [^\circ\text{C}] \quad (17)$$

ahol: \bar{t}_r – a közepes sugárzási hőmérséklet, [°C]; t_i – a belső tervezési léghőmérséklet, [°C]; h_c – konvektív hőátadási tényező, [W/m²K]; h_r – sugárzásos hőátadási tényező, [W/m²K].

Mivel mindkét fűtési mód esetében a helyiségben természetes légáramlás alakul ki, a konvekciós hőátadási tényező a (18) összefüggéssel számítható [47]:

$$h_c = 2,38 \cdot (t_{cl} - t_i)^{0,25} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (18)$$

ahol: t_{cl} a ruházattal borított és nem borított test felületi hőmérséklete, [°C].

A sugárzásos hőátadási tényező a (19) összefüggéssel számítható [47]:

$$h_r = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon \cdot \frac{A_r}{A_{Du}} \cdot \frac{(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4}{(t_{cl} - \bar{t}_r)} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (19)$$

ahol: A_r – az emberi test sugárzásos hőcserében résztvevő effektív felülete, [m²]; A_{Du} – az emberi test Du Bois felülete, [m²]; ε – a ruházattal borított és nem borított test emissziós tényezője.

Az A_r/A_{Du} arány 0,7 ülő helyzetben lévő ember esetében, az ε értékét 0,9-nek feltételeztem.

A ruházat felületi hőmérsékletét a (20) összefüggéssel számoltam iteratív módon [47]:

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(M - W)I_{cl} \cdot \{h_r f_{cl} 10^{-8} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} h_c (t_{cl} - t_i)\}, \quad [^\circ\text{C}] \quad (20)$$

ahol: I_{cl} – a ruházat hőszigetelő képessége, [m²K/W]; f_{cl} – a ruházattal borított testfelület és a ruházat nélküli testfelület aránya; M – metabolikus hő, [W/m²]; W – az egyén által végzett mechanikai munka, [W/m²].

A számítások során a mechanikai munka értéke 0, a metabolikus hőt 69,6 W/m² (1,2 met – ülő helyzetben végzett munka) a ruházat hőszigetelő képessége pedig 0,8 clo (0,124 m²K/W) volt.

A ruházattal borított testfelület és a ruházat nélküli testfelület aránya [47]:

$$f_{cl} = 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} \quad (21)$$

A ruházattal borított és nem borított test felületi hőmérsékletének számítását a Microsoft Excel Solver bővítményének segítségével végeztem el. A számítások során a legnagyobb elfogadott hiba $5,38 \cdot 10^{-8}$ volt.

A konvekciós hőátadási tényező átlagos értéke 3,59 W/m²K, a szórás pedig SD=0,146 volt. A sugárzásos hőátadási tényező értéke 3,77 W/m²K, a szórás pedig SD=0,05 volt.

A közepes sugárzási hőmérsékletet a (22) összefüggéssel határoztam meg [141]:

$$\bar{t}_r = \left(\sum F_{P-A_j} \cdot T_j \right)^{0,25} - 273 \quad [^\circ\text{C}] \quad (10)$$

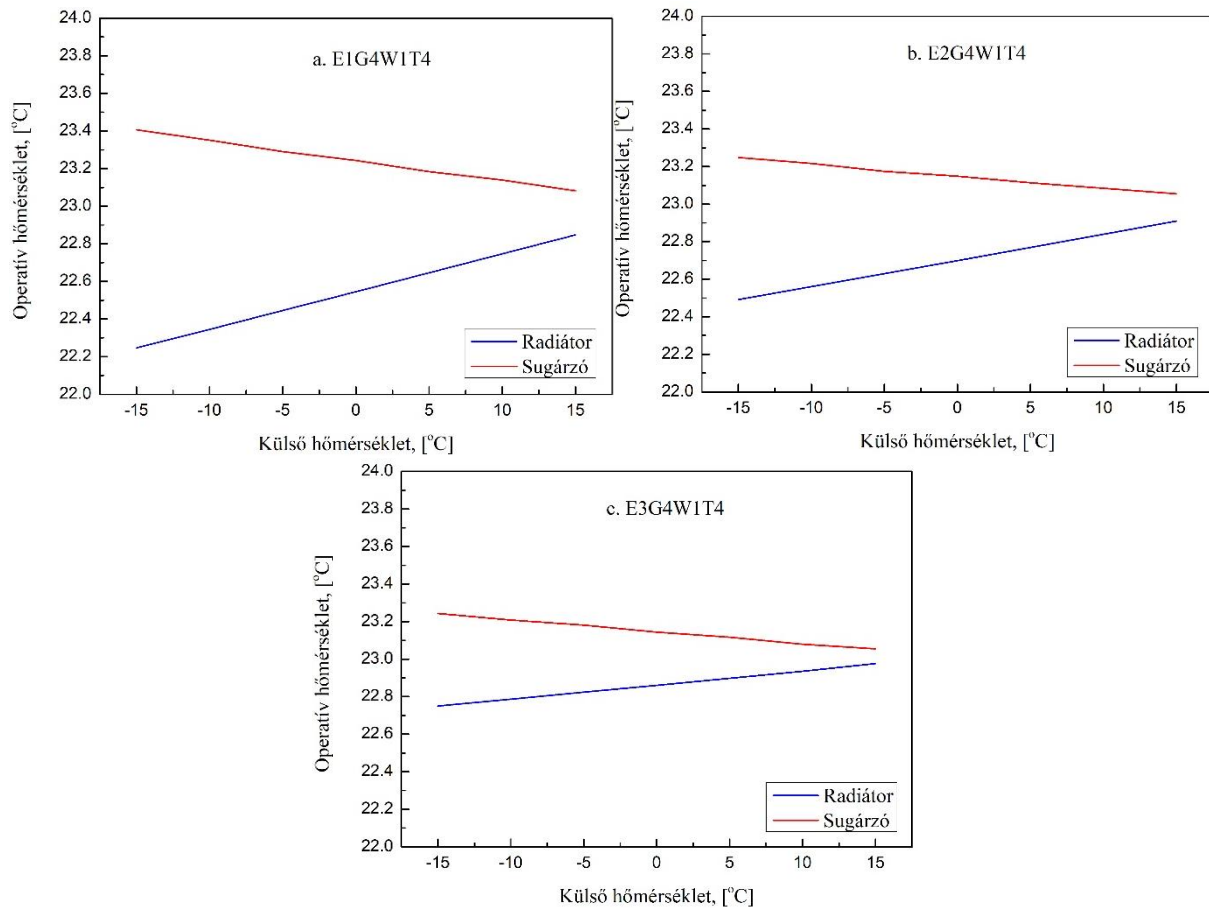
ahol F_{P-A_j} a besugárzási tényező értékei az egyén és a j határoló szerkezet között; A_j – a j határoló szerkezet felülete, [m²]; T_j – a j határoló szerkezet hőmérséklete, [K].

Az F_{P-A_j} besugárzási tényező értékeit a Fanger által javasolt diagramok [141] alapján határoztam meg a 24 különböző geometriával és üvegezési aránnyal rendelkező helyiségre.

10.2 Eredmények

A helyiségek hőszükségletének és hővesztésgtényezőinek megállapítása után, kiválasztásra kerültek a fűtőtestek, illetve méretezésre kerültek a felületi fűtések is (a méretezés során a 9. fejezetben bemutatott peremfeltételeket alkalmaztam). A helyiség közepén ülő helyzetben lévő emberre vonatkozóan megállapítottam a besugárzási tényezőket, meghatároztam a

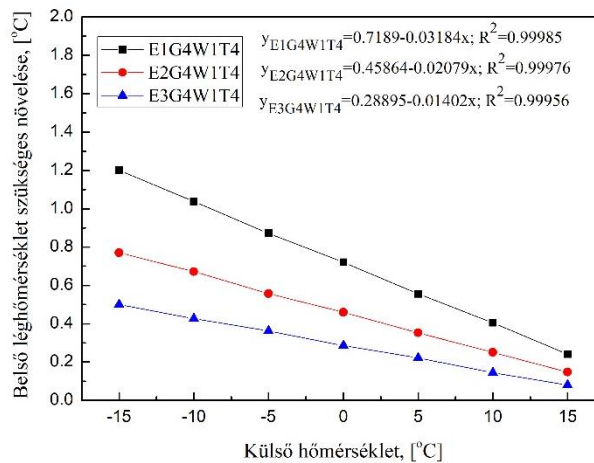
szerkezetek belső felületi hőmérsékleteit és kiszámoltam a közepes sugárzási hőmérsékletet is. Az operatív hőmérséklet változását a külső hőmérséklet függvényében, adott helyiség-geometria (G4), adott üvegezési arány (W1) és adott belső tervezési léghőmérséklet mellett (T4), illetve különböző határolószerkezetek figyelembevételével az 46. ábra mutatja be [142].



46. ábra: Operatív hőmérsékletek a G4 geometria (4.0m×4.0m×2.7m), W1 (20%) üvegezési arány és T4 (23 °C) belső léghőmérséklet mellett (a. E1 határolószerkezetek, b. E2 határolószerkezetek, c. E3 határolószerkezetek)

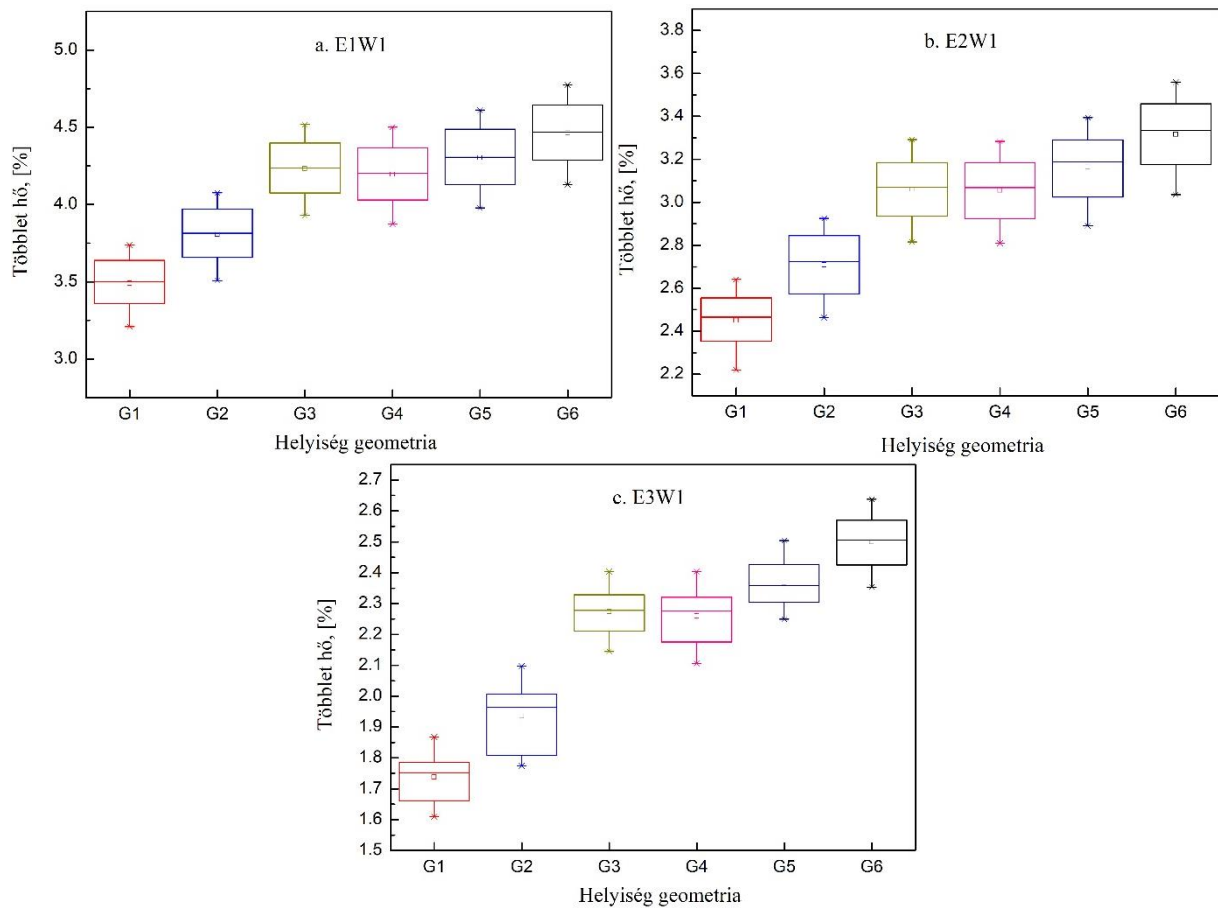
Megállapítható, hogy mindkét fűtési mód esetében az operatív hőmérsékletváltozás gyakorlatilag lineáris. Azonban a külső hőmérsékletek növekedése mellett, radiátoros fűtés esetében az operatív hőmérsékletek növekedése tapasztalható, az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtések esetében viszont az operatív hőmérsékletek csökkenése figyelhető meg. Továbbá látható, hogy azonos külső hőmérsékletek mellett a jobb hőtechnikai paraméterekkel rendelkező határolószerkezetek nagyobb operatív hőmérsékletet eredményeznek a radiátoros fűtés esetében is alacsonyabbat a sugárzó fűtések esetében. Ezek a hőmérsékletkülönbségek viszont nem jelentősek. A kutatás következő lépéseként meghatároztam radiátoros fűtés esetében azokat a léghőmérséklet növekményeket, melyek ahhoz szükségesek, hogy azonos operatív hőmérsékletet érjünk el a két fűtési mód esetében. Az 46. ábrából is megállapítható,

hogy a két fűtési mód esetében az operatív hőmérsékletek közötti különbségek csökkennek a külső hőmérséklet növekedésével (47. ábra, [142]).



47. ábra: A léghőmérséklet szükséges növekménye radiátoros fűtés esetében (E1G4W1T4) (4.0m×4.0m×2.7m, 23 °C and WWR=20%)

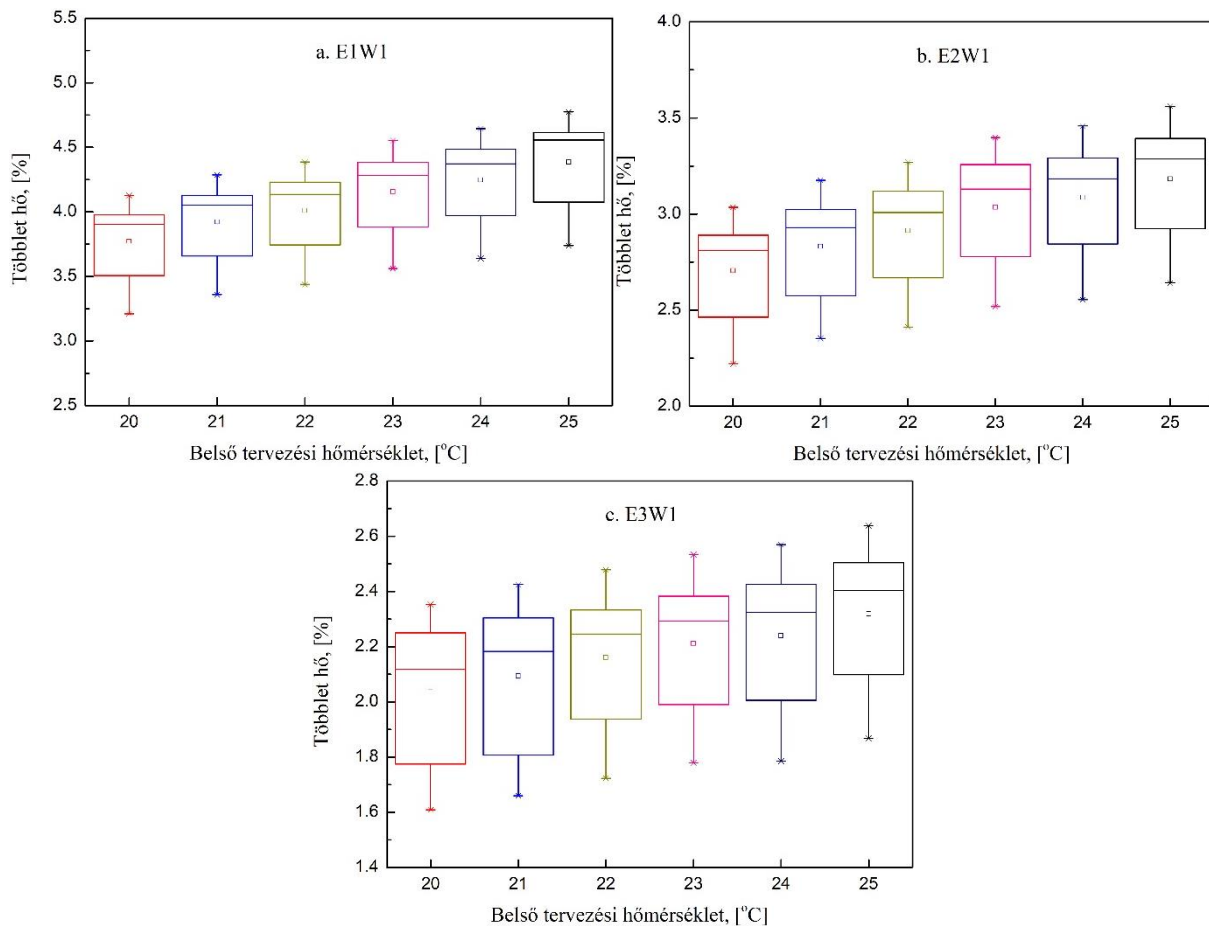
Megállapítható, hogy a hőmérsékletnövekmények változása a külső hőmérséklet függvényében lineáris. A számítások során figyelembe kellett venni, hogy a léghőmérséklet növekedés nagyobb hőleadás mellett érhető el. Ezt a fűtőközeg hőmérsékletének a növelésével értem el (a tömegáram az eredeti állapottal azonos értéken maradt). Viszont, ha növeljük a fűtőttest hőmérsékletét, emelkednek a külső határolószerkezetek felületi hőmérsékletei is. A szükséges léghőmérséklet növekményt mindezen befolyásoló tényezők figyelembevételével határoztam meg. Az energetikai számítások során figyelembe kell venni a sugárzásos hőnyereségeket, a belső hőnyereségeket és a hőnyereségek hasznosítási fokát. Figyelembe véve a rendelkezésemre álló sugárzási adatokat, 85%-os övegezési arányt és 0,65 összesített sugárzásátbocsátó képességet feltételezve végeztem minden egyes fűtési napra az energetikai számításokat. A radiátoros fűtés esetében tehát a szükséges hőbevitel növekményt megállapítottam mind a 432 esetben. Egy adott üvegezési arány esetében a hőbevitel növekmények alakulását az 48. ábra mutatja be, [142].



48. ábra: Többlet hőbevitel a helyiség-geometria függvényében (a. E1W1; b. E2W1; c. E3W1), WWR=20%

A statisztikai számításokat a hat különböző belső léghőmérsékletre kapott eredmények alapján végeztem el.

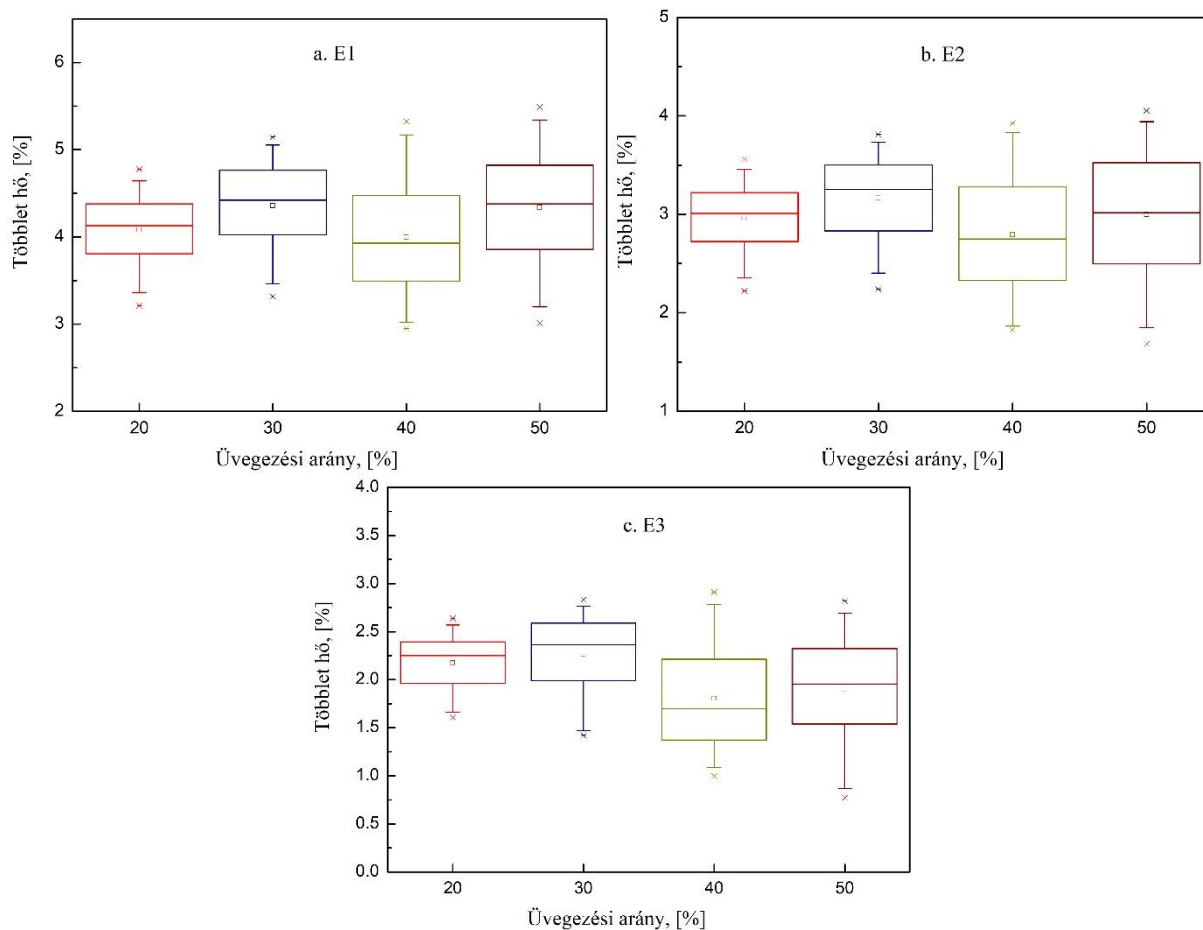
Megállapítható, hogy a helyiség-geometria hatása jelentősen befolyásolja a többlet hőbevitel mértékét. A szükséges hőbevitel növekményt adott üvegezési arány mellett, a belső tervezési hőmérséklet függvényében az 49. ábra mutatja be [142]. Ebben az esetben a statisztikai elemzés a hat különböző geometriára kapott eredmények alapján végeztem el.



49. ábra: Többlet hőbevitel a belső tervezési léghőmérséklet függvényében (a. E1W1; b. E2W1; c. E3W1), WWR=20%

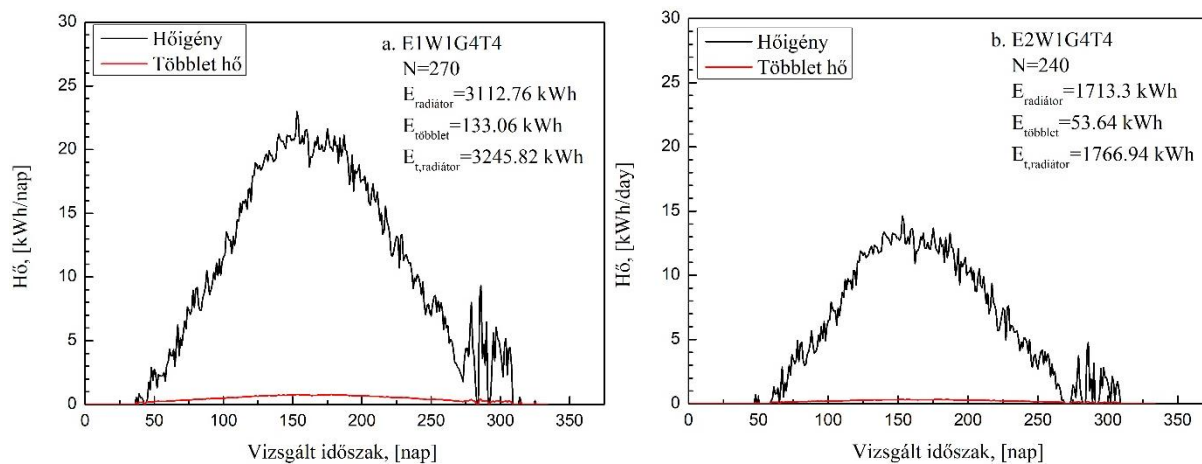
Megállapítottam, hogy 1K különbség a belső léghőmérsékletek között nem vezet szignifikáns különbséghez a többlet hőbevitel mértékében $p=0,05$ szignifikancia szint mellett.

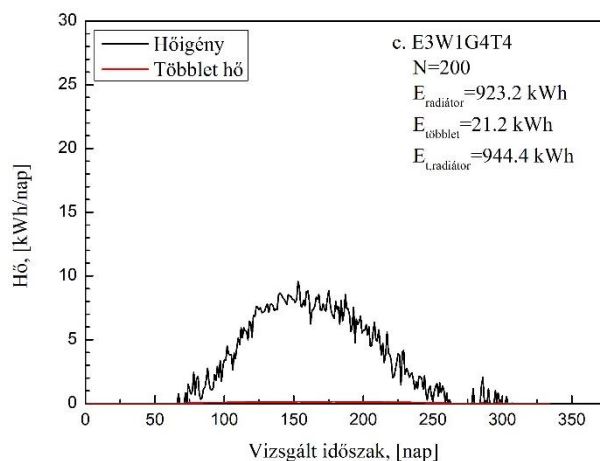
A szükséges többlet hőbevitelt az üvegezési arány függvényében az 50. ábra mutatja be, [142]. A statisztikai elemzést a hat különböző geometria és hat különböző hőmérséklet esetében kapott adatok alapján végeztem el. Megállapítottam hogy a vizsgált üvegezési arányok nem eredményeznek szignifikáns eltérést a többlet hőbevitel értékei között ($p=0,05$).



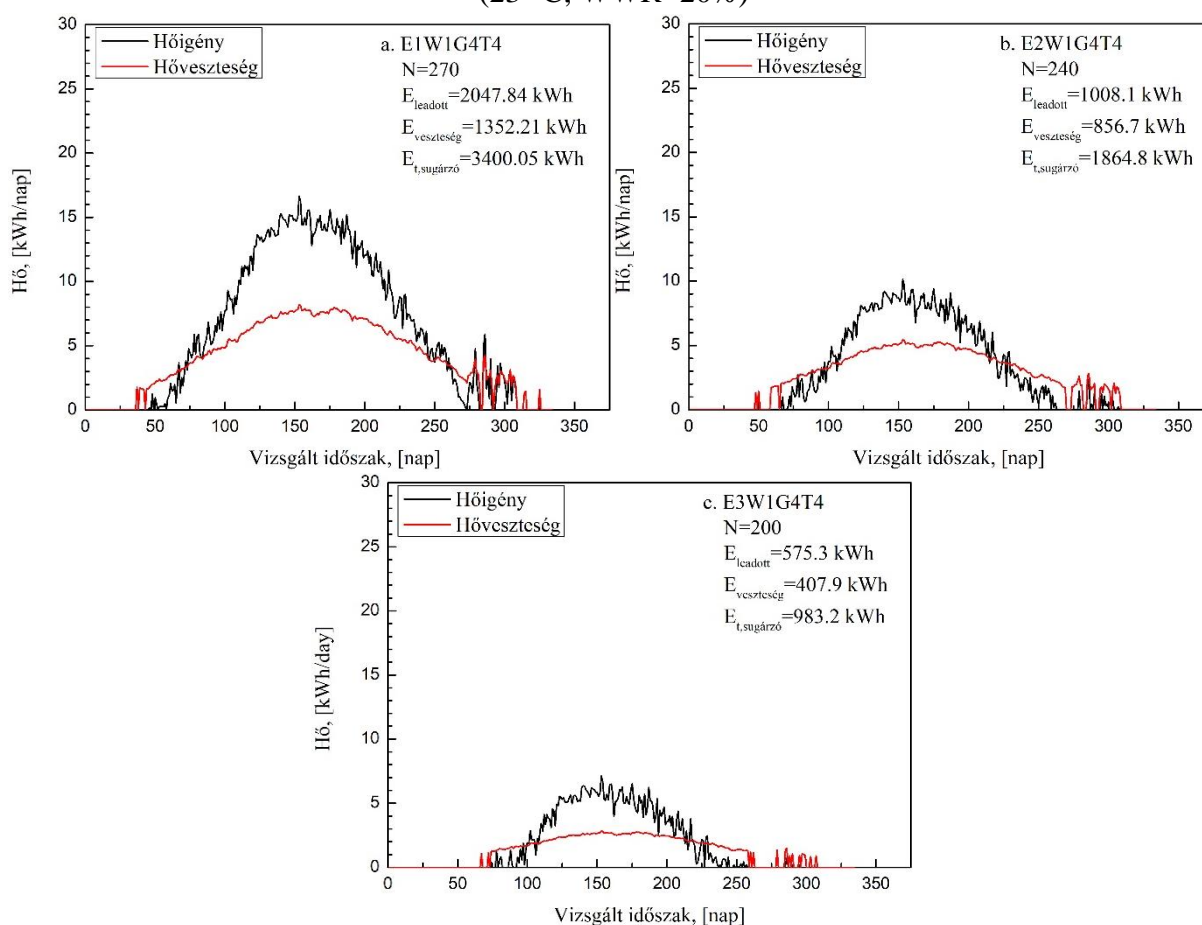
50. ábra: Többlet hőbevétel az üvegezési arány függvényében (a. E1; b. E2; c. E3)

A hőigényeket úgy a radiátoros-, mint a felületfűtés esetében az 51. és 52. ábrák mutatják be [142]. A külső napi átlaghőmérsékleteket az Országos Meteorológiai Szolgálat adatbázisának felhasználásával határoztam meg 1991-2020 évek Debrecenben mért adatai alapján [143]. A napsugárzási adatok a Debreceni Egyetem Meteorológiai állomásán mért globál sugárzási adatokból származnak [93].





51. ábra: Hőigény radiátoros fűtés esetében (a. E1W1G4T4; b. E2W1G4T4 c. E3W1G4T4) (23 °C, WWR=20%)

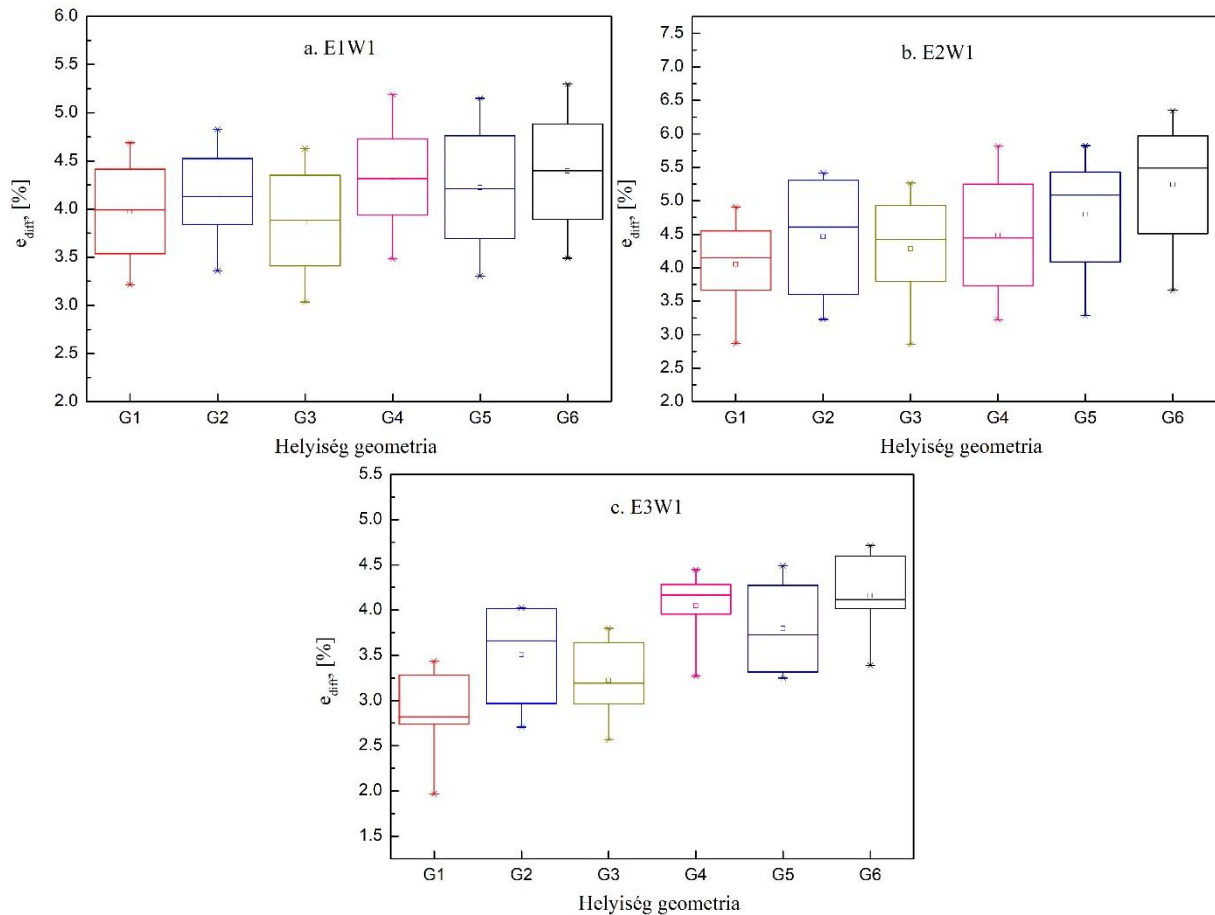


52. ábra: Hőigény alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtés esetében (a. E1W1G4T4; b. E2W1G4T4 c. E3W1G4T4) (23 °C, WWR=20%)

Miután meghatározásra került a teljes hőigény úgy a radiátoros (E_{rad}), mint az alacsony hőmérsékletű sugárzófűtés (E_{sug}) esetében mind a 432 vizsgált esetre, számíthatóak a százalékos különbségek (ϵ_{diff}).

A százalékos különbségeket úgy határoztam meg, hogy a két érték közötti különbséget mindig a nagyobb értékhez viszonyítottam. Adott üvegezési arány mellett, különböző hőtechnikai

minőségű határolószerkezetek esetében a teljes hőigények közötti százalékos eltéréseket a geometria függvényében az 53. ábra szemlélteti [142]. A statisztikai számításokat a hat különböző belső léghőmérsékletre kapott eredmények alapján végeztem el. Megállapítottam, hogy az összes vizsgált esetben az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtés teljes energiaigénye nagyobb volt, mint a radiátoros fűtés teljes energiaigénye.

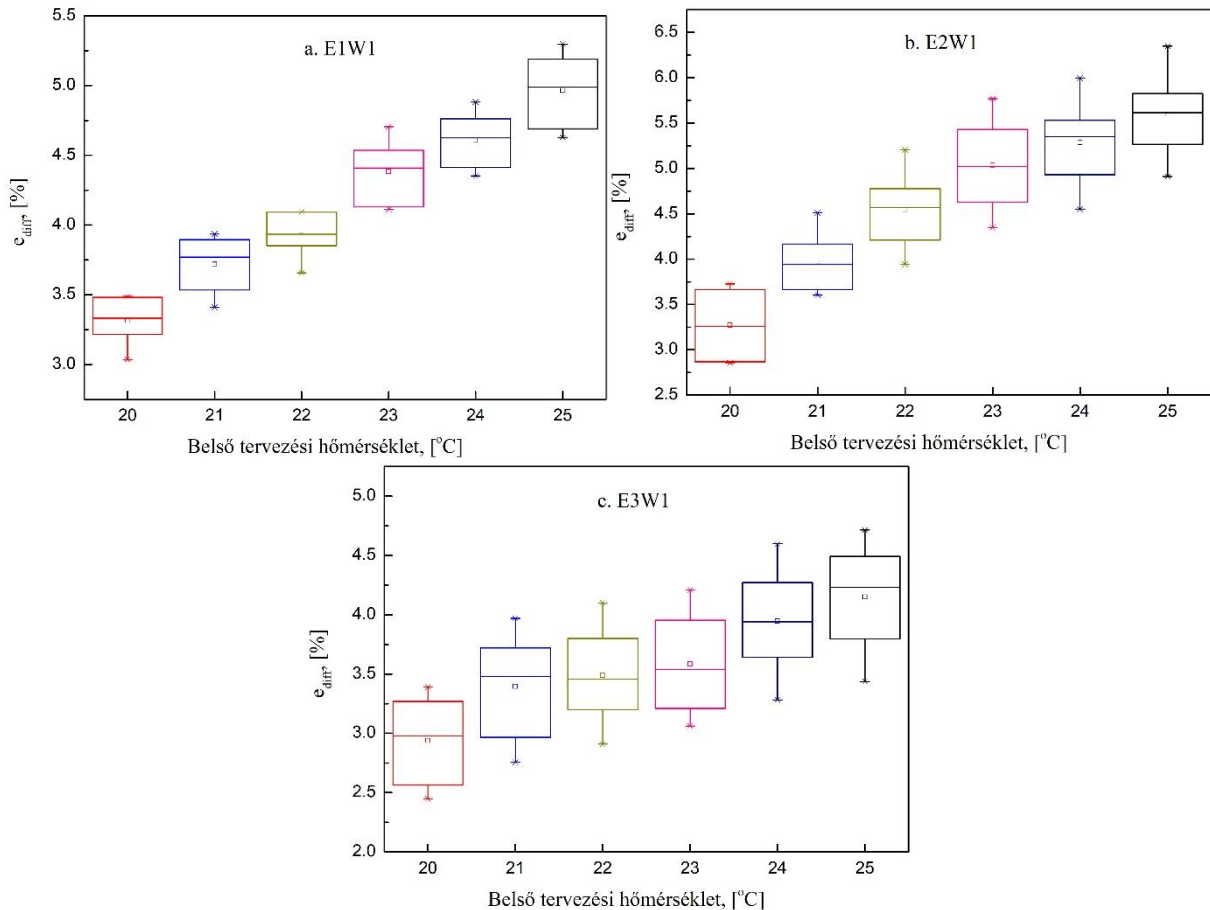


53. ábra: Sugárzó és radiátoros fűtések teljes energiaigényei közötti százalékos eltérések a geometria függvényében (a. E1W1; b. E2W1; c. E3W1), W1=20%

Az energiaigények közötti különbségek nagyobbak a nagyobb alapterülettel rendelkező helyiségek esetében. Ugyanakkor a különbségeket befolyásolja a határolószerkezetek hőtechnikai minősége (a legnagyobb különbségek az E2 típusú határolószerkezetek esetében alakultak ki). A geometria hatását a teljes energiaigényre az egyutas független mintás ANOVA varianciánálízis módszerrel vizsgáltam (Tukey teszt). A variancia homogenitást Levene módszerrel vizsgáltam. Az E1 és E2 határolószerkezetek esetében $p=0,05$ szignifikancia szinten az átlagok közötti különbségek és a varianciakülönbségek nem szignifikánsak. Az E3 határolószerkezetek esetében, $p=0,05$ szignifikancia szinten, az egyes esetek közötti varianciakülönbségek nem szignifikánsak, azonban az átlagok közötti különbségek szignifikánsak a G1-G4, G1-G5, G1-G6 és G3-G6 geometriákkal rendelkező

helyiségek között. A varianciakülönbségek nem szignifikánsak, azonban az átlagok közötti különbségek szignifikánsak az E1-E2, E1-E3 és E2-E3 határolószerkezetek között, kivéve a G4 geometriával rendelkező helyiséget.

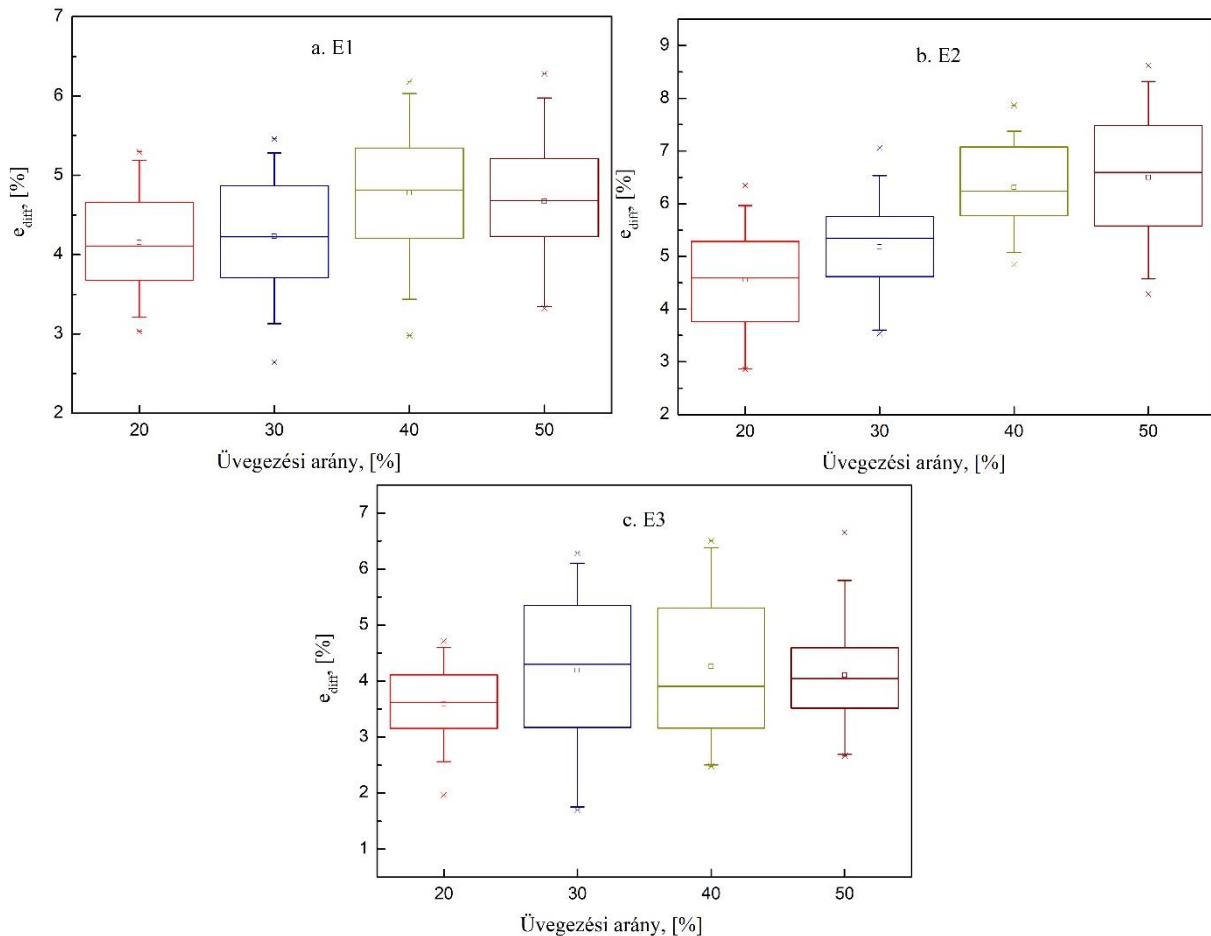
Adott üvegezési arány mellett a teljes energiaigények közötti különbségeket a belső tervezési léghőmérsékletek függvényében mutatja be a 54. ábra [142].



54. ábra: Sugárzó és radiátoros fűtések teljes energiaigényei közötti százalékos eltérések a belső léghőmérséklet függvényében (a. E1W1; b. E2W1; c. E3W1), W1=20%

Megállapítottam, hogy adott határolószerkezetek esetében, magasabb belső léghőmérsékletek mellett egyre nagyobb lesz az eltérés a két fűtési mód teljes energiaigényei között. A legnagyobb különbségek az E2 határolószerkezetek esetében adódtak. Az E1 határolószerkezetek esetében $p=0,05$ szinten az átlagok közötti különbségek szignifikánsak kivéve a 22-23°C, 23-24°C és a 24-25°C hőmérsékletek közötti értékeket. Az E2 határolószerkezetek esetében az átlagok közötti eltérések nem szignifikánsak a 20-21°C, 21-22°C, 22-23°C, 22-24°C, 23-24°C, 23-25°C hőmérsékletek között. Az E3 határolószerkezetek esetében az átlagok közötti különbségek szignifikánsak a 20-24°C és a 20-25°C hőmérsékletek között. A szignifikanciavizsgálatot elvégeztem adott hőmérséklet mellett a

határolószervezetekre vonatkozóan is. Kimutattam, hogy a különböző határolószervezetek nem okoznak szignifikáns eltéréseket 20 °C és 21 °C hőmérsékletek mellett. A különbségek szignifikánsak az E2 és E3 között 22 °C és 23 °C hőmérsékletek esetében. E1-E3 és E2-E3 határolószervezetek esetében a különbségek szignifikánsak 25 °C mellett. 24 °C esetében viszont az eltérések szignifikánsak mindegyik határolószervezet között. Az üvegezési arány hatását a 55. ábra szemlélteti [142].

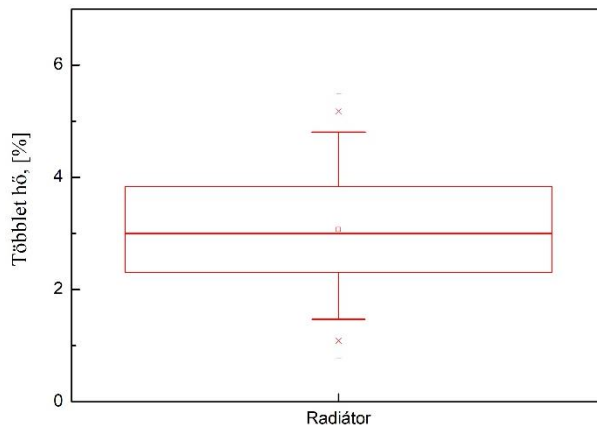


55. ábra: Sugárzó és radiátoros fűtések teljes energiagigényei közötti százalékos eltérések az üvegezési arány függvényében (a. E1; b. E2; c. E3)

A statisztikai elemzést a hat különböző geometria és hat különböző hőmérséklet esetében kapott adatok alapján végeztem el. Az egyutas ANOVA alkalmazásával kimutattam, hogy az E1 határolószervezetek esetében $p=0,05$ szignifikancia szinten az eltérések szignifikánsak 20%–40%, 20%–50%, 30%–40% és 30%–50% üvegezési arányok között. Az E2 határolószervezetek esetében a különbségek szignifikánsak minden esetben kivéve a 40%–50% közötti esetet. Ellenben az E3 határolószervezetek esetében az egyes üvegezési arányok közötti különbségek nem szignifikánsak kivéve a 20%–40% közötti esetet.

10.3 Összegzés, következtetések

Az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtések esetében az operatív hőmérséklet magasabb, mint a radiátoros fűtések esetében. A két operatív hőmérséklet közötti különbség azonban nem állandó a fűtési idény során, mivel a magasabb külső hőmérsékletek mellett a radiátoros fűtés esetében növekszik, az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtések esetében pedig csökken az operatív hőmérséklet. Ahhoz, hogy azonos operatív hőmérsékletek alakuljanak ki a kétféle fűtési mód alkalmazásánál, a radiátoros fűtés esetében növelni kell a léghőmérsékletet. A léghőmérséklet növelését a fűtőtest felületi hőmérsékletének növelésével érjük el. A léghőmérséklet növelésével azonban a helyiség szerkezeteinek belső felületi hőmérsékletei is növekednek. Ennek megfelelően az operatív hőmérséklet növelését a levegő és a közepes sugárzási hőmérsékletek együttes, de egymástól függő növelésével érjük el. A radiátoros fűtés esetében tehát az operatív hőmérsékletek növelését csak többletenergia bevitellel érhetjük el. A 10.2 alfejezetben részletesen bemutatásra került, hogy a többletenergia függ a helyiség-geometriától, a határolószerkezetek hőtechnikai minőségétől, az üvegezési aránytól és a belső léghőmérséklet tervezési értékétől is. A többletenergia bevitel átlagos értéke 3,07% (SD=1,03) a vizsgált 432 esetben (56. ábra [142]).



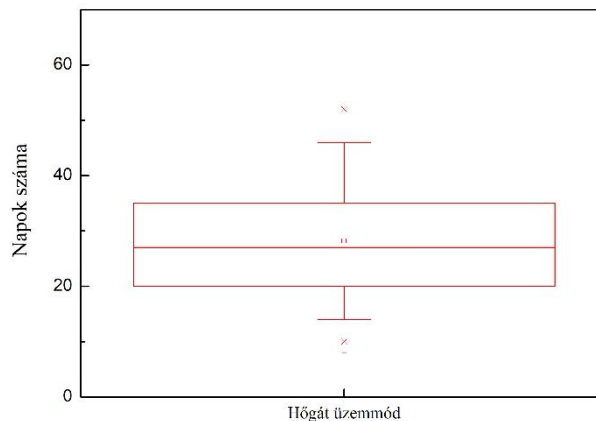
56. ábra: Többletenergia bevitel radiátoros fűtés esetében

Ezzel a többletenergia bevitellel érhető el az, hogy az operatív hőmérséklet azonos legyen, a kombinált padló-mennyezet fűtés esetében kialakuló operatív hőmérséklettel.

Az alacsony hőmérsékletű fűtés esetében a helyiségbe leadott hőmennyiség jelentősen kisebb, mint a radiátoros fűtés esetében. Ugyanakkor az épületszerkezetbe beépített fűtőrétegek nem csak a fűtött helyiség irányába, hanem a szomszédos tér felé (ami lehet belső vagy külső, fűtött vagy fűtetetlen) is adnak le hőt. Amennyiben a leadott hő egy része a külső térbe irányul, a rendszer hőveszteségként kezelhetjük. A vizsgált 432 különböző esetben a

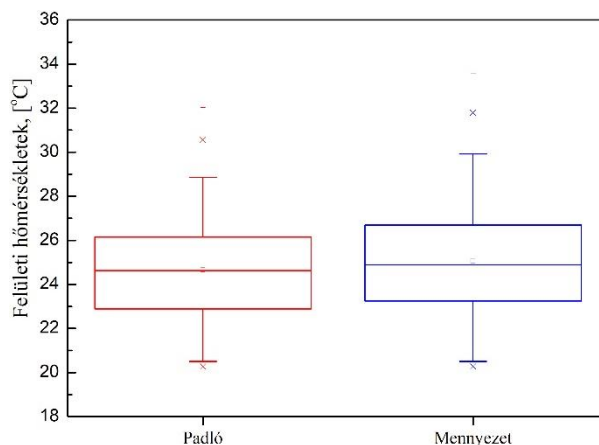
kombinált padló-mennyezetfűtési mód összes hővesztesége a rendszer teljes hőigényének 40,71%-a (SD=5,3). A kapott eredményeket alátámasztják Li et al. eredményei is [130]. Ezt a hőmennyiséget azonban figyelembe kell venni, amikor energetikai összehasonlításra kerül sor más fajta fűtési rendszerekkel. Ennek megfelelően a vizsgálataim során a teljes hőigényt a helyiségbe leadott hőmennyiségnek és a rendszer hőveszteségének összege jelenti.

A határolószervezetbe beépített fűtőrétegek esetében a fűtési szezon hossza azonos, mint a radiátoros fűtési módban, azonban miután elindul a fűtés néhány napig elegendő a léghőmérséklettel azonos felületi hőmérsékletet biztosítani a fűtött térben, mivel a helyiség hőveszteségei csökkennek (hőgát), de a hőnyereségei nem változnak. Ennek megfelelően a hőnyereségek néhány nappal tovább képesek fedezni a helyiség hőveszteségeit. A vizsgált 432 különböző esetben azoknak a napoknak a száma, melyek során a beépített fűtőréteg gyakorlatilag hőgátként (thermal barrier) működött 8 és 56 között változott (27. ábra, [142]). A hosszabb hőgát üzemmód a nagyobb méretű helyiségekben alakult ki, melyek jobb hőtechnikai minőségű határolószervezetekkel rendelkeztek.



57. ábra: A hőgát üzemmód hossza

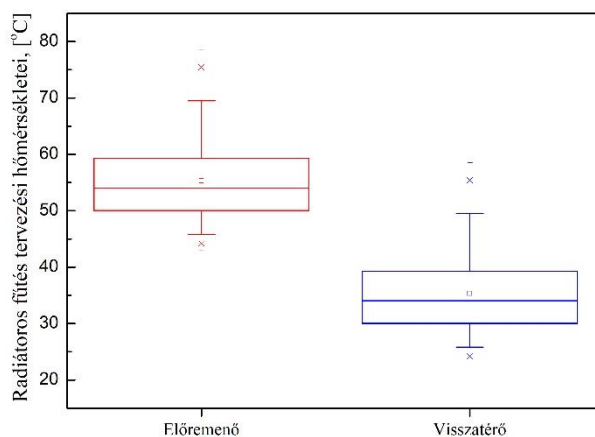
Az alacsony hőmérsékletű kombinált padló-mennyezet fűtés esetében a vizsgált 432 esetre vonatkozóan, a padló átlagos hőmérséklete 24,7 °C, a mennyezet átlagos tervezési hőmérséklete 25,07 °C volt (58. ábra, [142]).



58. ábra: A padló és a mennyezet átlagos tervezési hőmérséklete (432 eset)

Megállapítható, hogy a hőigény 60%-padló, 40%-mennyezetfűtés arányú megosztása ellenére a mennyezet felületi hőmérséklete némileg meghaladja a padló hőmérsékletét. Ez az alacsonyabb hőátadási tényező értékkel magyarázható.

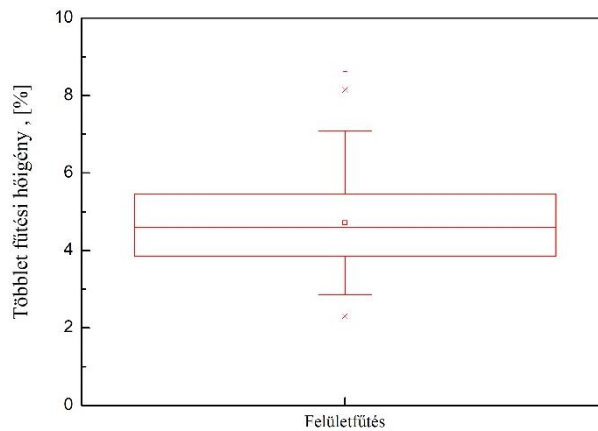
Radiátoros fűtési mód esetében az átlagos tervezési előremenő és visszatérő hőmérsékleteket szemlélteti az 59. ábra [142]. Az átlagos előremenő/visszatérő hőmérsékletértékek 55.33°C/35.33°C (SD=7.1). Az előremenő és visszatérő hőmérsékletek tervezési értékeinek minimumai 43.04°C/23.04°C és maximumai 78.47°C/58.47°C. Megállapítható, hogy ezek az értékek a tervezés és az üzemeltetés során is a gyakorlatban alkalmazhatóak és elterjedtek.



59. ábra: Előremenő és visszatérő hőmérsékletek radiátoros fűtés esetében

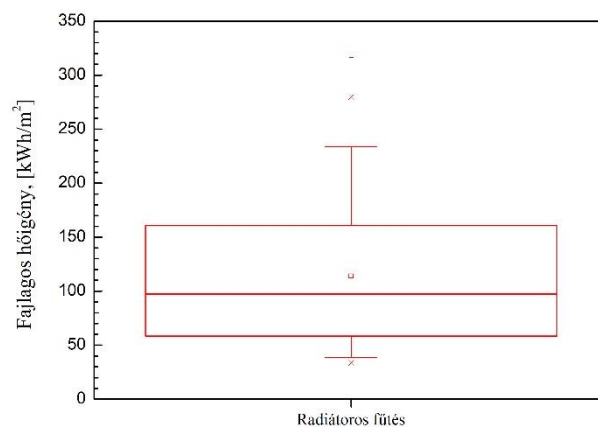
Azonos operatív hőmérséklet mellett, ha összehasonlítjuk a teljes fűtési hőigényt radiátoros és a kombinált padló-mennyezetfűtést feltételezve a 432 különböző esetben, akkor megállapíthatjuk, hogy az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtésnek nagyobb a teljes hőigénye, mint a radiátoros fűtésnek. A kombinált padló-mennyezet fűtési mód teljes hőigénye

átlagosan 4,71%-al (SD=1,25) haladja meg a radiátoros fűtési mód teljes hőigényét (60. ábra, [142]).

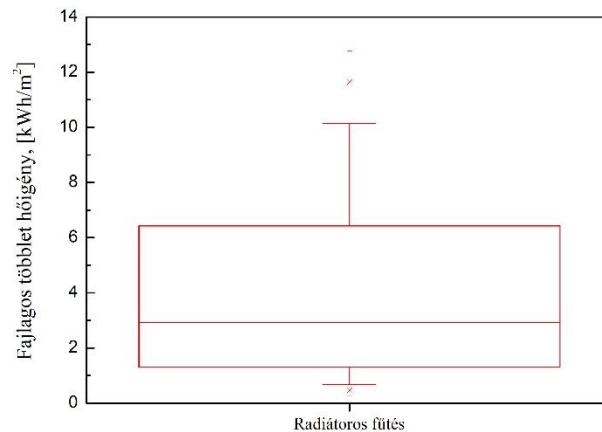


60. ábra: Többlet hőigény az alacsony hőmérsékletű padló-mennyezet fűtés esetében

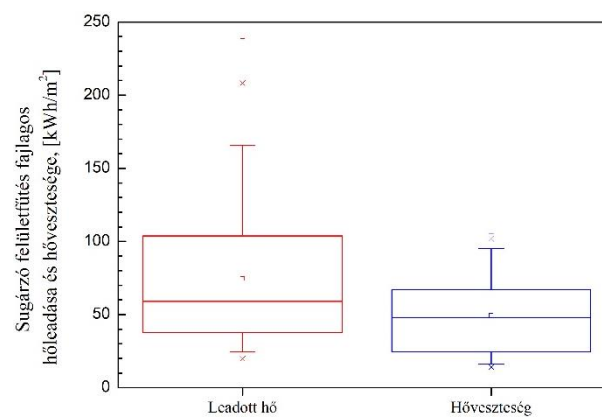
A vizsgált 432 különböző esetben a helyiségbe bevitt hőmennyiség 1577,7 kWh (SD=1031,8) radiátoros fűtési mód esetében (61. ábra, [142]). A radiátoros fűtési mód alkalmazásával az azonos operatív hőmérséklet eléréséhez szükséges többlet hő átlagos értéke a 432 különböző helyiségben 57,8 kWh (SD=53,6) (62. ábra, [142]). Az alacsony hőmérsékletű kombinált padló-mennyezetfűtés esetében a helyiségbe bevitt hőmennyiség átlagos értéke 998,8 kWh (SD=647,4) viszont a rendszer hőveszteségének átlagos értéke a vizsgált 432 különböző helyiségben 721,3 kWh (SD=509,7) (63. ábra, [142]).



63. ábra: A helyiségbe leadott hőmennyiség radiátoros fűtési mód esetében



62. ábra: Többlet hőmennyiség radiátoros fűtés esetében



63 ábra: Helyiségbe leadott hőmennyiség és a rendszer hővesztése az alacsony hőmérsékletű kombinált padló-mennyezetfűtés esetében

11. A kutatómunka összefoglalása

A kutatásom elsőrendű célja az volt, hogy felmérjem a Hajdú-Bihar vármegyei családi házak, az 1950 után épült téglafalazattal rendelkező társasházak, illetve panelépületek hőfelhasználását és az ebből származó széndioxid kibocsátást. Célom volt továbbá, hogy jó példák elemzése alapján javaslatokat tegyek ezen épületek fűtését illetően a teljes vagy részleges dekarbonizációra, valamint a megvizsgáljam a jelenleg széles körben alkalmazott alacsony hőmérsékletű felületfűtések hatékonyságát.

Első lépésben áttekintettem a kutatási céljaimmal kapcsolatos eddigi szakirodalmat, az európai illetve a hazai lakóépület állományt a hőtechnikai jellemzőkre fókuszálva. Az elérhető KSH adatok alapján felmértem a Hajdú-Bihar vármegyei lakóépület állományt és meghatároztam az általam vizsgált épülettípusok számát és főbb energetikai jellemzőit.

Áttekintettem és rendszereztem a lakóépületekre vonatkozó előírásokat, szabványokat és rendeleteket és arra a következtetésre jutottam, hogy 2006 előtt az épületek

határolószervezeteinek hőtechnikai minőségét nem kizárólag az éppen aktuális hőtechnikai előírás, vagy szabvány határozta meg, hanem jelentős mértékben szerepet játszottak a rendelkezésre álló építőanyagok fizikai jellemzői is. Nem volt elsőrendű cél az előírások és szabványok javaslatainak betartása, hanem az éppen elérhető építőanyagok és a rendelkezésre álló építési technológia lehetőségei szerint épültek az épületek. A meghatározott lakóépület típusok esetében elemeztem a fűtési energiaigényt figyelembe véve a 2002, 2012 és 2022 években érvényben lévő a határolószervezetekre vonatkozó követelményeket, illetve javaslatokat.

- Az Országos Meteorológiai Szolgálat adatbázisában elérhető napi átlaghőmérsékleteket elemeztem 1930-2020 időintervallumban, melyet három 30 éves időszakra bontottam. Szeptember 1 és Április 30 közötti időszakot vizsgálva felrajzoltam a minimum hőmérséklet görbéket és megállapítottam, hogy a minimum értékek esetében a legkisebb hőmérséklet is nagyobb, mint a jelenleg érvényben lévő -15 °C méretezési hőmérséklet. Azonban a -15 °C méretezési értékhez viszonyítva a különbségek a három 30 éves időszakra vonatkozóan növekednek.
- Páros t -próba szignifikancia vizsgálatot végeztem és megállapítottam, hogy $p=0,05$ szignifikancia szint mellett Debrecenben az 1931-1960 időszakhoz viszonyítva a minimumhőmérsékletek 1961-1990 időszakban szignifikánsan nagyobbak, továbbá az 1961-1990 időszakhoz viszonyítva az 1991-2020 időszakban a minimumhőmérsékletek szintén szignifikánsan nagyobbak.
- Az 1991-2020 időszakban Debrecenben mért napi átlaghőmérsékletek alapján kidolgoztam és elkészítettem a hőfokgyakorisági görbét.

Az elmúlt közel másfél évtizedben számos épület energetikai felmérését és elemzését végeztem el. Rendelkezésemre állt 1200 épületenergetikai elemzés, melynek adatait feldolgoztam és Debrecenben 236 családi ház, 115 panellakás és 118 téglafalazatú társasházi lakás, továbbá Hajdú-Bihar vármegyében (kivéve Debrecen) 372 családi ház energetikai adatai álltak rendelkezésemre. Az energetikai számítások a WinWatt 32 7.63 szoftverrel készültek, ami integrálja a 2023-ban visszavont 7/2006 épületenergetikai rendelet számítási módszerét. Az épületenergetikai számítási módszer 2023. novemberben változott, de a kutatási munkám során a 2023. júliusig elvégzett energetikai számításokat vettem figyelembe. Mindez a számítások pontosságát és az eredményeket érdemben nem befolyásolja. Az energetikai számítás adatait statisztikai feldolgozását ORIGIN LAB 9.55 szoftver segítségével végeztem el.

Az épületeket építési évek szerint nyolc kategóriába soroltam, így kialakult az 1960 előtti, 1960-1969 között, 1970-1979 között, 1980-1989 között, 1990-1999 között, 2000-2009 között, 2010-2019 között és 2020-2023 között épült csoport.

A debreceni családi házak elemzése során az alábbi következtetésekre jutottam:

- Az új épületek fajlagos hővesztésgtényezője, valamint a fajlagos fűtési energiaigény az elmúlt 90 év során 15,2%-ra, illetve 18,5%-ra csökkent.
- A vizsgált épületek többségét legalább egyszer már felújították hőtechnikai szempontból, mivel a hőszükséglet az elméleti értéknél 27,6-41,4%-al alacsonyabb.
- Az épületeket jellemző A/V tényező folyamatosan csökkent az évtizedek során. Ennek több oka is lehet. Lehetséges, hogy az építészek a tervezés során figyelmet fordítanak arra, hogy az alacsonyabb A/V tényezővel rendelkező épületek kisebb energiaigénnyel rendelkeznek. Másik leghetséges ok, az egyre nagyobb igények miatt egyre nagyobb alapterületű, többszintes épületek épülnek, melyek alacsonyabb A/V aránnyal rendelkeznek.
- Debrecenben a családi házak nettó fűtött alapterülete $p=0,05$ szignifikancia szint mellett szignifikánsan növekedett az évtizedek során, míg a fajlagos fűtési energiaigény $p=0,05$ mellett szignifikánsan csökkent.
- A felhasználói szokások jelentősen befolyásolják az épületek hőfelhasználásából származó energiaigényt. A vizsgált épületek esetében a belső léghőmérséklet 20 °C helyett 26 °C-ra történő beállítása 26%-al növelte a széndioxid kibocsátást. Ugyanakkor a használati melegvíz előállításra fordított kevesebb hőfelhasználás miatt a valós széndioxid kibocsátás az elméleti értéknél 38,2%-al kisebb.
- Családi házaknál a hőszivattyúk és a napelemes rendszerek együttes alkalmazása a hőfelhasználás vonatkozásában optimális esetben éves mérlegben (szaldós elszámolást feltételezve) nulla széndioxid kibocsátást eredményezhet.
- A javasolt dekarbonizációs csomagok alkalmazásával Debrecenben az éves széndioxid kibocsátás 289746 tonna/a értékkel csökkenthető (ez 73%-os csökkenést jelent).

A debreceni társasházi lakások, illetve a Hajdú-Bihar vármegyei (Debrecen nem ideszámítva) családi házakat is elemeztem és így a csoportok között vizsgálhattam az eltéréseket. Felmerült a kérdés, hogy vannak-e, és ha vannak milyen mértékűek az eltérések a nagyvárosi (Debrecen) és vidéki épületek jellemzői között? Az alábbi következtetéseket vontam le:

- Hajdú-Bihar vármegyében úgy a nagyvárosi, mint a vidéki környezetben a családi házak A/V tényezője csökken az évtizedek során, viszont Debrecenben a csökkenés nagyobb mértékű. A nettó fűtött alapterület úgy Debrecenben, mint a vidéki

településeken növekszik, azonban a növekedés jelentősebb a nagyvárosban. Páros t -próba alkalmazásával bizonyítottam, hogy $p=0,05$ szinten a debreceni és a vidéki családi házak közötti különbség szignifikáns, úgy az A/V , mint a fűtött alapterület vonatkozásában.

- Hajdú-Bihar vármegyében a vidéki családi házak esetében az 1959 előtt, illetve a 2020 után épült épületek fajlagos hőveszteségtényezői közötti arány 6,7 Debrecenben, és 5,4 vidéki épületekben. Ugyanez az arány a nettó fajlagos fűtési hőigény esetében 5,4 a debreceni családi házak esetében és 4,5 a vidéki családi házak esetében. A trend tehát hasonló a két csoportban, azonban ezek a paraméterek szignifikánsan nagyobbak a vidéki családi házak esetében.
- Hajdú-Bihar vármegyében a fajlagos széndioxid kibocsátások aránya 5.3 Debrecenben és 3.5 vidéki családi házak esetében. Páros t -próba alkalmazásával bizonyítottam, hogy $p=0,05$ szinten a debreceni és a vidéki családi házak közötti különbség nem szignifikáns a fajlagos széndioxid kibocsátás vonatkozásában. Megállapítottam, hogy a debreceni családi házak hőtechnikai és energetikai paraméterei jobbak, azonban a fajlagos széndioxid kibocsátás esetében a különbség nem szignifikáns. Ez annak tudható be, hogy 2000-ig vidéken inkább a tűzifa és a biomassza az elterjedt energiahordozó, nagyvárosban azonban a földgáz. Az új építésű épületekben úgy a vidéki, mint a nagyvárosi épületekben egyre nagyobb a hőszivattyúk aránya.
- Debrecenben a téglafalazattal rendelkező többlakásos családi házak esetében a vizsgált időintervallumban a fajlagos hőveszteségtényező csökkenése 3,5-szörös, a nettó fűtési hőigény csökkenése 3,7-szeres a fajlagos széndioxid kibocsátás csökkenése pedig 2,8-szoros. Összehasonlításban a debreceni családi házak jellemzőivel, megállapítottam, hogy a $p=0,05$ szinten a különbségek csak a fajlagos hőveszteségtényező esetében szignifikánsak. A vidéki családi házakkal történt összehasonlításban, $p=0,05$ szinten a fajlagos hőveszteségtényezők és a fajlagos nettó fűtési energiaigények közötti eltérések is szignifikánsak.
- Az építés időpontjában (1970-1989) Hajdú-Bihar vármegyében a panelépületek a legjobb hőtechnikai és épületenergetikai jellemzőkkel rendelkeztek. Ezek az épületek túlnyomó részben távfűtési rendszerre kapcsolódnak. A távfűtési rendszerek azonban nagy mennyiségű segédenergiát igényelnek, illetve jelentős hőveszteséggel rendelkeznek. Ez miatt összességében az energiahatékonyság és a széndioxid kibocsátás vonatkozásában is a panelépületek jelenleg az utolsó helyen állnak a vizsgált épülettípusok között.

- Úgy a vidéki, mint a nagyvárosi családi házak esetében, hőszivattyús hőtermelés és megfelelően méretezett energiatárolós napelemes rendszer alkalmazásával (tehát a napjainkban ismert és elérhető technológiák alkalmazásával) elérhető a nulla széndioxid kibocsátás és akár a pozitív éves energiamérleg is. Ez megvalósítható a téglafalazattal rendelkező többlakásos társasházak esetében is, azonban a panelépületeknél úgy az energiamérlegnek, mint a fajlagos széndioxid kibocsátásnak is van egy alsó határa, melynél a jelenleg ismert technológiák mellett ezek a paraméterek nem csökkenthetők tovább.

Napjainkban, úgy az új építésű, mint felújított épületek esetében is széles körben alkalmazzák az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtési megoldásokat. Ezek a szakirodalom szerint számos előnnyel rendelkeznek a hagyományos radiátoros fűtésekkel szemben, így jobb hőérzetet biztosítanak alacsonyabb energiafelhasználás mellett. A szerkezetbe épített fűtőrétegek elemzésére alkalmas meglévő számítási modellt laboratóriumi mérésekkel és szakfolyóiratokban publikált mérési eredmények alapján validáltam. Ennek felhasználásával arra következtetésre jutottam, hogy a határolószerkezetbe épített alacsony hőmérsékletű fűtési módok esetében a teljes energiafelhasználás meghaladja a hagyományos radiátoros fűtési mód energiaigényét. Felmerült a kérdés, hogy mennyiben befolyásolja a teljes fűtési energiaigényt a helyiség mérete, az üvegezési arány, a tervezési léghőmérséklet valamint a határolószerkezetek hőtechnikai minősége, ha azonos operatív hőmérsékletet biztosítunk a fűtött térben? A kutatások elvégzése után az alábbi következtetésekre jutottam:

- Az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtések esetében az operatív hőmérséklet magasabb, mint a radiátoros fűtések esetében. A két operatív hőmérséklet közötti különbség azonban nem állandó a fűtési idény során, mivel a magasabb külső hőmérsékletek mellett a radiátoros fűtés esetében növekszik, az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtések esetében pedig csökken az operatív hőmérséklet. Ahhoz, hogy azonos operatív hőmérsékletek alakuljanak ki a kétféle fűtési mód esetében, a radiátoros fűtés esetében növelni kell a léghőmérsékletet. A léghőmérséklet növelését a fűtőttest felületi hőmérsékletének növelésével érjük el. A léghőmérséklet növelésével azonban a helyiség szerkezeteinek belső felületi hőmérsékletei is növekednek. Ennek megfelelően az operatív hőmérséklet növelését a levegő és a közepes sugárzási hőmérsékletek együttes és egymástól függő növelésével érjük el. A radiátoros fűtés esetében tehát az operatív hőmérsékletek növelését csak többletenergia bevitellel érhetjük el. A többletenergia függ a helyiség-geometriától, a határolószerkezetek

hőtechnikai minőségétől, az üvegezési aránytól és a belső léghőmérséklet tervezési értékétől is. A többletenergia bevitel átlagos értéke 3,07% (SD=1,03) a vizsgált 432 esetben.

- Az alacsony hőmérsékletű fűtés esetében a helyiségbe leadott hőmennyiség jelentősen kisebb, mint a radiátoros fűtés esetében. Ugyanakkor az épületszerkezetbe beépített fűtőrétegek nem csak a fűtött helyiség irányába, hanem a szomszédos tér felé (ami lehet belső vagy külső, fűtött vagy fűtetetlen) is adnak le hőt. Amennyiben a leadott hő egy része a külső térbe irányul, a rendszer hőveszteségeként kezelhetjük. A vizsgált 432 különböző esetben a kombinált padló-mennyezetfűtési mód összes hővesztesége a rendszer teljes hőigényének 40,71%-a (SD=5,3).
- Azonos operatív hőmérséklet mellett, ha összehasonlítjuk a teljes fűtési hőigényt radiátoros és a kombinált padló-mennyezetfűtést feltételezve a 432 különböző esetben, akkor megállapíthatjuk, hogy az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtésnek nagyobb a teljes hőigénye, mint a radiátoros fűtésnek. A kombinált padló-mennyezet fűtési mód esetében a teljes hőigény átlagosan 4,71%-al (SD=1,25) haladja meg a radiátoros fűtési mód teljes hőigényét.
- A határolószervezetbe beépített fűtőrétegek esetében, a fűtési szezon hossza azonos, mint a radiátoros fűtési módban, azonban miután elindul néhány napig elegendő a léghőmérséklettel azonos felületi hőmérsékletet biztosítani a fűtött térben, mivel a helyiség hőveszteségei csökkennek (hőgát), de a hőnyereségei nem változnak. Ennek megfelelően a hőnyereségek néhány nappal tovább képesek fedezni a helyiség hőveszteségeit. A vizsgált 432 különböző esetben azoknak a napoknak a száma, melyek során a beépített fűtőréteg gyakorlatilag hőgátként (thermal barrier) működött 8 és 56 között változott. A hosszabb hőgát üzemmód a nagyobb méretű helyiségekben alakult ki, melyek jobb hőtechnikai minőségű határolószervezetekkel rendelkeztek.

12. Új eredmények, tézisek

Az elvégzett kutatás során több megállapítást tettem, melyek új eredménynek tekinthetők és segíthetik a dekarbonizációs célok elérésén munkálkodó szakemberek és döntéshozók munkáját, valamint az építész-épületgépész tervezők és üzemeltetők munkáját.

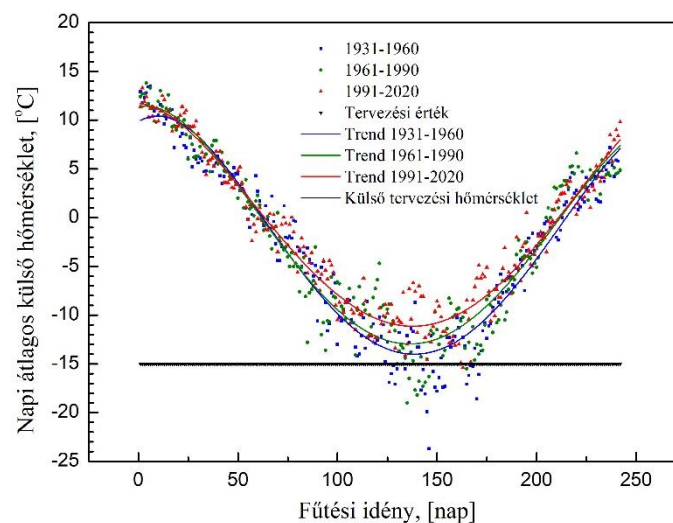
12.1 Külső léghőmérsékletek Debrecenben a fűtési idény során

Az Országos Meteorológiai Szolgálat adatbázisában elérhető napi átlaghőmérsékleteket elemeztem 1931-2020 időintervallumban, melyet három 30 éves időszakra bontottam.

Szeptember 1 és Április 30 közötti időszakot vizsgálva felrajzoltam a minimum hőmérséklet görbéket és megállapítottam, hogy a minimum értékek esetében a legkisebb hőmérséklet is nagyobb, mint a jelenleg érvényben lévő (-15) °C méretezési hőmérséklet, azonban a (-15) °C méretezési értékhez viszonyítva a különbségek a három 30 éves időszakra vonatkozóan növekednek.

1. tézis

$p=0,05$ szignifikancia szint mellett Debrecenben a szeptember 1 és április 30 időszakban mért napi átlaghőmérsékletek minimum értékei az 1961-1990 évekre vonatkozóan szignifikánsan nagyobbak, mint 1931-1960 években voltak, továbbá az 1991-2020 években ismét szignifikánsan nagyobbak, mint az 1961-1990 években voltak. A napi átlaghőmérsékletek abszolút minimum értéke 1961-1990 évekre vonatkozóan 1,04 °C-al nagyobb, mint az 1931-1960 években volt, az 1991-2020 években pedig a napi átlaghőmérsékletek abszolút minimum értéke 1,82 °C-al volt nagyobb, mint az 1961-1990 években volt.



T1. ábra A napi átlaghőmérsékletek minimumértékei Debrecenben (Szeptember 1 – Április 30)

12.2 Lakóépületek energetikai elemzése Hajdú-Bihar vármegyében

Rendelkezésemre állt 1200 épületenergetikai elemzés, melynek adatait feldolgoztam és Debrecenben 236 családi ház, 115 panellakás és 118 téglafalazatú társasházi lakás, továbbá Hajdú-Bihar vármegyében (kivéve Debrecen) 372 családi ház energetikai adatai álltak rendelkezésemre. Az energetikai számítások a WinWatt 32 7.63 szoftverrel készültek, melynek alapja a 7/2006 épületenergetikai rendelet számítási módszere volt. Az

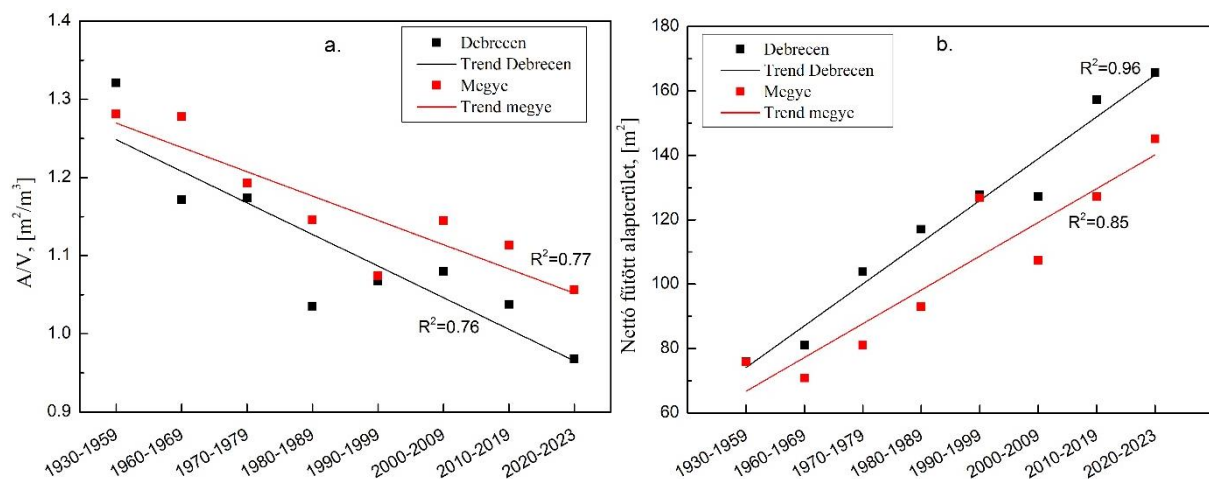
épületenergetikai számítási módszer 2023. novemberben változott, de a kutatási munkám során a 2023. júliusig elvégzett energetikai számításokat vettem figyelembe.

A 2.-6. Tézisek alapjául szolgáló adatbázis olyan épületek energetikai adatai alapján készült, amelyek épületenergetikai tanúsítvánnyal rendelkeznek. Ez némileg torzítja a teljes épületállományra vonatkozó képet, de a torzítás nem jelentős és az eredmények a gyakorlatban jól alkalmazhatók.

Debrecenben a 236 családi ház adatai alapján megállapítottam, hogy az új épületek fajlagos hőveszteségtényezője, valamint a fajlagos fűtési energiaigény az elmúlt 90 év során (2020-as évekre az 1959 előtti évekhez viszonyítva) 15,2%-ra, illetve 18,5%-ra csökkent. A régi épületek hőszükséglete az elméleti értéknél 27,6-41,4%-al alacsonyabb.

2. tézis

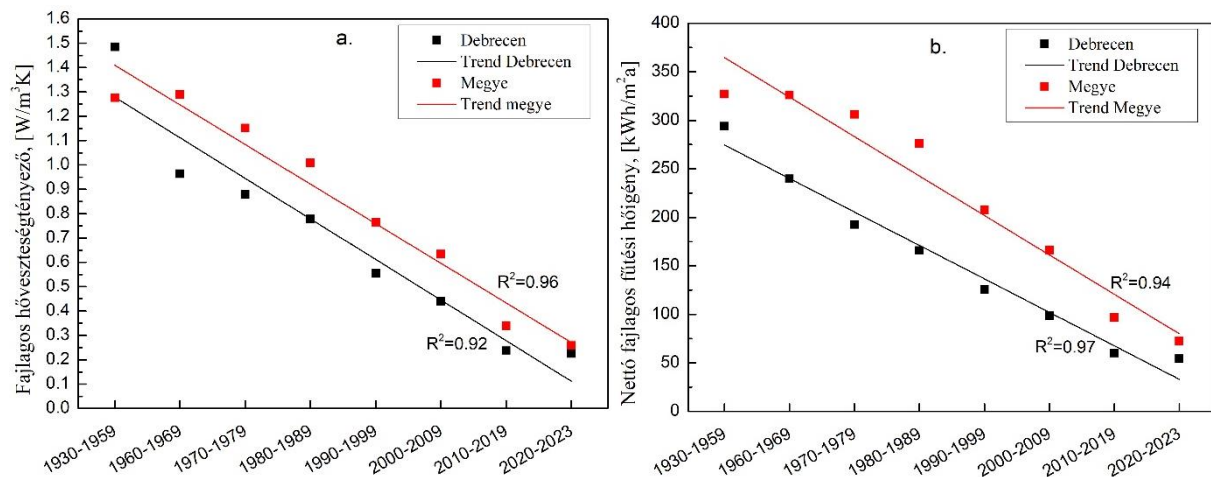
Hajdú-Bihar vármegyében úgy a nagyvárosi, mint a vidéki környezetben a családi házak A/V tényezője csökken az évtizedek során, viszont Debrecenben a csökkenés nagyobb mértékű. A nettó fűtött alapterület úgy Debrecenben, mint a vidéki településeken növekszik, azonban a növekedés jelentősebb a nagyvárosban. **$p=0,05$ szignifikancia szinten a debreceni családi házak A/V tényezője szignifikánsan alacsonyabb, mint a vidéki családi házakat jellemző A/V tényező, ugyanakkor a debreceni családi házak nettó fűtött alapterülete szignifikánsan nagyobb, mint a vidéki családi házak nettó fűtött alapterülete.**



T2. ábra Az A/V tényező (a) és a nettó fűtött alapterület (b) trendvonalai, illetve a korrigált R^2 érték debreceni és vidéki családi házakra vonatkozóan (a diagramban egy pont az adott időszakra vonatkozó átlagértéket jelenti)

3. tézis

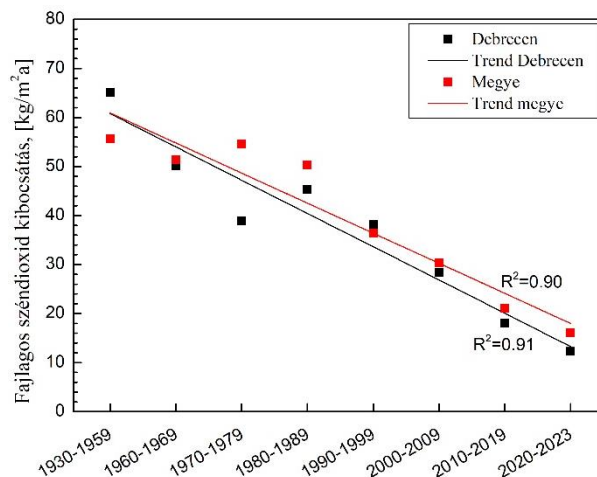
Hajdú-Bihar vármegyében a vidéki családi házak esetében az 1959 előtt, illetve a 2020 után épült épületek fajlagos hőveszteségtényezői közötti arány 6,7 Debrecenben, és 5,4 vidéki épületekben. Ugyanez az arány a nettó fajlagos fűtési hőigény esetében 5,4 a debreceni családi házak esetében és 4,5 a vidéki családi házak esetében. $p=0,05$ szignifikancia szint mellett, úgy a fajlagos hőveszteségtényező, mint a nettó fűtési hőigény is szignifikánsan nagyobb a vidéki, mint a debreceni családi házak esetében.



T3. ábra A fajlagos hőveszteségtényező (a) és a nettó fűtési hőigény (b) trendvonalai, illetve a korrigált R^2 érték debreceni és vidéki családi házakra vonatkozóan

4. tézis

Hajdú-Bihar vármegyében az 1959 előtt, illetve a 2020 után épült épületek fajlagos széndioxid kibocsátásainak aránya 5,3 Debrecenben és 3,5 vidéki családi házak esetében. $p=0,05$ szignifikancia szinten a debreceni és a vidéki családi házak fajlagos széndioxid kibocsátásai között a különbség nem szignifikáns.

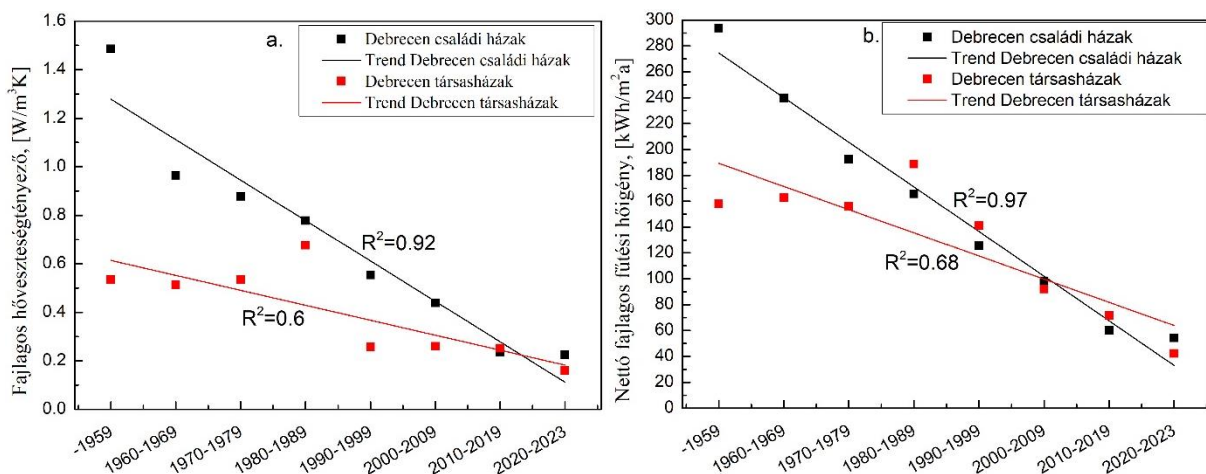


T4. ábra A fajlagos CO₂ kibocsátás trendvonala, illetve a korrigált R² érték debreceni családi házak és debreceni téglafalazatú társasházak esetében

A városi és vidéki családi házak közötti csekély eltérés indoka az lehet, hogy a vidéki családi házakban széles körben alkalmaznak tüzfát vagy egyéb biomasszát, amit a földgáznál kisebb fajlagos CO₂ kibocsátás jellemez. Azonban a nagyvárosban a legelterjedtebb energiahordozó a földgáz. A nagyobb fajlagos hőveszteségtényezőt, illetve a nagyobb nettó fűtési hőigényt kompenzálja a kisebb fajlagos CO₂ kibocsátással rendelkező energiahordozó.

5. tézis

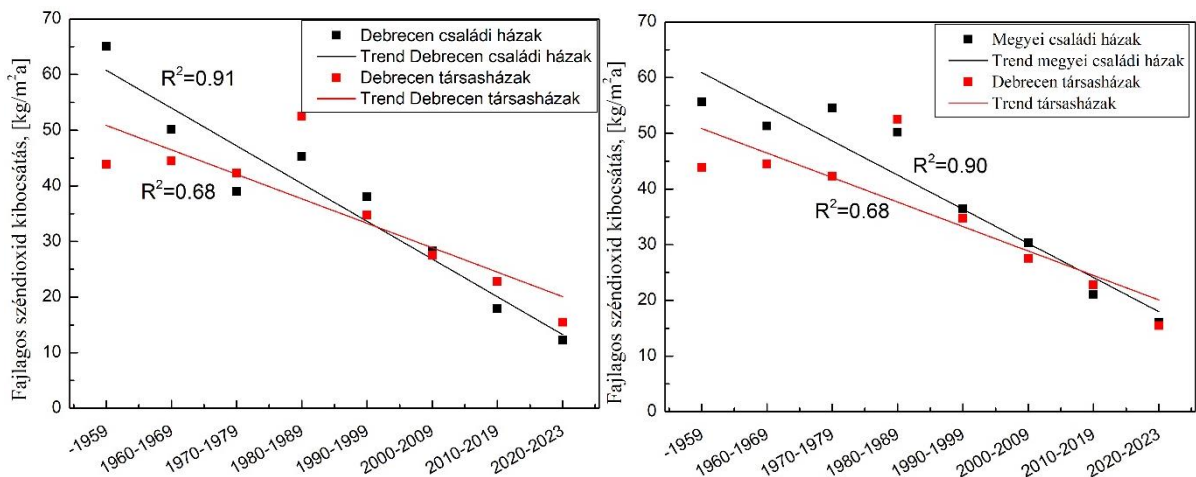
Debrecenben a téglafalazattal rendelkező többlakásos társasházak esetében 1930-2020 időintervallumban a fajlagos hőveszteségtényező aránya 3,5, a nettó fűtési hőigény aránya 3,7, a fajlagos széndioxid kibocsátás aránya pedig 2,8. **p=0,05 szignifikancia szinten a debreceni családi házak hőveszteségtényezői szignifikánsan nagyobbak, mint a debreceni téglalapítású társasházak fajlagos hőveszteségtényezői. A vidéki családi házak esetében, p=0,05 szignifikancia szinten, úgy a fajlagos hőveszteségtényezők mint a fajlagos nettó fűtési energiaigények is szignifikánsan nagyobbak, mint a debreceni téglalapítású társasházakat jellemző fajlagos hőveszteségtényezők és fajlagos nettó fűtési energiaigények.**



T5. ábra A fajlagos hőveszteségtényező trendvonalai, illetve a korrigált R² érték családi házak és debreceni téglafalazatú társasházak esetében

6. tézis

Hajdú-Bihar vármegyei családi házak illetve a debreceni téglafalazatú társasházak széndioxid kibocsátásai közötti eltérések p=0,05 szinten nem szignifikánsak.



T6. ábra A fajlagos CO₂ kibocsátás trendvonala, illetve a korrigált R² érték Hajdú-Bihar vármegyei családi házak és debreceni téglafalazatú társasházak esetében

A Debrecen városi családi házak és téglafalazatú társasházak esetében a kis eltérésre az lehet a magyarázat, hogy bár mindkét épülettípusban többnyire földgázt alkalmaznak energiahordozóként, a családi házak esetében a hőtermelés és a hőleadás nagyobb hatékonysággal történik (pl. kondenzációs kazán és radiator vs. gázkonvektor a társasházakban). A megyei családi házak esetében elterjedt a biomassza felhasználása ez vezethet az alacsonyabb széndioxid kibocsátáshoz, a nagyobb fajlagos energiaigény ellenére.

12.3 Radiátoros és alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtési módok energetikai összehasonlítása

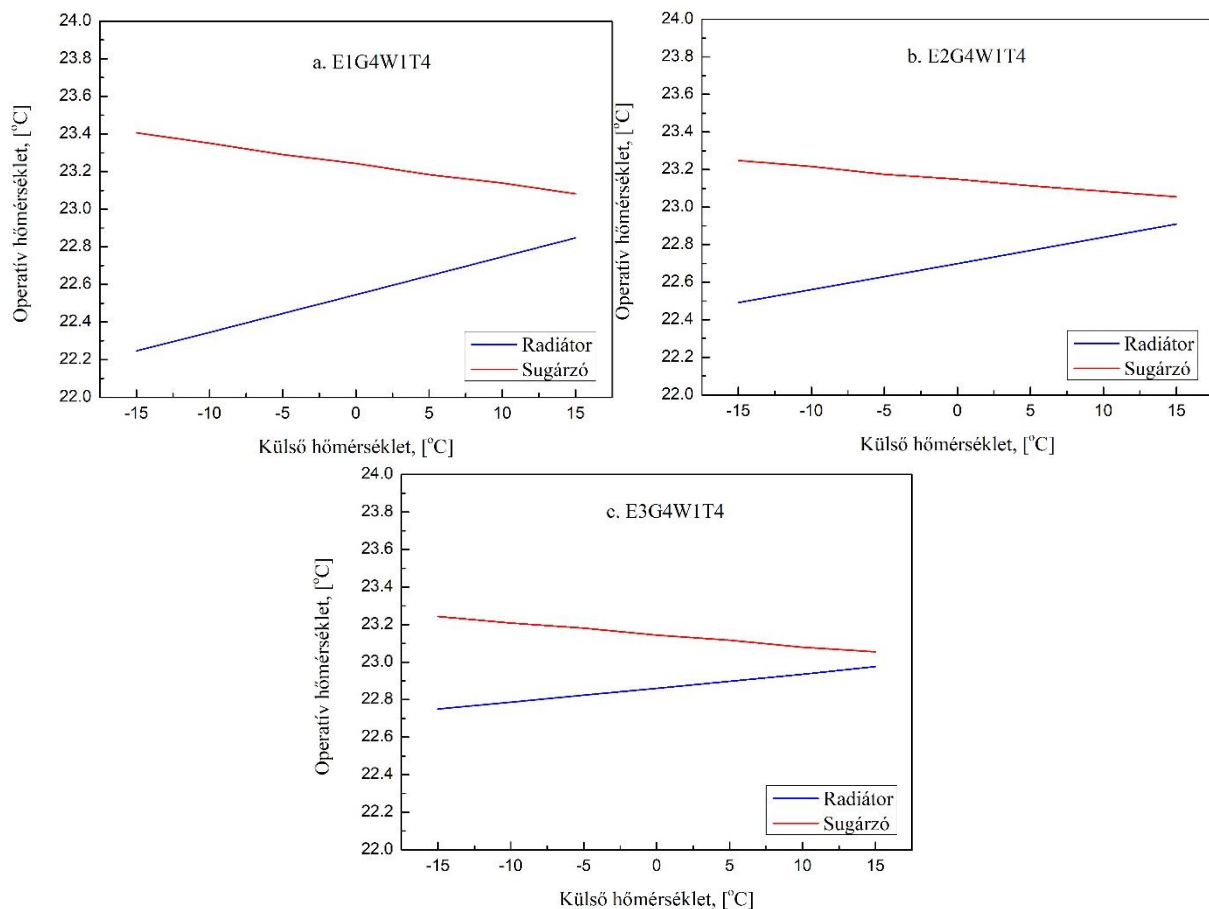
Napjainkban, úgy az új építésű, mint felújított épületek esetében is széles körben alkalmazzák az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtési megoldásokat. Ezek a szakirodalom szerint számos előnnyel rendelkeznek a hagyományos radiátoros fűtésekkel szemben, így jobb hőérzetet biztosítanak alacsonyabb energiafelhasználás mellett.

Radiátoros fűtés esetében a fűtőtestet minden esetben a nyílászáró alatt helyeztem el, a fűtőtest hosszúságát pedig úgy választottam ki a gyártókatalógusból, hogy egyenlő (vagy csaknem egyenlő) legyen az ablak szélességével. Így a fűtőtest mérete adott volt és ezt, illetve a helyiség hőszükségletét figyelembe véve, meghatároztam a logaritmikus hőmérsékletkülönbségeket, valamint a szükséges előremenő és visszatérő hőmérsékleteket (20 °C tervezési hőfoklépcsőt feltételezve). Az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtés esetében a kombinált padló- és mennyezetfűtés mellett döntöttem, mivel a szakirodalom szerint ez a fűtési mód biztosítja a megfelelő hőérzetet a legkevesebb energiafogyasztás mellett. A szükséges felületi hőmérsékleteket, illetve az előremenő és visszatérő hőmérsékleteket a

helyiségek hőigénye alapján határoztam meg figyelembe véve a szakirodalomban megadott felületi hőátadási tényezőket.

7. tézis

7.1 Az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtések esetében az operatív hőmérséklet magasabb, mint a radiátoros fűtések esetében. **Az operatív hőmérséklet magasabb külső hőmérsékletek mellett a radiátoros fűtés esetében növekszik, az alacsony hőmérsékletű sugárzó fűtések esetében pedig csökken.**



T7. ábra Operatív hőmérsékletek a G4 geometria (4.0m×4.0m×2.7m), W1 (20%) üvegezési arány és T4 (23 °C) belső léghőmérséklet mellett (E1; E2 és E3 – határolószerkezetek hőátbocsátási tényezői 2002-ben, 2012-ben és 2022-ben érvényes követelmények szerint)

7.2 432 különböző eset elemzése alapján megállapítottam, hogy a kombinált padló-mennyezetfűtési mód összes hővesztesége a rendszer teljes hőigényének 40,71%-a (SD=5,3).

7.3 432 különböző eset elemzése alapján megállapítottam, hogy azonos operatív hőmérséklet mellett a kombinált padló-mennyezet fűtési mód esetében a teljes hőigény átlagosan 4,71%-al (SD=1,25) haladja meg a radiátoros fűtési mód teljes hőigényét.

7.4. A fűtési határhőmérséklet nem azonos bekapcsoláskor és kikapcsoláskor. Az eltérő külső hőmérséklet-sugárzási energiahozamok miatt a kikapcsolási hőmérséklet alacsonyabb, mint a bekapcsolási hőmérséklet.

Ha a felületfűtést egy külső határolószerkezetre helyezük el, akkor egyrészt az adott szerkezeten nem lép fel hagyományos módon értelmezett (a belső levegőből a külső levegőbe jutó) hőveszteség (mivel a belső levegőnél magasabb a felület hőmérséklete), másrészt viszont a szerkezet nagyobb hőmérséklete miatt a külső felületről a külső térbe leadott hő nagyobb lesz. Ezt nem az épület, hanem a rendszer hőveszteségének tekintetem, ami a hőleadási mód eredménye. Annak érdekében, hogy a helyiség középpontjában azonos operatív hőmérsékletet biztosítsunk a radiátoros fűtés esetében többlet hőbevitelt kell biztosítani. A kutatásban vizsgált kombinált padló- és mennyezetfűtés összes energiaigénye (helyiségbe leadott hő és a hőveszteség összege) minden esetben nagyobb mértékű volt, mint a radiátoros fűtés esetében a helyiségbe leadott hő és a többlet hőbevitel összege.

13. Summary of the research work

The aim of the research work performed was:

- analysis of residential single-family houses in Debrecen from energy consumption and CO₂ emissions points of view;
- analysis of residential single-family houses in Hajdú-Bihar county (except Debrecen) from energy consumption and CO₂ emissions points of view;
- analysis of panel buildings and masonry-structured multifamily buildings from energy consumption and CO₂ emissions points of view;
- analysis of the outdoor temperature, solar radiation and utilisation factor of heat gains during the heating season in Debrecen;
- comparison of heat losses of radiator heating and low-temperature radiant heating in the case of equal indoor air temperature;
- comparison of heat losses of radiator heating and low-temperature radiant heating in the case of equal operative air temperature in rooms with different geometries and thermal properties of the envelope.

The research was done using energy performance data of buildings I have analysed in the last years. Accordingly, I have performed the energy analysis of lots of residential buildings (single-family houses and flats), so I obtained energy data of hundreds of buildings and flats. Besides, I got several energy certificates elaborated by engineers with the required qualification, so eventually I had the energy data of 1200 residential buildings. All energy calculations were done between 2017 and 2023 with Winwatt software. The following data were collected:

- construction year;
- heated area;
- envelope/heated volume ratio (A/V);
- specific heat loss coefficient;
- specific primary energy consumption for heating;
- carbon dioxide emission.

Besides these data, the heating system type, the used energy carrier, the structure of external walls, and data on the hot water preparation. Data of the photovoltaic system were collected either, in case such system was installed on the building. The address of the building and the name of the owner were not registered, taking into account the GDPR prescriptions.

The ORIGIN LAB 9.55 software available at the Department of Building Services and Building Engineering of the University of Debrecen was used for statistical analysis of energy

data. Most of the obtained results were presented in boxplot diagrams, because this representation type shows the statistical distribution: the average, the median, and the upper and lower quartiles of the dataset are available.

Buildings were categorised depending on the construction year. Different refurbishment packages were developed for each building category to minimise the carbon dioxide emissions. Rational and cost-effective solutions were taken into account only. The energy performance and carbon dioxide emissions of single-family houses in Debrecen (urban) and Hajdú-Bihar county (except Debrecen), single-family houses and masonry-structured multifamily buildings were compared. The differences between groups were analysed statistically using the paired *t*-test method at a $p=0.05$ significance level. The effects on the energy performance of different factors were analysed using the one-way analysis of variance (ANOVA) with the Tukey test. The homogeneity of variance was analysed using Levene's method.

Using the database of the Hungarian Meteorological Service, the daily mean temperatures between 1930 and 2020 were analysed. Using the hourly mean temperatures measured between 1990 and 2020, the degree-day curve specific to this period was drawn. The specific solar radiation gains on vertical surfaces for four cardinal orientations were determined using the hourly data measured by the meteorological station of the University of Debrecen (2009-2013). Having the heat losses and heat gains, the daily values of the utilisation factor were calculated.

Developing a calculation table in Excel based on the analytical relations of radiant heating, the system heat losses were determined for a heating season. In order to validate the analytical relations, measurements were carried out in the Indoor Environment Quality laboratory of the University of Debrecen. Besides these measurements, the data from previously published measurements were identified and taken into account for the validation process. Thereafter, the heat losses of a low-temperature radiant heating system (combined floor and ceiling) were determined for 432 cases (different room geometry, windows-to-wall ratio, indoor temperatures and thermal properties of the envelope). The differences between groups were analysed statistically using the paired *t*-test method at a $p=0.05$ significance level.

The main statements are the following:

- The minimum values of daily mean temperatures in Debrecen for the 1961-1990 period, at a 0.05 significance level, are significantly higher than those for the 1931-1960 period. Furthermore, the minimum values of daily mean temperatures in Debrecen for the 1991-2000 period, at a 0.5 significance level, are significantly higher

than those for the 1961-1990 period. The minimum temperature of the heating season registered for the 1961-1990 period is higher by 1.04 °C in comparison to the minimum temperature of the heating season registered for the 1931-1960 period. The minimum temperature of the heating season registered for the 1991-2000 period is higher by 1.82 °C than the minimum temperature of the heating season registered for the 1961-1990 period.

- In Hajdú-Bihar county, the A/V ratio of single-family houses decreased in the last decades, but the decrease is greater in Debrecen. The net heated area, both of urban and rural single-family houses, is increasing, but the increase is greater in Debrecen.
- The A/V ratio of single-family houses in Debrecen is significantly lower than the A/V ratio of single-family houses in Hajdú-Bihar county (except Debrecen). At the same time, the net heated area of single-family houses in Debrecen is significantly higher than the net heated area of single-family houses in Hajdú-Bihar county (except Debrecen).
- The specific heat loss coefficient of single-family houses built in Debrecen between 1931 and 1959 is 6.7 times higher than the specific heat loss coefficient of single-family houses built after 2020. In the case of rural single-family houses in Hajdú-Bihar county, this ratio is 5.4. The net specific heat demand of single-family houses built in Debrecen between 1931 and 1959 is 5.4 times higher than the specific heat loss coefficient of single-family houses built after 2020. In the case of rural single-family houses in Hajdú-Bihar county, this ratio is 4.5.
- At a 0.05 significance level, the specific heat loss coefficient and the specific net heat demand of rural single-family houses built in Hajdú-Bihar county are significantly higher than the specific heat loss coefficient and the specific net heat demand of single-family houses built in Debrecen.
- In Hajdú-Bihar county, the carbon dioxide emissions of single-family houses in Debrecen decreased by a ratio of 5.3. The same ratio is 3.5 in the case of rural single-family houses in the county.
- At a 0.05 significance level, the difference in carbon dioxide emissions between single-family houses built in Debrecen and those built in rural regions of Hajdú-Bihar county is not statistically significant.

- For masonry structured multi-family buildings built in Debrecen between 1930 and 1959 and those built after 2020, the specific heat loss ratio is 3.5, the specific net heat demand ratio is 3.7, and the specific carbon dioxide emission ratio is 2.8.
- At a 0.05 significance level, the specific heat loss coefficient of single-family houses built in Debrecen is statistically higher than that of multifamily buildings with masonry structures built in Debrecen. In the case of single-family houses built in Hajdú-Bihar county (except Debrecen), at a 0.05 significance level, both the specific heat loss coefficient and the net specific heat demand are statistically higher than those of multifamily buildings with masonry structures built in Debrecen.
- At a 0.05 significance level, the difference in carbon dioxide emissions between single-family houses built in Hajdú-Bihar county and those of multifamily buildings with masonry structures built in Debrecen. is not statistically significant.
- For a certain heat quantity released in the room, the operative temperature is higher in the case of low-temperature radiant heating than in the case of radiator heating. At increasing outdoor temperatures, the operative temperature in the room will increase in the case of radiator heating and will decrease in the case of low temperature radiant heating.
- Based on the analysis of 432 different cases, I have proven that the heat loss of the combined ceiling-floor low-temperature radiant heating represents 40.71% of the total heat demand of the system (SD=5.3).
- Based on the analysis of 432 different cases, I have proven that at similar operative temperatures in the middle of the room, the total energy demand of combined ceiling-floor low-temperature radiant heating is 4.71% higher (=SD=1.25) than the total energy consumption of radiator heating.
- The balance point temperature is not equal when the heating is switched on and when the heating is switched off. Because of different solar energy gains in autumn and in spring, the switched-off temperature is lower than the switched-on temperature.

Alkalmazott jelölések

NZEB – közel nulla energiaigényű épület;

PMV – a hőérzettel várhatóan elégedettek százalékos aránya;

EPS – expandált polisztirol;

COP [-] – hőszivattyú teljesítménytényezője;

SCOP [-] – a hőszivattyú teljesítménytényezőjének szezonális értéke;

U , [W/m²K] – épületszerkezetek hőátbocsátási tényezője;

A/V , [m²/m³] – az épület geometriai jellemzője (A – a fűtött térfogatot határoló lehűlő szerkezetek felületeinek összege, V – a fűtött térfogat);

E_p , [kWh/m²a] – összesített energetikai jellemző (primerenergiában);

q [W/m³K] – az épület fajlagos hőveszteségtényezője;

q_m [W/m³K] – az épület fajlagos hőveszteségtényezőjének követelményértéke;

U_{kfal} , [W/m²K] – a külső falszerkezet hőátbocsátási tényezője;

$U_{födém}$, [W/m²K] – a zárófödém hőátbocsátási tényezője;

U_{ablak} , [W/m²K] – az ablakok hőátbocsátási tényezője;

U_e , [W/m²K] – a határolószerkezetek egyenértékű hőátbocsátási tényezője;

K_{tr} [W/K] – az épület transzmissziós hőveszteségtényezője;

Q_{sd} [W] – az épület direkt sugárzásos hőnyereségei a transzparens szerkezeteken keresztül;

Q_{sid} [W] – az épület indirekt (naptér, tömegfal, Trombe fal, transzparens hőszigetelés) sugárzási hőnyereségei;

A [m²] – egy adott külső határolószerkezet felülete belméretek szerint;

C [-] – korrekciós tényező, ami figyelembe veszi, ha az adott határolószerkezet külső oldalán a külső léghőmérséklettől eltérő a hőmérséklet;

Ψ [W/mK] – vonalmenti hőátbocsátási tényező (hőhíd vagy talajra fektetett padló esetében);

l [m] – a hőhíd (vagy külső falszerkezet – talajra fektetett padló) csatlakozási élének hossza;

SD [-] – szórás;

p [-] – szignifikancia szint;

t_i [°C] – méretezési belső léghőmérséklet;

t_e [°C] – külső napi átlagos léghőmérséklet;

WWR [%] – üvegezési arány;

G1 – 2.0m×3.0m×2.7m (szélesség×hosszúság×magasság) helyiség méretek;

G2 – 3.0m×3.0m×2.7m helyiség méretek;

G3 – 3.0m×4.0m×2.7m helyiség méretek;

G4 – 4.0m×4.0m×2.7m helyiség méretek;

G5 – 4.0m×5.0m×2.7m helyiség méretek;

G6 – 5.0m×5.0m×2.7m helyiség méretek;

W1 – WWR=20%;

W2 – WWR=30%;

W3 – WWR=40%;

W4 – WWR=50%;

T1 – $t_i=20$ °C;

T2 – $t_i=21$ °C;

T3 – $t_i=22$ °C;

T4 – $t_i=23$ °C;

T5 – $t_i=24$ °C;

T6 – $t_i=25$ °C;

E1 – határolószervezetek hőátbocsátási tényezői (2002-ben) – 14 táblázat;

E2 – határolószervezetek hőátbocsátási tényezői (2012-ben) – 14 táblázat;

E3 – határolószervezetek hőátbocsátási tényezői (2022-ben) – 14 táblázat;

n – légcserezszám, [1/h];

δ [m] – a fűtőréteget (fűtőcsöveket tartalmazó réteget) burkoló réteg vastagsága;

θ_w [K] – a fűtővíz átlagos túlhőmérséklete;

t_s [°C] – a fűtővíz előremenő hőmérséklete;

t_r [°C] – a fűtővíz visszatérő hőmérséklete;

δ_{hl} [m] – a fűtőréteg vastagsága;

λ [W/mK] – a fűtőréteg anyagának hővezetési tényezője;

χ'_i [W/m²K] – a belső tér és a fűtőréteg közötti rész-szerkezetre vonatkozó rész-hőátbocsátási tényező;

h_i [W/m²K] – a belső levegő és a szerkezet belső felülete közötti hőátadási tényező;

δ_p [m] – a fűtőréteget burkoló vakolat vastagsága;

λ_p [W/mK] – a fűtőréteget burkoló vakolat anyagának hővezetési tényezője;

χ'_e [W/m²K] – fűtőréteg és a külső tér közötti rész-hőátbocsátási tényező;

h_e [W/m²K] – a szerkezet külső oldali hőátadási tényezője;

δ_j [m] – a fűtőréteg és a külső tér közötti szerkezet rész j rétegének vastagsága;

λ_j [W/mK] – a fűtőréteg és a külső tér közötti szerkezet rész j rétegének hővezetési tényezője;

θ_{mi} [K] – a fűtőréteg belső felületének átlagos túlhőmérséklete;
 θ'_m [K] – a szerkezet belső felületének átlagos túlhőmérséklete;
 \dot{q}_i [W/m²] – a belső tér felé leadott fajlagos hőmennyiség;
 \dot{q}_e [W/m²] – a külső tér felé leadott fajlagos hőmennyiség;
 Q_{total} [kWh/nap] – a j -ik napon a teljes fűtési energiaigény;
 Q_{tot} [kWh] – a j -ik napon a teljes fűtési energiaigény;
 N [-] – a fűtési napok száma;
 K [W/K] – az épület hőveszteségtényezője;
 η_H [-] – a hőnyereségek hasznosítási foka;
 k – korrelációs tényező (Yohannis-Norton összefüggés);
 D – korrelációs tényező (Yohannis-Norton összefüggés);
 τ [h] – a helyiség/kondicionált zóna/épület időállandója;
 \bar{t}_r [°C] – a közepes sugárzási hőmérséklet;
 h_c [W/m²K] – az emberi test körüli konvektív hőátadási tényező;
 h_r [W/m²K] – az emberi test sugárzásos hőátadási tényezője;
 A_r [m²] – az emberi test sugárzásos hőcserében résztvevő effektív felülete;
 A_{Du} [m²] – az emberi test Du Bois felülete;
 ε [-] – a ruházattal borított és nem borított test emissziós tényezője;
 I_{cl} [m²K/W] – a ruházat hőszigetelő képessége;
 f_{cl} [-] – a ruházattal borított testfelület és a ruházat nélküli testfelület aránya;
 M [W/m²] – metabolikus hő;
 W [W/m²] – az egyén által végzett mechanikai munka;
 F_{P-A_j} [-] – a besugárzási tényező értékei az egyén és a j határolószerkezet között;
 A_j [m²] – a j határolószerkezet felülete;
 T_j [K] – a j határolószerkezet felületi hőmérséklete.
 Q_{rad} [kWh] – a helyiségbe leadott hőmennyiség radiátoros fűtés esetében;
 $Q_{többlet}$ [kWh] – a többlet hőmennyiség radiátoros fűtés esetében;
 Q_{radtot} [kWh] – a teljes hőigény radiátoros fűtés esetében;
 Q_{sug} [kWh] – a helyiségbe leadott hőmennyiség sugárzásos fűtés esetében;
 $Q_{sugveszt}$ [kWh] – a hőveszteség sugárzásos fűtés esetében;
 Q_{sugtot} [kWh] – a teljes hőigény sugárzásos fűtés esetében;
 e_{diff} – a teljes hőigények közötti százalékos különbség a vizsgált radiátoros és sugárzásos fűtési módok esetében.

Felhasznált szakirodalom

1. A Tanács 93/76/EGK irányelve (1993. szeptember 13.) a széndioxid-kibocsátásának az energiahatékonyság fejlesztése által való korlátozásáról (SAVE), HL L 237, 1993, 9.22, 28-30.
2. AZ Európai Parlament és a Tanács (EU) 2002/91/EK Irányelve (2002. december 16.) az épületek energiateljesítményéről, Off. J. Eur. Union 2003, 12, 2.
3. Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2024/1275 Irányelve (2024. április 24.) az épületek energiahatékonyságáról, Off. J. Eur. Union 2024, 5, 8.
4. <https://building-stock-observatory.energy.ec.europa.eu/database/>(Letöltés: 2025.09.11)
5. Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2018/844 Irányelve az épületek energiahatékonyságáról szóló 2010/31/EU irányelv és az energiahatékonyságról szóló 2012/27/EU irányelv módosításáról, Az Európai Unió Hivatalos Lapja, 2018.
6. Zhao, X.; Pan, W. Delivering Zero Carbon Buildings: The Role of Innovative Business Models. *Procedia Engineering*. 2015, 118, 404–411.
7. Thomaßen, G.; Kavvadias, K.; Jiménez Navarro; J.P. The decarbonisation of the EU heating sector through electrification: a parametric analysis, *Energy Policy* 148, 111929, 2021.
8. Kiss, B.; Szalay, Zs. Sensitivity of buildings' carbon footprint to electricity decarbonization: a life cycle-based multi-objective optimization approach, *International Journal of Life Cycle Assessment* 28:7, 2023, pp. 933-952.
9. Szalay, Zs. A parametric approach for developing embodied environmental benchmark values for buildings, *International Journal of Life Cycle Assessment* 29:9, 2024, pp. 1563-1581.
10. Gergely, L.; Barna, E.; Horváth, M.; Szalay, Zs. Lakóépületek épületgépészeti rendszerének beépített szén-dioxid kibocsátása, *Magyar Épületgépészet* 73 : 4, 2024, pp. 3-8.
11. Gergely, L.; Barna, E.; Horváth, M.; Szalay, Zs. Assessing embodied and operational carbon of residential HVAC systems: Baselines for life-cycle sustainability, *Building and Environment* 269 Paper: 112442, 2025.
12. Szalay, Zs; Szagri, D.; Bihari, Á; Nagy, B.; Kiss, B.; Horváth, M.; Medgyasszay, P. Development of a life cycle net zero carbon compact house concept, *Energy Rep.* 8, 2022, 12987–13013.

13. Szabó, L.; Kelemen, Á.; Mezősi, A.; Pató, Zs.; Kácsor, E.; Resch, G.; Liebmann L, South East Europe electricity roadmap – modelling energy transition in the electricity sectors, *Climate Policy*, 2018, DOI: 10.1080/14693062.2018.153239.
14. Recast . EPBD Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings (recast). *Off. J. Eur. Union* 2010, 18, 6.
15. Kurnitski, J.; Allard, F.; Braham, D.; Goeders, G.; Heiselberg, P.; Jagemar, L.; Kosonen, R.; Lebrun, J.; Mazzarella, L.; Railio, J.; et al. How to define nearly net zero energy buildings nZEB: REHVA proposal for uniformed national implementation of EPBD recast. *REHVA J.* 2011, 48, 6–12.
16. Kurnitski, J. Technical definition for nearly zero energy buildings. *REHVA J.* 2013, 50, 22–28.
17. Annunziata, E.; Frey, M.; Rizzi, F. Towards nearly zero-energy buildings: The state-of-art of national regulations in Europe. *Energy* 2013, 57, 125–133.
18. D’Agostino, D.; Tsemekidi Tzeiranaki, S.; Zangheri, P.; Bertoldi, P. Assessing Nearly Zero Energy Buildings (NZEBs) development in Europe. *Energy Strategy Rev.* 2021, 36, 100680.
19. Paoletti, G.; Pascuas, R.P.; Pernetti, R.; Lollini, R. Nearly Zero Energy Buildings: An Overview of the Main Construction Features across Europe. *Buildings* 2017, 7, 43. <https://doi.org/10.3390/buildings7020043>.
20. D’Agostino, D.; Mazzarella, L. What is a Nearly zero energy building? Overview, implementation and comparison of definitions. *J. Build. Eng.* 2019, 21, 200–212.
21. Liu, Z.; Zhou, Q.; Tian, Z.; He, B.; Jin, G. A comprehensive analysis on definitions, development, and policies of nearly zero energy buildings in China. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019, 114, 109314.
22. Liu, Z.; Liu, Y.; He, B.; Xu, W.; Jin, G.; Zhang, X. Application and suitability analysis of the key technologies in nearly zero energy buildings in China. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019, 101, 329–345.
23. Han, S.; Yao, R.; Li, N. The development of energy conservation policy of buildings in China: A comprehensive review and analysis. *J. Build. Eng.* 2021, 38, 102229.
24. Cao, X.; Yao, R.; Ding, C.; Zhou, N.; Yu, W.; Yao, J.; Xiong, J.; Xu, Q.; Pan, L.; Li, B. Energy-quota-based integrated solutions for heating and cooling of residential buildings in the Hot Summer and Cold Winter zone in China. *Energy Build.* 2021, 236, 110767.

25. Li, X.; Yao, R. Modelling heating and cooling energy demand for building stock using a hybrid approach. *Energy Build.* 2021, 235, 110740.
26. Cao, X.; Dai, X.; Liu, J. Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade. *Energy Build.* 2016, 128, 198–213.
27. Magrini, A.; Lentini, G.; Cuman, S.; Bodrato, A.; Marengo, L. From nearly zero energy buildings (NZEB) to positive energy buildings (PEB): The next challenge–The most recent European trends with some notes on the energy analysis of a forerunner PEB example. *Dev. Built Environ.* 2020, 3, 100019.
28. Shi-Cong, Z.; Xin-Yan, Y.; Wei, X.; Yi-Jun, F. Contribution of nearly-zero energy buildings standards enforcement to achieve carbon neutral in urban area by 2060. *Adv. Clim. Chang. Res.* 2021, 12, 734–743.
29. Huuhka, S., Moisio, M., Salmio, E., Köliö, A., Lahdensivu, J.. Renovate or replace? Consequential Replacement LCA framework for buildings. *Buildings and Cities*, 4(1), 2023, 212–228.
30. Jenkins, P.L.; Phillips, Th.J.; Mulberg, E.J.; P Hui, S.P. Activity patterns of californians: use of and proximity to indoor pollutant sources, *Atmospheric Environment*, 26:12, 1992, 2141-2148.
31. Chau, C.K.; Tu, E.Y.; Chan, D.W.T.; Burnett, J. Estimating the total exposure to air pollutants for different population age groups in Hong Kong, *Environment International*, 27, 2002, 617–630
32. Leech, J.A.; Nelson, W.C.; Burnett, R.T.; Aaron, Sh.; Raizenne, M.E. It’s about time: A comparison of Canadian and American time–activity patterns, *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 12, 2002, 427 – 432.
33. Brasche, S.; Bischof, W. Daily time spent indoors in German homes – Baseline data for the assessment of indoor exposure of German occupants, *Int. J. Hyg. Environ.-Health*, 208, 2005, 247–253.
34. MSZ CR 1752 Épületek szellőztetése. Épületek belső környezetének tervezési alapjai (visszavonás napja: 2022.02.01).
35. MSZ EN 16798-1:2019 Épületek energetikai teljesítőképessége. Épületek szellőztetése. 1. rész: Beltéri bemeneti paraméterek az épületek beltéri levegőminőségéhez, hőmérsékleti, világítási és akusztikai környezetéhez kapcsolódó energetikai teljesítőképességének tervezéséhez és értékeléséhez. M1-6 modul.

36. Kalmár, F.; Kalmár, T. A komfortkövetelmények, az épületek primer energiafogyasztása és az exergiaszemlélet, *Magyar Építőipar* 61 (4), 151-156, 2011.
37. Roaf, S.; Nicol, F.; Humphreys, M.; Tuohy P.; Boerstra, A. Twentieth century standards for thermal comfort: promoting high energy buildings, *Architectural Science Review*, 53, 2010, 65-77.
38. Vinha, J.; Manelius, E.; Korpi, M.; Salminen, K.; Kurnitski, J.; , Kiviste, M.; Laukkarinen, A. Airtightness of residential buildings in Finland, *Building and Environment*, 93, 2015, 128-140.
39. Irene Poza-Casado, I.; Cardoso, V.E.M.; Almeida, R.M.S.F.; Meiss, A.; Ramos, N.M.M; Padilla-Marcos, M.Á. Residential buildings airtightness frameworks: A review on the main databases and setups in Europe and North America, *Building and Environment*, 2020, 107221.
40. Kalmár, T.; Kalmár F. Investigation of natural aeration in home offices during the heating season – case study, *Journal of Building Engineering*, 2021, 102052.
41. Kalmár, F. Innovative method and equipment for personalized ventilation, *Indoor Air*. 3, 297-306, 2015.
42. Szekeres, S.; Kostyák, A.; Szodrai, F.; Csáky, I. Investigation of Ventilation Systems to Improve Air Quality in the Occupied Zone in Office Buildings, *Buildings*. 12 (4), 1-17, 2022.
43. Csáky, I. Air Terminal Devices Developed for Personal Ventilation Systems. *Energies*. 13 (7), 1-11, 2020.
44. Kalmár, F.; Kalmár, T. Alternative personalized ventilation, *Energy and Buildings*, 65, 2013, 37-44.
45. Csáky, I.; Kalmár, T.; Kalmár F. Operation Testing of an Advanced Personalized Ventilation System, *Energies*, 12(9), 2019, 1596.
46. Grassi, B.; Piana, E.A.; Lezzi, A.M.; Pilotelli, M., A Review of Recent Literature on Systems and Methods for the Control of Thermal Comfort in Buildings, *Appl. Sci.* 2022, 12(11), 5473.
47. ISO7730:2005, Ergonomics of the thermal environment – Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.
48. Deshko, V.; Bilous, I.; Sukhodub, I.; Yatsenko, O.. Evaluation of energy use for heating in residential building under the influence of air exchange modes, *Journal of Building Engineering* 42 (2021) 103020.

49. Ürge-Vorsatz, D.; Cabeza, L; Serrano, S; Barreneche, C; Petrichenko, K. Heating and cooling energy trends and drivers in buildings, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 41 (2015), 85–98.
50. Ren J, Zhu L, Wang Y, Wang C, Xiong W, Very low temperature radiant heating/cooling indoor end system for efficient use of renewable energies, *Solar Energy*, 84, 2010, 1072–1083.
51. Østergaard DS, Smith KM, Tunzi M, Svendsen S, Low-temperature operation of heating systems to enable 4th generation district heating: A review, *Energy* 248, 2022, 123529.
52. Rhee KN, Kim KW, A 50 year review of basic and applied research in radiant heating and cooling systems for the built environment, *Building and Environment* 91 (2015) 166-190.
53. Oravec J, Sikula S, Krajčík M, Arıcı M, Mohapl M, A comparative study on the applicability of six radiant floor, wall, and ceiling heating systems based on thermal performance analysis, *Journal of Building Engineering* 36 (2021) 102133.
54. Rhee KN, Olesen BW, Kim KW, Ten questions about radiant heating and cooling systems, *Building and Environment* 112 (2017) 367-381.
55. Hesaraki A, Huda N, A comparative review on the application of radiant low-temperature heating and high-temperature cooling for energy, thermal comfort, indoor air quality, design and control, *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 49 (2022) 101661.
56. Bojic M, Cvetkovic D, Marjanovic V, Blagojevic M, Djordjevic Z, Performances of low temperature radiant heating systems, *Energy and Buildings* 61 (2013) 233–238.
57. Krajčík M, Arıcı M, Šikula O, Šimko M, Review of water-based wall systems: Heating, cooling, and thermal barriers, *Energy & Buildings* 253 (2021) 111476.
58. Li R, Yoshidomi T, Ooka R, Olesen BW, Field evaluation of performance of radiant heating/cooling ceiling panel system, *Energy and Buildings* 86 (2015) 58–65.
59. Shin MS, Rhee KN, Ryu SR, Yeo MS, Kim KW, *Building and Environment* 92 (2015) 559-577.
60. Krajčík M, Šimko M, Šikula O, Szabó D, Petráš D, Thermal performance of a radiant wall heating and cooling system with pipes attached to thermally insulating bricks, *Energy and Buildings* 246 (2021) 111122.
61. Safizadeh MR, Schweiker M, Wagner A, Experimental Evaluation of Radiant Heating Ceiling Systems Based on Thermal Comfort Criteria, *Energies* 2018, 11, 2932; doi:10.3390/en11112932.

62. Ding P, Li Y, Long E, Zhang Y, Liu Q, Study on heating capacity and heat loss of capillary radiant floor heating systems, *Applied Thermal Engineering* 165 (2020) 114618.
63. Wang D, Liu Y, Wang Y, Liu J, Numerical and experimental analysis of floor heat storage and release during an intermittent in-slab floor heating process, *Applied Thermal Engineering* 62 (2014) 398-406.
64. Karakoyun Y, Acikgoz O, Çebi A, Koca A, Çetin G, Dalkılıç AS, Wongwises S, A comprehensive approach to analyze the discrepancies in heat transfer characteristics pertaining to radiant ceiling heating system, *Applied Thermal Engineering* 187 (2021) 116517.
65. Koca A, Gemici Z, Topacoglu Y, Cetin G, Can Acet R, Kanbur BB, Experimental investigation of heat transfer coefficients between hydronic radiant heated wall and room, *Energy and Buildings* 82 (2014) 211–221.
66. Acikgoz O, Karakoyun Y, Yumurtacı Z, Dukhan N, Dalkılıç AS, Realistic experimental heat transfer characteristics of radiant floor heating using sidewalls as heat sinks, *Energy and Buildings* 183 (2019) 515–526.
67. Koca A, Cetin G, Experimental investigation on the heat transfer coefficients of radiant heating systems: Wall, ceiling and wall-ceiling integration, *Energy and Buildings* 148 (2017) 311–326.
68. Shinoda J, Kazanci OB, Tanabe S, Olesen BW, A review of the surface heat transfer coefficients of radiant heating and cooling systems, *Building and Environment* 159 (2019) 106156.
69. Möller K., *Építési Zsebkönyv, Királyi Magyar Egyetemi Nyomda, 1934.*
70. ME-30-65 *Műszaki Előírás: épületek és épületszerkezetek hőtechnikai méretezése (szokványos használatú épületek), Építésügyi Minisztérium, 1966.*
71. MSZ-04.140/2-79 *Építésügyi Ágazati Szabvány: épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számításai, hőtechnikai méretezés.*
72. MSZ-04-140/2-85 *Építésügyi Ágazati Szabvány: épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számításai, hőtechnikai méretezés.*
73. MSZ-04-140-2:91 *Építésügyi Ágazati Szabvány: épületek és épülethatároló szerkezetek hőtechnikai számításai, hőtechnikai méretezés.*
74. 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról, 2006.
75. A belügyminiszter 40/2012. (VIII. 13.) BM rendelete az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról szóló 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet módosításáról.

76. A belügyminiszter 20/2014. (III. 7.) BM rendelete az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról szóló 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet módosításáról.
77. A Miniszterelnökséget vezető miniszter 39/2015. (IX. 14.) MvM rendelete az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról szóló 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet módosításáról.
78. 61/2020. (XII. 30.) ITM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról szóló 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet és a motorhajtóanyagok minőségi követelményeiről szóló 17/2017. (V. 26.) NFM rendelet módosításáról.
79. Berndgen-Kaiser, A.; Fox-Kämper, R.; Markus Wiechert, M. Post-war Single-Family Houses in Europe under Pressure? A Demographic and Economic Framework for the Future Market of Elder Single-Family Housing Neighbourhoods. *J. Urban Res. Brief.* 2016 . <https://doi.org/10.4000/articulo.3021>.
80. Csoknyai, T.; Hrabovszky-Horváth, S.; Georgiev, Z.; Jovanovic-Popovic, M.; Stankovic, B.; Villatoro, O.; Szendrő, G. Building stock characteristics and energy performance of residential buildings in Eastern-European countries. *Energy Build.* 2016, 132, 39–52.
81. European Commission. European Green Deal: Commission Proposes to Boost Renovation and Decarbonisation of Buildings, Press Release, Brussels, 2021. Available online: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_21_6683 (Letöltés: 2024.01.02).
82. Nemzeti Épületenergetikai Stratégia, ÉMI Építésügyi Minőségellenőrző és Innovációs Nonprofit Kft., Budapest, 2015.
83. Csoknyai, T. Az épülettípológia a hazai lakóépület-állomány energetikai modellezéséhez, Háttér tanulmány, 2013.
84. Magyar, Z., Az épülettípológia a hazai középület-állomány modellezéséhez, Háttér tanulmány, 2013.
85. KSH adatbázis (Letöltés:2023.12.03)
86. Debreceni Hőszolgáltató Zrt, Éves energetikai jelentés, 2022.
87. Shehadi, M. Review of Humidity Control Technologies in Buildings. *J. Build. Eng.* 2018, 19, 539–551.
88. Magyar Meteorológiai Szolgáltató Nonprofit Zrt. <https://met.hu/en/idojaras/> (Letöltés: 2023 December 18).
89. Yassaghi, H.; Hoque, S. An Overview of Climate Change and Building Energy: Performance, Responses and Uncertainties, *Buildings* 2019, 9(7), 166

90. Bamdad, K.; Cholette, E.M.; Omrani, S.; Bell, J. Future energy-optimised buildings - Addressing the impact of climate change on buildings, *Energy and Buildings*, 231, 2021, 110610.
91. Wang, H.; Cheng, Q. Impact of climate change heating and cooling energy use in buildings in the United States, *Energy and Buildings*, 82, 2014, 428-436.
92. Wan, K.; Li, D.; Pan, W.; Lam, J. Impact of climate change on building energy use in different climate zones and mitigation and adaptation implications, *Applied Energy*, 97, 2012, 274-282.
93. Kalmár, T.; **Bodó, B.**; Kalmár, F. **Heat losses of low-temperature radiant heating systems. *Energy Rep.* 2023, 10, 1982–1995.**
94. Zhang, H.L.; Baeyens, J.; Degréve, J.; Cacéres, G. Concentrated solar power plants: Review and design methodology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 22, 466–481.
95. Buday, T. A felső kéregbeli hőterjedés modellezése és alkalmazási lehetőségei, Doktori disszertáció, Debreceni Egyetem, Földtudományi Doktori Iskola, 2015.
96. Hungary Gross Average Wages. <https://tradingeconomics.com/hungary/wages> (Letöltés: 2024.01.10).
97. Loga, T.; Stein, B.; Diefenbach, N. TABULA building typologies in 20 European countries–Making energy-related features of residential building stocks comparable. *Energy Build.* 2016, 132, 4–12.
98. Theodoridou, I.; Papadopoulos, A.M.; Hegger, M. Statistical analysis of the Greek residential building stock. *Energy Build.* 2011, 43, 2422–2428.
99. Csoknyai, T. A magyarországi lakóépület-állomány energetikai modellezése, a korszerűsítés lehetőségei, MTA Doktori értekezés, 2022.
100. Lupíšek, A.; Tomáš Trubacík, T.; Holub, P. Czech Building Stock: Renovation Wave Scenarios and Potential for CO₂ Savings until 2050. *Energies* 2021, 14, 2455. <https://doi.org/10.3390/en14092455>.
101. Murray, P.; Marquant, J.; Niffeler, M.; Mavromatidis, G.; Orehounig, K. Optimal transformation strategies for buildings, neighbourhoods and districts to reach CO₂ emission reduction targets. *Energy Build.* 2020, 207, 109569.
102. Kiss, B.; Szalay, Z.S. Sensitivity of buildings' carbon footprint to electricity decarbonization: A life cycle-based multi-objective optimization approach. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2023, 28, 933–952.

103. Conci, M.; Konstantinou, T.; van den Dobbelsteen, A.; Schneider, J. Trade-off between the economic and environmental impact of different decarbonisation strategies for residential buildings. *Build. Environ.* 2019, 155, 137–144.
104. Gróf, G.; Janky, B.; Bethlendi, A. Limits of household's energy efficiency improvements and its consequence—A case study for Hungary. *Energy Policy* 2022, 168, 113078.
105. Bene, M.; Ertl, A.; Horváth, Á.; Mónus, G.; Székely, J. A magyarországi lakóingatlan-állomány energiaigényének becslése. *Hitelintézeteti Szle. Financ. Econ. Rev.* 2023, 22, 123–151. <https://doi.org/10.25201/HSZ.22.3.123>.
106. SolarPower Europe: EU Market Outlook for Solar Power 2023; pp. 2023–2027. Elérhető online: <https://www.solarpowereurope.org/insights/outlooks/eu-market-outlook-for-solar-power-2023-2027/detail> (Letöltés:2024.04.18)
107. Berardi, U. A cross-country comparison of the building energy consumptions and their trends, *Resources, Conservation and Recycling* 123 (2017), 230–241.
108. Parshall, L.; Gurney, K.; Hammera, S.A.; Mendoza, D.; Zhou, Y.; Geethakumar, S. Modeling energy consumption and CO₂ emissions at the urban scale: Methodological challenges and insights from the United States, *Energy Policy* 38 (2010), 4765–4782
109. Heinonen, J.; Junnila, S. A Carbon Consumption Comparison of Rural and Urban Lifestyles, *Sustainability* 2011, 3, 1234-1249; doi:10.3390/su3081234.
110. Heinonen, J.; Junnila, S. Residential energy consumption patterns and the overall housing energy requirements of urban and rural households in Finland, *Energy and Buildings* 76 (2014) 295–303.
111. Cai, J.; Jiang, Z. Changing of energy consumption patterns from rural households to urban households in China: An example from Shaanxi Province, China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12 (2008) 1667–1680.
112. Guan, X.; Guo, S.; Xiong, J.; Jia, G.; Fan, J. Energy-related CO₂ emissions of urban and rural residential buildings in China: A provincial analysis based on end-use activities, *Journal of Building Engineering* 64 (2023) 105686.
113. Zhang, M.; Song, Y.; Li, P.; Li, H. Study on affecting factors of residential energy consumption in urban and rural Jiangsu, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 53 (2016), 330–337.
114. Cheshmehzangi, A. Evaluating the Nexus between Housing and Energy Sectors: The Comparison of Urban, Peri-Urban and Rural Housing Areas in Zhuhai, China, *Energy and Power Engineering*, 2020, 12, 314-338.

115. Zhou, T.; Luo, X.; Liu, X.; Zhai, X.; Sun, Y.; Liu, G.; Liu, J.; Gao, Y.; Dang, D.; Li, N.; Feng, P.; Gao, Y.; Yang, H. The green and low-carbon development pathways in the urban and rural building sector in Shaanxi Province, China, *Energy & Buildings* 306 (2024) 113952.
116. Du, Q.; Han, X.; Li, Y.; Li, Z.; Xia, B.; Guo, X. The energy rebound effect of residential buildings: Evidence from urban and rural areas in China, *Energy Policy* 153 (2021) 112235.
117. He, B.J.; Yang, L.; Ye, M. Building energy efficiency in China rural areas: Situation, drawbacks, challenges, corresponding measures and policies, *Sustainable Cities and Society* 11 (2014) 7–15.
118. Santamouris, M.; Papanikolaou, N.; Livada, I.; Koronakis, I.; Georgakis, C.; Argiriou, A.; Assimakopoulos, D.N. On the impact of urban climate on the energy consumption of buildings, *Solar Energy* 70, 3 (2001), pp. 201–216.
119. Roxon, J.; Ulm, F.J.; Pellenq, R.J.M. Urban heat island impact on state residential energy cost and CO₂ emissions in the United States, *Urban Climate* 31 (2020) 100546.
120. Magli, S.; Lodi, C.; Lombroso, L.; Muscio, A.; Teggi, S. Analysis of the urban heat island effects on building energy consumption, *Int J Energy Environ Eng* (2015) 6:91–99.
121. Li, X.; Zhou, Y.; Yu, S.; Jia, G.; Li, H.; Li, W. Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings, *Energy* 174 (2019) 407-419.
122. Paolini, R.; Zania, A.; MeshkinKiya, M.; Castaldo, V.L.; Pisello, A.L.; Antretter, F.; Poli, T.; Cotana, F. The hygrothermal performance of residential buildings at urban and rural sites: Sensible and latent energy loads and indoor environmental conditions, *Energy and Buildings* 152 (2017) 792–803.
123. Győri, Á.; Huszár, Á.; Balogh, K. Differences in the Domestic Energy Consumption in Hungary: Trends between 2006–2017, *Energies* (2021), 14, 6718.
124. Hrabovszky-Horváth, S.; Pálvölgyi, T.; Csoknyai, T.; Talamon, A.; Generalized residential building typology for urban climate change mitigation and adaptation strategies: The case of Hungary, / *Energy and Buildings* 62 (2013) 475–485.
125. Kalmár, F.; **Bodó, B.**; Li, B.; Kalmár, T. **Decarbonization Potential of Energy Used in Detached Houses – Case Study, Buildings 2024, 14, 1824.**
126. Tóth, G.; Jáger, V.; Kovalszky, Zs.; Bóday, P.; Ádám, D.; Kincses, Á.; Szép, T. Characteristics of Household Energy Consumption in the Shadow of the Russia-Ukraine War - A Case Study from Hungary; *International Journal of Sustainable Energy Planning and Management* 40, (2024), 52–70.

127. **Bodó, B.**; Kalmár, F. **Analysis of primary energy use of typical buildings in Hungary, EEMJ. 13 (11), 2014, 2725-2731.**
128. 9/2023. (V. 25.) ÉKM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról
129. Hesaraki, A; Huda, N. A comparative review on the application of radiant low-temperature heating and high-temperature cooling for energy, thermal comfort, indoor air quality, design and control, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 49, 2022, 101661.
130. Li, R.; Yoshidomi, T.; Ooka, R.; Olesen, B.W. Field evaluation of performance of radiant heating/cooling ceiling panel system, *Energy and Buildings*, 86, 58–65. 2015.
131. Verbai, Z.; Kocsis, I.; Kalmár, F. Outdoor dry bulb heating design temperatures for Hungary, *Energy*, 93 (2), 2015, 1404-1412.
132. D'Agostino D, Parker D, Epifani I, Crawley D, Lawrie L, How will future climate impact the design and performance of nearly zero energy buildings (NZEBs)?, *Energy*, 240, 2022, 122479
133. Macskásy, Á. Központi fűtés II., Tankönyvkiadó, Budapest, 1978, 431-432.
134. Bánhidi, L. The Thermotechnical Dimensioning of Radiant Strips and Borders for the Heating of Communal Buildings, *Building Sciences*, 9, 1974, 85-90.
135. Yohanis, Y.G.; Norton, B.; Utilization factor for building solar-heat gain for use in a simplified energy model, *Applied Energy*, 63, 1999, 227-239.
136. ISO 52016-1:2017 Energy performance of buildings — Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads — Part 1: Calculation procedures, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
137. Shin, M.S.; Rhee, K.N.; Ryu, S.R.; Yeo, M.S.; Kim, K.W.; *Building and Environment* 92 (2015) 559-577.
138. Satyavada, H.; Baldi, S. A Novel Modelling Approach for Condensing Boilers Based on Hybrid Dynamical Systems, *Machines*, 2016, 4, 10; doi:10.3390/machines4020010.
139. Hirvonen, J.; Sirén, K. High latitude solar heating using photovoltaic panels, air-source heat pumps and borehole thermal energy storage, ISES Solar World Congress 2017, doi: 10.18086/swc.2017.29.06.
140. https://www.vogelundnoot.com/static_files/uk/media/downloads/31667%20VN%20Technical%20Brochure%20UK%20WEB.pdf, Letöltés: 2024.04.15
141. Fanger, P.O. *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*, Danish Technical Press, Copenhagen, 1970.

142. Kalmár, T.; **Bodó, B.**; Han, S.; Li, B.; Kalmár, F.: **Comparative analysis of energy demand at an equal operative temperature in the case of radiator and low-temperature radiant heating, Journal of Building Engineering, 2025, 100, 111792.**
143. <https://met.hu/en/idojaras/>, Országos Meteorológiai Szolgálat, Letöltés: 2023.12.18.
144. Kalmár, F.; **Bodó, B.**; Kalmár T.: **Comparison of Energy Demand for Heating and CO₂ Emissions in Urban and Rural Areas, the Case of Hajdú-Bihar County, Hungary, Buildings 2025, 15, 1625.**

1. Melléklet

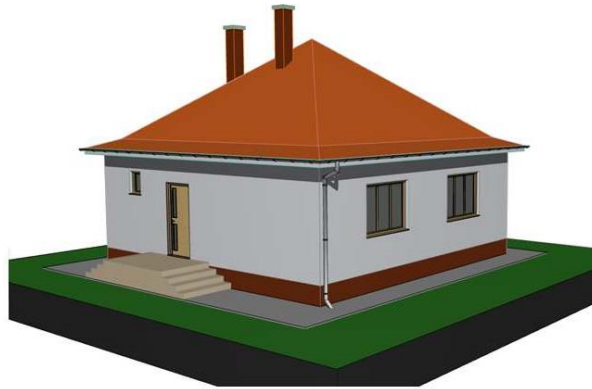
Tipikus lakóépületek energiafogyasztása

A. Meglévő állapot

Hajdú Bihar vármegyei településeket vizsgálva kiválasztottam három jellemző épülettípust (valós épületek), melyek mind az építés időszak, mind az építési technológia tekintetében a lehető legnagyobb darabszámban fordulnak elő.

1. típus: családi ház

Az első épület 70-80-as években készült családi ház. Ezekben az évtizedekben szinte kizárólag típusházak készültek nagyban leszűkítve a variációk számát. Legelterjedtebb épülettípus ebből az időszakból a négyzet alapú 9x9 vagy 10x10 alapterületű egyszintes lakóház (1. ábra, [127]).



M1. ábra: Tipikus családi ház

Ezeknél az épületeknél jellemzően nem alkalmaztak hőszigetelést a falszerkezeteken és a szabványok ellenére nem vizsgálták hőtechnikailag az épületet. A kor sajátossága hogy az építetőknek többnyire nem volt lehetősége építőanyagot választani műszaki jellemzők alapján. A padlószervezet többnyire nem tartalmazott hőszigetelést, jobb esetben a szerkezet rétegei: talajnedvesség elleni szigetelés, beton réteg és padlóburkolat. Ennek hőtechnikai javítása nehézkes és költséges. A falszerkezet többféle is lehet. Legjellemzőbb alapanyagok kisméretű tömör téglá, B30-as téglá, gázszilikát. A földem szerkezet legelterjedtebb fajtája fagerenda tartószerkezet valamilyen feltöltéssel ellátva. A 80-as évektől előregyártott gerenda béléstesttel. Az ablakok gerébtokos fakeretes szerkezetűek és kétrétegű üvegezéssel vannak ellátva. A fűtési rendszer, köszönhetően a 90-es évek olcsó gázárainak, szinte minden esetben valamilyen földgázzal üzemelő hőtermelő, állandó hőmérsékletű központi gázkazán vagy gázkonvektor. A családi házak egy részénél megmaradt a vegyes tüzelésű kazán, mint alternatív lehetőség.

A mintapéldában egy 129,5 m² hasznos alapterületű földszintes alápincézett családi házat vizsgáltam meg (külső fala gázszilikát, fagerendás padlásfödém).

2. típus: Hagyományos technológiával épült társasház

Ezek az épületek többnyire 2-4 szintes épületek (2. ábra, [127]). A padló réteg nem tartalmaz hőszigetelést, a fal kisméretű tömör téglá vagy B30-as téglá, vakolattal ellátva. Födém beton teherhordó szerkezet kohósalak feltöltéssel hőszigetelés céljából. Nyílászárók Geréb tokos, kétrétegű üvegezéssel. fűtési rendszer fűtött térben elhelyezett tömbfűtés. Idősebb épületek jellemző fűtési megoldása ezekben az épületekben még a gázkonvektor. Amennyiben a fűtési rendszer felújításra került, akkor állandó hőmérsékletű kazán, esetleg kombi (fűtési hőenergia és HMV előállításra is alkalmas) gázkazán a hőtermelő. A vizsgált társasház külső falszerkezete 38 cm tömör téglá falazat, a lapostető fagerendás födém kohósalak feltöltéssel, nettó alapterülete 877,2 m².



M2. ábra: Hagyományos technológiával épült társasház

3. típus: Iparosított technológiával épült társasház

Ezeknek az épületeknek a külső falszerkezete többrétegű szendvicspanel. Jellemzően 4-11 de akár 20 szintesek is lehetnek. A vizsgált épületnek 32 lakása van, ötszintes (földszint és 4 emelet) és két lépcsőházzal rendelkezik (3. ábra, [127]). A felmenő szintek előregyártott paneles szerkezetek, a födemelemek vastagsága 16 cm. A pincésinti fogadószint monolit vasbeton pincefalakból és 16 cm vtg. monolit vasbeton födemből áll. Ezek az épületek jellemzően orosz technológia alapján készültek. Az előregyártott elemek (panelek) sajátos felépítése miatt a szerkezet és illesztési pontjai hőhidak. A panel szerkezete: 15 cm vasbeton, 5 cm polisztirol és 7 cm vasbeton. A lapostető vasbeton kohósalak feltöltéssel. A

fűtési és használati melegvíz előállításához szükséges energiát távfűtési rendszerből kapja az épület. A nettó fűtött alapterület 2040,6 m².



M3. ábra: Panelépület

B. Felújított állapot

Megvizsgáltam, hogy milyen energetikai jellegű beavatkozásokra lenne szükség ahhoz, hogy a három tipikus épület megfeleljen a 2002, 2012 és 2022 években érvényben lévő szabványokban javasolt, vagy Rendeletekben előírt követelményeknek, illetve elemeztem a széndioxid kibocsátás alakulását ezekben az esetekben. Az utólagos hőszigetelések esetében polisztirol alkalmazását feltételeztem minden esetben.

A családi ház esetében jellemző, hogy a szerkezetek nem felelnek meg még az építéskor érvényben lévő szabványoknak sem. Az 1991-es szabvány nem ír elő ugyan konkrét hőátbocsátási tényezőket, de alapul véve a korábbi követelményeket úgy falszerkezetet (2 cm) mint a padlásfödémét (8 cm) szükséges hőszigetelni. A gépészeti rendszer, az adott kor elérhető műszaki lehetőségeinek megfelelően erősen lekorlátozza a megoldások számát. Hőtermelő állandó hőmérsékletű gázkazán, központi szabályzó termosztáttal.

A 2006-os rendelet igényei kielégítésére jelentős változtatások szükségesek. A szerkezetek megfelelő szigetelése alapfeltétel (6 cm polisztirol a külső falszerkezetekre, 12 cm a padlásfödémre és ablakcsere is szükséges). Lényegesen nagyobb beavatkozást igényel a gépészet. hőtermelő cserét kondenzációs kazánra, radiátorok szelepeinek cseréje termosztatikus szelepekre. A változtatások hatására közel 50%-al csökken az épület energia igénye.

A 2022 érvényes követelményértékek eléréséhez gyakorlatilag teljes átalakítás szükséges. A falszerkezeteket minimum 15 cm vastagságú, a padlásfödémeket minimum 25 cm vastagságú hőszigeteléssel kell ellátni. Szükséges továbbá a hőtermelő cseréje valamilyen megújuló energiaforrást alkalmazó energia termelőre, esetünkben hőszivattyúra. Hőleadó oldalról szinte teljes csere szükséges. Lehetőleg alacsony hőmérsékletű felületfűtési módot érdemes választani. A vizsgált épületnél mennyezetfűtést választottam a kisebb szerkezeti magasság és súly miatt, továbbá a passzív hűtés kihasználása érdekében. A közel nulla energia felhasználás érdekében a tető felület déli oldalán napelemeket helyezünk el a lehető legnagyobb darabszámban. Melegvíz termelésére nyári időszakban napkollektorok alkalmazását feltételeztem.

A biomassa tüzelés rosszabb energetikai mutatókat eredményez, mint egy hőszivattyú. De figyelembe kell venni, hogy az Alföldi kisvárosok családi házas övezetében élők jelentős része rendelkezik újra termelődő biomasszával, hiszen mezőgazdasággal foglalkoznak. A 30 év feletti felhasználók rendelkeznek vegyes tüzelésű központi fűtés rendszerek üzemeltetési tapasztalataival, ezért sokkal szívesebben alkalmazzák.

A 2. típusú épület esetében a falszerkezetre 3 cm, a lapostetőre 8 cm vastagságú utólagos hőszigetelésre van szüksége, hogy megfeleljen a 2002 évben javasolt értékeknek. A 2006 TNM Rendelet előírásait a falszerkezet esetében 8 cm, a lapostető esetében 14 cm vastagságú hőszigeteléssel teljesíti az épület. A 2022-ben érvényben lévő előírások a falszerkezet esetében 15 cm, a lapostető esetében 20 cm utólagos hőszigeteléssel teljesíthetők. A fűtési rendszert illetően 16 lakásos tömbfűtéses házról van szó. Lényeges különbség tehát a több lakóegység miatti egyidejűségekből és kompaktabb kialakításból adódó fajlagosan kisebb hőtermelő kialakításának lehetősége. Egy 2012-es felújítás esetében a 2006-os rendelet előírásainak teljesítéséhez elegendő a szerkezetek javítása, a hőleadó rendszer szabályozásának megoldása, hőtermelő cseréje. 2022-ben a követelmények eléréséhez már átfogóbb átalakítások szükségesek, melyek az épület elhelyezkedése, statikai állapota (terhelhető-e új rétegekkel az épület) alapjaiban meghatározza az alkalmazott rendszerek beépítési lehetőséget. Jelen esetben azt feltételeztem, hogy a társasház rendelkezik megfelelő méretű területtel a talajszondák elhelyezésére és így talajszondás hőszivattyús rendszert vettem figyelembe, mint hőtermelő.

A panelépület esetében a 2002-ben érvényben lévő javaslatok teljesülnek, ha a panelszerkezetekre 2 cm, a födémszerkezetekre 8 cm vastagságú hőszigetelést helyezünk el. A 2012-ben érvényes követelmények a panelszerkezetekre 5 cm a lapostetőre 14 cm utólagos hőszigetelést tesznek szükségessé. A 2022-ben érvényes rendelet szerint 12 cm utólagos

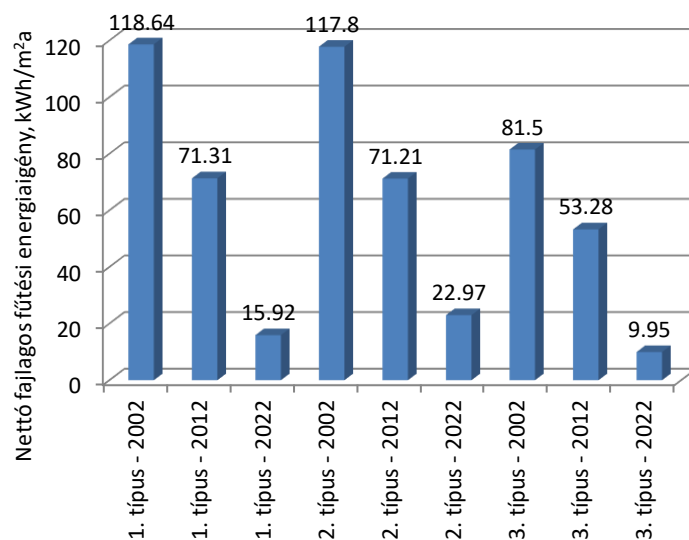
hőszigetelés szükséges a panelszerkezetre és 22 cm vastagságú hőszigetelés a lapostetőre. Az energiaellátást illetően meghatározó a távfűtést kiszolgáló erőmű típusa és kialakítása. Mindenképpen javasolt az energia lakásonkénti mérésének (elszámolásának) a kialakítása. Ugyan a költségosztó vagy hőmennyiségmérő közvetlenül nem takarít meg energiát, de a tulajdonosok lényegesen kevesebb energiát fogyasztanak, ha mérhető az energiamennyiség és ez alapján történik az elszámolás. Az energiamegtakarítási célok elérése érdekében nem csak az épületeket kell hőszigetelni, hanem fontos szerepe van a felhasznált energiahordozónak is. A bemutatott példában a jelenleg legkisebb primerenergia átalakítási tényezővel rendelkező távfűtési rendszert vettem figyelembe, ezáltal jelentős az energia felhasználás csökkenése. Abszolút értékben a legnagyobb energiamegtakarítást ennél az épülettípusnál érhetjük el, de a hőtermelő felújítása központi beruházást igényel, de ez a felújítás egységesen befolyásolja a település nagyszámú ingatlanát.

A vizsgált tipikus épületek A/V jellemzőjét valamint a térfogatra vetített fajlagos hővesztésgtényezőjét az 6. táblázat mutatja be.

M1. táblázat A vizsgált épületek főbb jellemzői

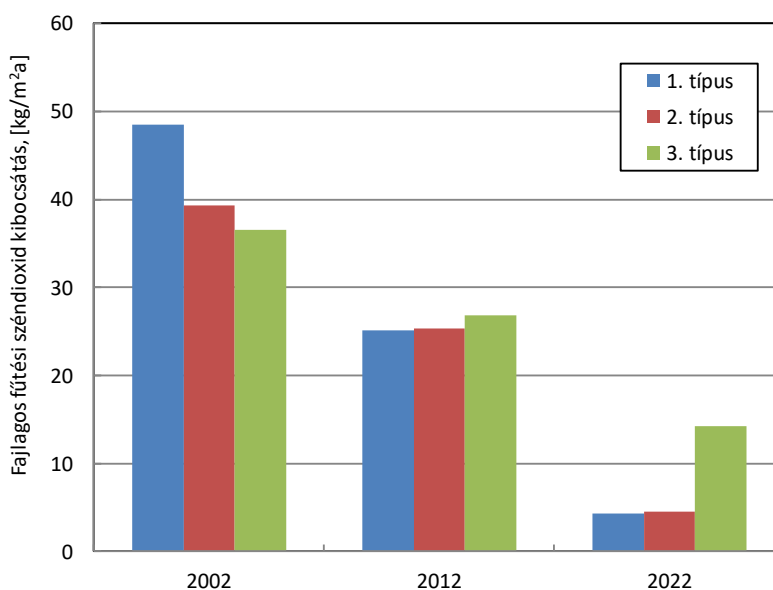
Épülettípus	A/V arány	Fajlagos hővesztésgtényező
	[m ² /m ³]	[W/m ³ K]
1. típus - 2002	0,799	0,544
1. típus - 2012		0,302
1. típus - 2022		0,134
2. típus - 2002	0,478	0,428
2. típus - 2012		0,231
2. típus - 2022		0,114
3. típus - 2002	0,427	0,353
3. típus - 2012		0,209
3. típus - 2022		0,104

A bemutatott épületek fűtési nettó fajlagos fűtési hőenergia igényét a 4. ábra mutatja be, [127].



M4. ábra: A nettó fajlagos fűtési energiaigény alakulása

Az éves széndioxid kibocsátás fűtött alapterületre vetített fajlagos értékeit az 5. ábra szemlélteti, [127].



M5. ábra: A vizsgált tipikus épületek széndioxid kibocsátása

A 4. és 5. ábrák alapján megállapítható, hogy a fűtési energiaigény csökkenésének trendjét követi a CO₂ kibocsátás csökkenése, azonban a két célparaméter csökkenésének mértéke eltérő.

Az 1. típusú lakóépületnél a 2002 év követelményeinek a 2012 évben érvényes követelményekre történő szigorítása 40%-os, ám a 2022-es év követelményeinek való megfelelés a fűtési energiaigény 86%-os csökkenéshez vezet. A 2. típusú lakóépület esetében is hasonló értékeket kapunk (40%-os, illetve 80%-os csökkenést érünk el). A 3. épülettípus

esetében azonban a 2002-2012 évek közötti hőtechnikai és energetikai javulás 35%-os, a 2002-2022 évek követelményei közötti különbség pedig 88%-os fűtési energiaigény csökkenést eredményez.

A fajlagos széndioxid kibocsátás csökkenése az 1. épülettípus esetében 2002-2012 évek között 48%, míg 2002-2022 évek között 93% csökkenést érhetünk el. A 2. típusú épületnél 2002-2012 közötti hőtechnikai és energetikai felújítással 35%-os csökkenést, míg a 2002-2022 közötti felújítással 88%-os CO₂ kibocsátás csökkenést érünk el. A 3. típusú épület esetében 2002-2012 között 27%, 2002-2022 között pedig 61% a CO₂ kibocsátás csökkenés.

Megállapítható, hogy a 2022-es követelményeknek való megfeleléssel, illetve a megújuló energiaforrások integrálásával 9%-ra, illetve 12%-ra csökken a CO₂ kibocsátás az 1. valamint a 2. típusú épületeknél, de a panelépületeknél 39%-ra lehet ezt csökkenteni, tekintettel arra, hogy ennél a típusnál a megújuló energiaforrások integrálása a hőtermelésbe már jóval nagyobb befektetést igényel (pl geotermikus rendszer, vagy biomassza erőmű).

Megvizsgáltam, hogy a felújított épületek esetében a fotovoltaikus rendszerek telepítése milyen maximális mennyiségű villamosenergia termelését tenné lehetővé (optimális dőlésszögű Déli tájolást feltételeztem).

Családi ház esetében a minimálisan rendelkezésre álló felület (optimális esetben déli tájolás) átlagosan 10 db 1600x1000 mm panel 230W_p, 1050W, ez kb. 2,3 kW_p teljesítményt jelent (6a. ábra, [127]). Éves szinten 2100 kWh lesz a termelt villamos energia mennyiség. Melléképülettel rendelkező családi házak esetében (a lakóingatlanok legalább 50%-a ilyen) ennek duplája is kiépíthető. Az elmúlt években, a technológia fejlődése miatt (hatásfok növekedés), azonos bruttó felületet figyelembe véve akár 5,5 kW_p is telepíthető.

Társasházak esetében a lakóegységre eső tetőfelület fajlagosan kisebb, hiszen az épület több szintes. A 2. típusú épületnél a rendelkezésre álló felület 250 m² lapostető melyre telepíthető (elkerülve az önárnyékot) egy 160 m² napelempark, 20 kW_p teljesítménnyel, ami éves szinten 21000 kWh villamosenergiát termelhet.

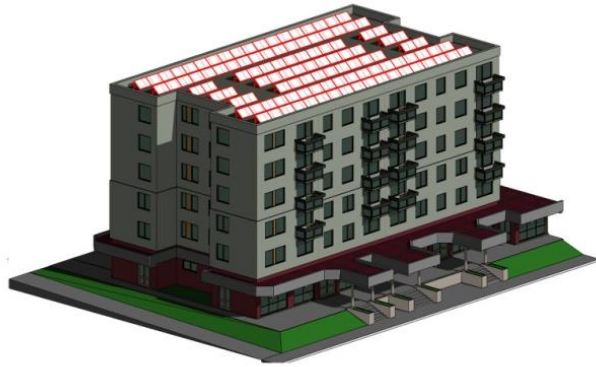
A vizsgált panel épület esetében a rendelkezésre álló felület közel 500 m² lapostető. Erre elméletileg telepíthető egy 450 m² napelempark, csaknem 55 kW_p csúcsteljesítménnyel (6b. ábra, [127]). Egy ilyen rendszer éves szinten 59000 kWh villamosenergiát termel (a számításokat minhárom épülettípus esetében a szabadon felhasználható PVGIS szoftver segítségével végeztem el. Tekintettel arra, hogy a megtermelt villamosenergia primerenergia átalakítási tényezője 2,5, a napelemes rendszerek telepítésével jelentősen csökkenthető az összesített energetikai jellemző A csökkenés mértéke:

- 1. típus: -40,54 kWh/m²a;

- 2. típus: $-59,85 \text{ kWh/m}^2\text{a}$;
- 3. típus: $-72,28 \text{ kWh/m}^2\text{a}$.



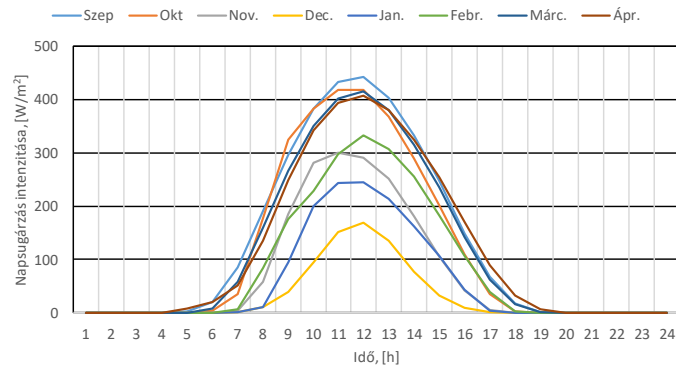
a.



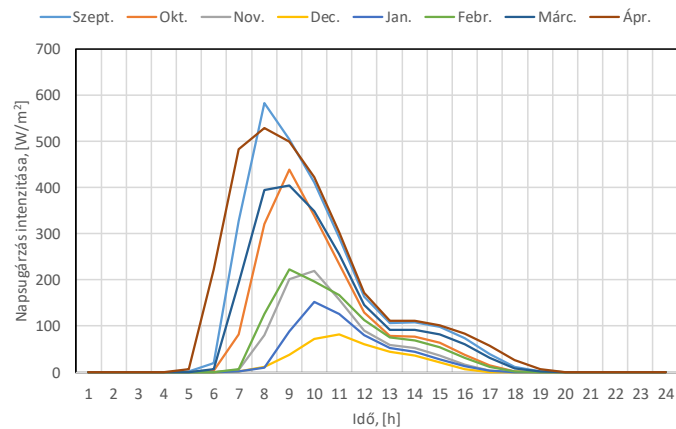
b.

M6. ábra: Napelemes rendszerrel ellátott épületek (a – családi ház, b – panel)

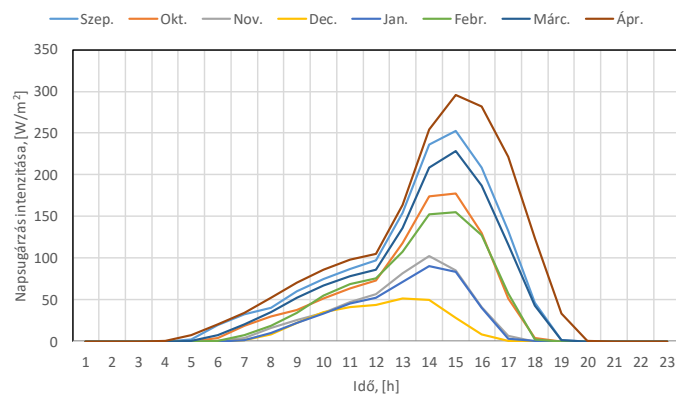
2. Melléklet



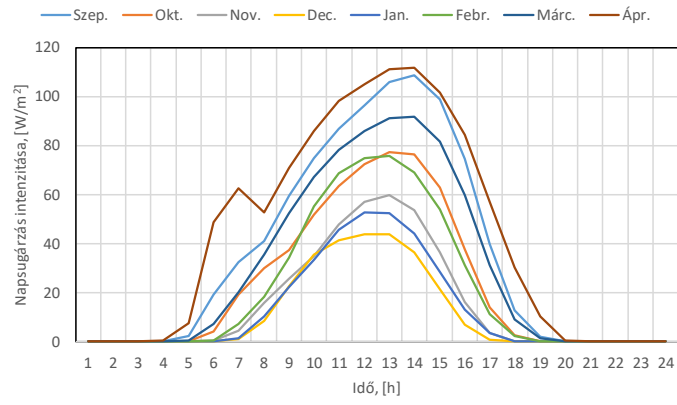
M7. ábra: Déli tájolású homlokzatra érkező napsugárzás, [93]



M8. ábra: Keleti tájolású homlokzatra érkező napsugárzás, [93]

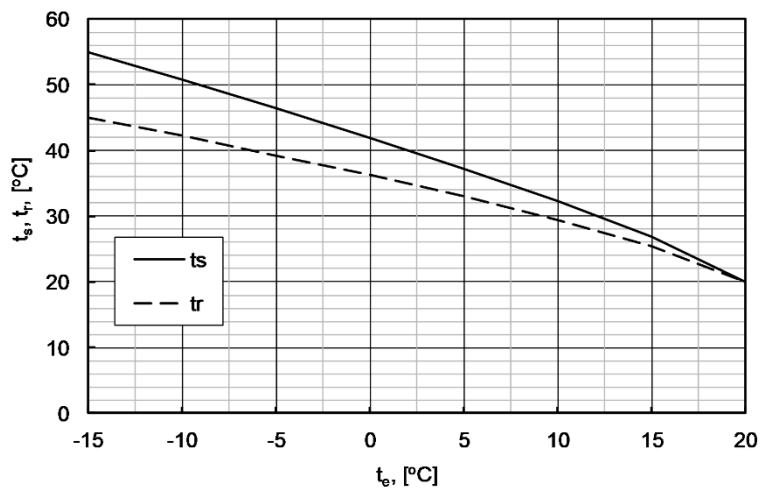


M9. ábra: Nyugati tájolású homlokzatra érkező napsugárzás, [93]



M10. ábra: Északi tájolású homlokzatra érkező napsugárzás, [93]

3. Melléklet



M11. ábra: Előremenő és visszatérő hőmérsékletek radiátoros fűtés esetében, [93]

4. Melléklet

M2. Táblázat Átlagos felületi hőmérsékletek felületfűtések esetében ($t_e=-15^\circ\text{C}$), [93]

Vizsgált eset	Épületelem	2002	2012	2022
Padló-, fal- és mennyezetfűtés	Padló	21,40	21,07	20,51
	Mennyezet	22,11	21,61	20,77
	Fal	22,11	21,61	20,77
Padló- és mennyezetfűtés	Padló	22,59	21,91	20,98
	Mennyezet	23,89	22,86	21,48
Padlófűtés	Padló	26,09	24,50	22,35

M3 táblázat, A fűtővíz átlaghőmérséklete felületfűtések esetében ($t_e=-15^\circ\text{C}$), [93]

Vizsgált eset	Épületelem	2002	2012	2022
Padló-, fal- és mennyezetfűtés	Padló	22,30	21,64	20,41
	Mennyezet	21,85	21,34	20,36
	Fal	22,14	21,54	20,45
Padló- és mennyezetfűtés	Padló	30,10	24,92	22,50
	Mennyezet	25,46	25,98	23,04
Padlófűtés	Padló	35,61	31,38	25,87

Köszönetnyilvánítás

A kutatási munkát részben a TKP2021-NKTA projekt támogatta. A TKP2021-NKTA-34 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NKTA pályázati program finanszírozásában valósult meg.