

dc_2011_22



ÉPÜLETGÉPÉSZETI ÉS
GÉPÉSZETI ELJÁRÁSTECHNIKA
TANSZÉK

A magyarországi lakóépület-állomány energetikai
modellezése, a korszerűsítés lehetőségei

Tézisfüzet

Csoknyai Tamás

PhD, okleveles gépészmérnök

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

Gépészmérnöki Kar

Épületgépészeti és Gépészeti Eljárástechnika Tanszék

Budapest

2022

Tartalom

Jelölések jegyzéke	3
Fogalommagyarázat	4
Bevezetés	5
Célkitűzés	6
Módszertan	7
1. Áttekintő	7
2. Statisztikai források	8
3. Épületek felmérése	9
4. Számítási módszerek	10
Új tudományos eredmények, tézisek	11
A) Módszertani keret	11
1. Tézis: Lakóépület tipológiai mátrix [16–22]	11
B) A magyarországi lakóépületek jelenlegi állapota	11
2. Tézis: Eredeti állapot értékelése: indikátorok, aggregált energiafelhasználás [16–22]	11
3. Tézis: Effektív prebound hatás [16,20,22]	12
4. Tézis: Energiahatékonysági skála [9,22,23]	12
C) A korszerűsítés lehetőségei	12
5. Tézis: Biomassza alapú hőtermelés [16,20–22]	12
6. Tézis: Napenergia hasznosítás [22,24–27]	13
7. Tézis: Hőtermelés elektrifikációja [16,22,28]	13
8. Tézis: Gépi hűtés [16,22,28]	14
9. Tézis: Elektrifikáció és napelemek együttes alkalmazása [16,22,24–31]	14
10. Tézis: Helyben termelhető megújuló energia hasznosítás lehetőségei [16,22,24–30]	15
Hivatkozások	16
1. Melléklet: Lakóépületek tipológiai mátrixa	18

Jelölések jegyzéke

E_f	kWh/m ² év	a fűtés fajlagos nem megújuló primer energia igénye
$E_{\text{háztartási}}$	kWh/m ² év	a háztartási gépek fajlagos nem megújuló primer energia igénye
$E_{\text{hű}}$	kWh/m ² év	a gépi hűtés fajlagos nem megújuló primer energia igénye
E_P	kWh/m ² év	összesített energetikai jellemző
$E_{P,\text{eredeti+direkt}}$	kWh/m ² év	összesített energetikai jellemző értéke, ha direkt villamos hőellátásra való átállás történik szerkezeti felújítás nélkül
$E_{P,\text{eredeti+direkt+napelem}}$	kWh/m ² év	összesített energetikai jellemző értéke, ha direkt villamos hőellátásra való átállás történik szerkezeti felújítás nélkül, valamint napelemek kerülnek telepítésre
$E_{P,\text{eredeti+hősziv}}$	kWh/m ² év	összesített energetikai jellemző értéke, ha levegő-víz rendszerű hőszivattyús hőellátásra való átállás történik szerkezeti felújítás nélkül
$E_{P,\text{eredeti+hősziv+napelem}}$	kWh/m ² év	összesített energetikai jellemző értéke, ha levegő-víz rendszerű hőszivattyús hőellátásra való átállás történik szerkezeti felújítás nélkül, valamint napelemek kerülnek telepítésre
$E_{P,\text{ref+árny+direkt}}$	kWh/m ² év	összesített energetikai jellemző értéke, ha direkt villamos hőellátásra való átállás, referencia szerkezeti felújítás történik külső árnyékolókkal
$E_{P,\text{ref+árny+direkt+napelem}}$	kWh/m ² év	összesített energetikai jellemző értéke, ha direkt villamos hőellátásra való átállás, referencia szerkezeti felújítás történik külső árnyékolókkal, valamint napelemek kerülnek telepítésre
$E_{P,\text{ref+árny+hősziv}}$	kWh/m ² év	összesített energetikai jellemző értéke, ha levegő-víz rendszerű hőszivattyús hőellátásra való átállás, valamint referencia szerkezeti felújítás történik külső árnyékolókkal
$E_{P,\text{ref+árny+hősziv+napelem}}$	kWh/m ² év	összesített energetikai jellemző értéke, ha levegő-víz rendszerű hőszivattyús hőellátásra való átállás, valamint referencia szerkezeti felújítás történik külső árnyékolókkal, valamint napelemek kerülnek telepítésre
$E_{X,\text{eredeti}}$	kWh/m ² év	eredeti állapotra jellemző valamely energetikai jellemző
$E_{X,\text{ref}}$	kWh/m ² év	referencia korszerűsítéssel elért valamely energetikai jellemző

Fogalommagyarázat

bottom-up modell: Az épületállomány energiafelhasználásának meghatározását célzó, alulról felfelé építkező számítási modell, mely jellegzetes, vagy statisztikai mintavételezés alapján felmért épületek geometriai és műszaki tulajdonságaiból indul ki, és épületfizikai számítási modell az eredményeket extrapolálja szektorális szintre.

családi ház: 1-3 lakásos épület

fajlagos széndioxid emisszió: Az épület üzemeltetéséhez köthető széndioxid kibocsátási egyenérték hasznos fűtött alapterület egységre vetítve, mely általános esetben nem tartalmazza a világítás, liftek, háztartási gépek és szórakoztató elektronika hatását.

hasznos alapterület: A lakáshoz tartozó valamennyi helyiség alapterületének egész m^2 -ben kifejezett nagysága. Az előszobák (szélfogók, belépők), beépített szekrények, öltözők (gardróbok), éléskamrák, a konyhai, fürdőszobai stb. berendezések alapterülete beletartozik a lakás alapterületébe. A lodzsa, a fedett (zárt) terasz és fedett (zárt) erkély alapterületének a fele, tetőtér (manzárd) esetében az 1,9 m vagy magasabb belmagasságú területet tartozik a lakás alapterületébe.

kis társasház: 4-9 lakásos épület

költségoptimalizált követelményszint: A 7/2006 (V.24.) TNM rendelet 2021. december 10-én hatályos változatának 5. mellékletében definiált követelményszint [1].

közél nulla energiaigényű követelményszint: A 7/2006 (V.24.) TNM rendelet 2021. december 10-én hatályos változatának 6. mellékletében definiált követelményszint [1].

nagy társasház: 10 vagy több lakásos épület

összesített energetikai jellemző (E_p): Az épület fajlagos nem megújuló primer energiafelhasználása hasznos fűtött alapterület egységre vetítve, a 7/2006 (V.24.) TNM rendelet szerint definiálva [1]. Nem tartalmazza a világítás, liftek, háztartási gépek és szórakoztató elektronika hatását. A gyakorlatban és a disszertációban a *fajlagos primer energiafelhasználás* alatt is ezt a fogalmat értjük, nem pedig a teljes fajlagos primer energiafelhasználást. Az épület *teljes primer energiafelhasználása* a *nem megújuló primer energiafelhasználás* és a *megújuló primer energiafelhasználás* összege.

primer energiafelhasználás: ld. összesített energetikai jellemző

prebound hatás: Az a jelenség, hogy a fogyasztók kevesebb energiát használnak, mint ami az épületek fizikai tulajdonságai alapján elvárható, ami különösen az energiaszegénység sújtotta régiókra jellemző.

referencia szerkezeti felújítás: Az épület fűtött burkát határoló szerkezetek korszerűsítése a 7/2006 (V.24.) TNM rendelet [1] 2021. december 10-én hatályos változata 5. mellékletének I. részében definiált követelmények szerint.

referencia korszerűsítés: A költségoptimalizált követelményszintnek megfelelő korszerűsítés, melyben az épület fűtött burkát határoló szerkezetek korszerűsítése a referencia szerkezeti felújítás szerint valósul meg, a feltételezett hőtermelő kondenzációs kazán, egyéb vonatkozásban pedig a 7/2006 (V.24.) TNM rendelet [1] 2021. december 10-én hatályos változatának 5. melléklet III. rész 2. pontjában leírt referencia épülettechnikai rendszer az irányadó.

top-down modell: Az épületállomány energiaszükségletének meghatározását célzó, felülről lefelé építkező számítási modell, mely az értékesített energiahordozókból indul ki, azt bontja le szektorok és felhasználási célok szerint.

Bevezetés

Az energia hatékony felhasználása napjaink egyik alapvető kérdése. Az elkövetkező évtizedekre vonatkozó stratégiai döntéseket a globális környezeti problémákhoz, a fosszilis energiahordozó készletek végecséjéhez, az energiatartósság csökkentéséhez kapcsolódó nemzetközi egyezmények, európai uniós vállalások és hazai célkitűzések határozzák meg. Ebben a lakóépület-állomány szerepe kiemelkedő, hiszen egy olyan szektorról van szó, melyhez a legnagyobb energiamegtakarítási és üvegházhatású gáz kibocsátás csökkentési potenciál köthető, ami ráadásul költséghatékonyan ki is aknázható. Az EU célkitűzése az, hogy 2050-ig nagyon energiatartósságú és dekarbonizált legyen az európai épületállomány, melyben a közel nulla energiaigényű épületek a meghatározóak, jelentős mértékű helyszínen vagy a közelben előállított megújuló energia hasznosítással [2], [3].

A célok teljesítéséhez energiatartósságú új épületek létesítése távolról sem elégséges. Gondoljunk arra például, hogy Magyarországon az elmúlt 20 év átlagában évente kevesebb, mint 24 000 lakás épült [4]. Ilyen ütem mellett 2050-ig a lakásállomány legfeljebb egyhatoda újulhat meg, feltéve, ha ugyanennyi lakás bontásra vagy használaton kívül kerül. A meglévő lakóépület-állomány energetikai korszerűsítése tehát jóval nagyobb jelentőséggel bír, mint az új építés. A meglévő lakóépület-állomány felújítási rátájára nincs egyértelmű adat, ami abból adódik, hogy jellemzően részleges felújítások történnek. A MEHI felmérései alapján az elmúlt 10 évben az éves megújulási ráta 2-7% közé tehető (a nyílászárócsere gyorsabban, a hőszigetelések és a gépészeti korszerűsítések lassabb ütemben zajlanak) [5]. Ha 3%-os rátával számolunk, akkor 2050-ig majdnem a teljes állomány megújulhat, de a végeredmény szempontjából nem mindegy milyen felújítási mélység társítható a korszerűsítésekhez.

A stratégiai felújítási célok eléréséhez stratégiai tervezés szükséges, melynek kulcseleme a minél megbízhatóbb kiindulási adatállomány. Csak megfelelő felbontású, szakszerűen gyűjtött épületinformációk alapján lehet a jelen lakóépület-állomány energetikai minőségéről megbízható képet kapni, ami alapját képezheti a különböző korszerűsítési lehetőségek által realizálható energiamegtakarítási potenciál meghatározásának, illetve korszerűsítési forgatókönyvek, prognózisok felállításának. Egy megfelelő kiinduló adatbázisra épített lakóépület-állomány modell alapját képezheti számos további, energetikán túlmutató elemzésnek, mint például a felújítási stratégiák pénzügyi, makrogazdasági, munkaerőpiaci, egészségügyi, szociális (energiaszegénységhez kapcsolódó) vonatkozásainak vizsgálata ([6]).

Az épületállományon belül a lakóépületek szerepe meghatározó [7], [8]. A lakóépület-állomány energiafelhasználásának meghatározására elsődlegesen két lehetőség kínálkozik, melyeket a nemzetközi szakirodalom „top-down” és „bottom-up” modellként említ. A „top-down” modell az értékesített energiahordozókból indul ki, azt bontja le szektorok és felhasználási célok szerint. Ezzel szemben a „bottom-up” modell jellegzetes, vagy statisztikai mintavételezés alapján felmért épületek geometriai és műszaki tulajdonságaiból indul ki és épületfizikai számítási modell eredményeket extrapolál szektoriális szintre. Mindkét módszer mellett és ellen szólnak érvek, de azt ki kell emelni, hogy érdemben csak a „bottom-up” modell alkalmas különböző korszerűsítések megtakarítási potenciáljának és költséghatékonysági vonatkozásainak meghatározására.

Az elsődleges stratégiai cél a lakóépület-állomány nem megújuló primer energiafelhasználásának jelentős mértékű csökkentése kell hogy legyen, ami az energiaigény csökkentésével (energiahatékonyság javító intézkedésekkel), valamint megújuló energiaforrások alkalmazásával érhető el.

Ezeken belül számos technológia közül választhatunk. Felmerül az a kérdés, hogy hosszú távon hová vezet egyes, a szakpolitika vagy a piaci mechanizmusok által preferált intézkedések általános alkalmazása.

Célkitűzés

A kutatás általános célja a fentiek tükrében a hazai lakóépület-állomány energetikai modellezése, a meglévő állapot feltérképezése, a korszerűsítési lehetőségek elemzése, valamint a modellezett alapadatok szolgáltatása kapcsolódó, más szakterületekhez tartozó elemzésekhez, szakpolitikai forgatókönyvek készítéséhez. A konkrét célkitűzések pedig a következők:

- Épületek reprezentatív felmérésén alapuló hazai lakóépület-állomány tipológia létrehozása, mely alapot jelent „bottom-up” típusú modellezéshez és alkalmas korszerűsítési intézkedések várható hatásainak energetikai és költséghatékonysági vizsgálatára.
- A lakóépület-állomány statisztikai adatainak áttekintése és modellbe való integrálása.
- A lakóépület típusok jelenlegi energiafelhasználásának, és további értékelési indikátorainak meghatározása, azaz az aktuális helyzetkép kialakítása és objektív értékelése.
- Számos szempont mérlegelése alapján a leginkább releváns, bizonyos esetekben épülettípus specifikus felújítási változatok meghatározása és az azokkal elérhető megtakarítások értékelése.
- A meglévő állapot eredményeinek extrapolációja a teljes lakóépület-állományra, és az így kapott eredmények összevetése az energiastatisztikai („top-down”) adatokkal. Az eltérés okainak és az összehasonlítás módszereinek kritikai elemzése.
- Egyes, kiemelten fontos, specifikus kérdések vizsgálata, mint a gépi hűtés meglévő lakóépületekben történő alkalmazásának várható következményei, a biomassza elterjesztésének lehetőségei (a háztartások energetikai célú biomassza igényének összevetése az erdészeti statisztikák szerinti felhasználással) vagy a hőellátás elektrifikációjának hosszú távú kérdései.

A disszertáció terjedelmi korlátai miatt a bemutatásra kerülő kutatási eredményeket le kellett határolni, így azok nem terjednek ki a következőkre:

- A korszerűsítési változatokkal elérhető energetikai hatásokat épülettípusok szintjén, a fajlagos indikátorok meghatározásáig közöltem, ami alapján le tudtam vonni az érdemi következtetéseket. Az országos szintű kivetítéstől terjedelmi okból eltekintettem.

- Kézenfekvő szakpolitikai igényként merülhet fel, hogy prognózisokra is kiterjedjen a vizsgálat. Ilyen korszerűsítési forgatókönyveket azonban nem tartalmaz a disszertáció. Ennek a terjedelmi korlátokon kívül az is oka, hogy az ilyen prognózisok felállításához számos feltételezéssel kell élni (mint az új építési, felújítási és bontási ráták alakulása az elkövetkezendő 30 évben, döntéshozói preferenciák). A disszertációban közölt vizsgálatok a tényadatokon nyugvó területekre korlátozódnak.
- A kutatás több eredménye kívül esik az értekezés témakörén, mint a költséghatékonysági, makrogazdasági és egyéb externális hatások elemzése, a korszerűsítésekkel elérhető belső környezeti minőségre gyakorolt hatások, az ezzel összefüggő egészségre gyakorolt hatások, vagy akár a lakóépület-állomány értékének növekedése, az energiaszegénységre gyakorolt hatások. Ilyen vizsgálatok készültek a bemutatott eredményekre építkezve, részben a szerző közreműködésével [9], [6].

Módszertan

1. Áttekintő

A kutatás folyamatát az 1. ábra foglalja össze. A cél a lakóépület-állomány energetikai állapotáról pillanatfelvétel készítése, valamint egy lakóépületállomány modell létrehozása volt, mellyel különböző korszerűsítési változatok hatásai számíthatók. Az alkalmazott bottom-up modellhez először egy lakóépület tipológia tervezetet hoztam létre, amit a kapcsolódó épülettípusokra vonatkozó statisztikai adatok figyelembe vétele alapján véglegesítettem. Ez a 23 lakóépület típusból álló tipológia képezte a további felmérések és modellezés alapját (1. Melléklet).

Ezután épületkiválasztási szempontrendszer és felmérési módszertant dolgoztam ki, valamint meghatároztam a felmérendő adatok pontos listáját. Előbbinek elsődleges szempontja az épülettípus szerinti és területi reprezentativitás biztosítása volt. A konkrét megyei és típusonkénti felmérési kvótaszámokat Farkas János, a KSH volt munkatársa állította össze. Ezt követte a helyszíni épületállomány felmérés, melynek során 2029 lakóépület került bejárásra, értékelésre. A felmérést független szakértők végezték, akik a felmérési adatokat és eredményeket feltöltötték egy adatbázisba, továbbá elvégezték minden egyes épület energetikai számításait is az általam kidolgozott egységes protokoll szerint.

Az így keletkezett épületadatbázisból típusonkénti célzott adatgyűjtéseket végeztem, melyek alapján egyrészt elvégeztem a lakóépületállomány jelenlegi állapotára vonatkozó energetikai kiértékelését (ezzel definiáltam a referencia eredeti állapotot is, ami későbbi összehasonlítások egyik alapját képezte). Másrészt létrehoztam 23 virtuális modell épületet, melyek a különböző korszerűsítési változatokra vonatkozó további számításaim kiindulópontját képezték.

A 23 épülettípus adatfelvétele tehát mintasokaságon alapult. Meghatároztam becslő jelleggel a valószínűségi paramétereket és illeszkedés vizsgálatokat (próbákat) végeztem, és kiválasztottam a legjobban illeszkedő valószínűségeloszlási függvényt, ami a legkisebb hibával írja le az épülettípusok energiafelhasználási jellemzőit. Mind a felmért állapotra vonatkozó eredmények, mind a modellépületek bemeneti adatai a statisztikai minta eredményhalmazának valószínűségelméleti leírásán alapulnak. A modellezett épülettípusok bemeneti paraméterei és a számított indikátorok az illeszkedésvizsgálatok alapján normális vagy Weibull eloszlást mutatnak. A típust jellemző érték a várható értékkel, spektrumuk a minta szórásával jellemezhető. A sokaság várható értékét minden típusnál a minta átlagával közelítettem.

Meghatároztam - a vizsgálandó korszerűsítési változatokat mérlegelve -, a racionálisan ajánlható és az építési piac által preferált (de nem feltétlenül ajánlható) korszerűsítéseket.

Definiáltam a korszerűsítési opciók között egy referencia korszerűsítést is, mely a későbbi elemzésekben gyakran megjelenik, mint másik viszonyítási pont, az eredeti állapot mellett. A vizsgált korszerűsítések a következő főbb csoportokba sorolhatók:

- referencia szerkezeti felújítás: komplex épületszerkezeti korszerűsítés
- referencia korszerűsítés: komplex épületszerkezeti korszerűsítés, és korszerű, nem megújuló energia alapú hőtermelési móddal (kondenzációs gázkazán vagy távhő),
- biomassza alapú hőtermelés villamos HMV termeléssel vagy napkollektorral kombinálva,
- direkt elektromos hőellátás, épületszerkezeti korszerűsítés nélkül vagy komplex épületszerkezeti korszerűsítéssel kombinálva,
- elektromos hőszivattyús hőellátási módok, komplex épületszerkezeti korszerűsítéssel kombinálva,
- az épületek tetején elhelyezett napelemes villamos áramtermelés,
- az épületek tetején elhelyezett napkollektoros melegvíz előállítás.

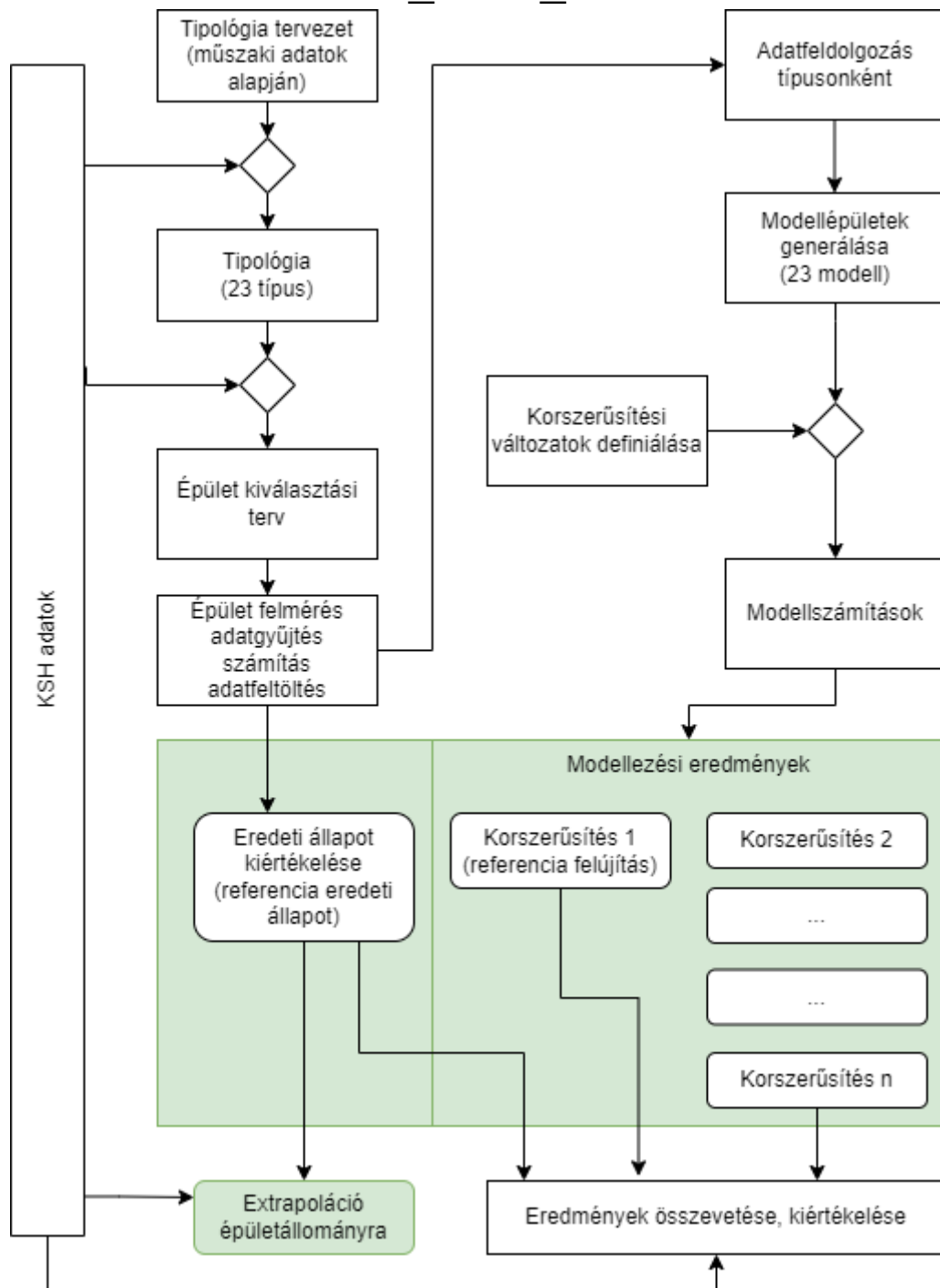
Az egyes modellépületekre elvégzett számítások eredményeit kivetítettem a lakóépületállomány átlagára (illetve általában a családi házakra, kis- és nagytársasházakra külön is), figyelembe véve az egyes épülettípusokhoz tartozó előfordulási gyakoriságot. Az így kapott eredmények arra engednek következtetni, hogy ha a teljes épületállományt az adott műszaki megoldás szerint alakítanánk át, akkor mennyivel változna annak energiafelhasználása. Elsősorban a nem megújuló primer energiára kapott eredményeimet ismertetem, de a számításokat sok esetben elvégeztem végső energiafelhasználásra energiahordozónkénti bontásban, valamint széndioxid emisszióra is.

A felmért épületek eredményei alapján kiértékeltem az eredeti állapotot is, és az eredményeket extrapoláltam országos szintre. Az így kapott aggregált szektoriális szintű energiafelhasználást összevettem az energiasztisztikákra épülő makro adatokkal („top-down” módszer) és elemeztem az eltérés okait. Meghatároztam az effektív prebound hatás mértékét, melynek során figyelembe vettem egy korábbi kutatás eredményét, ahol a szerzők a névleges prebound hatást vizsgálták [10,11].

2. Statisztikai források

A hazai épületállományról a legpontosabb adatok a 2011-es népszámlálási adatbázisból nyerhetők. A népszámlálási kérdőív terjedelmi korlátai miatt azonban viszonylag szűk az az adattartalom, ami az épületállományra vonatkozik. Részletesebb adatok nyerhetők a szintén KSH által évente elvégzett kismintás „Háztartási költségvetési és életkörülmény adatfelvétel” (HKÉF) alapján [12]. Használtam még a 2016-os Mikrocenzus és a rendszeresen frissülő Odyssee adatbázist is, mely uniós szinten egyesíti az energiahatékonysági és széndioxid emisszióra vonatkozó tagállami statisztikai adatokat.

A lakóépület-állomány felújítottsággal kapcsolatban fontos forrásnak bizonyultak még a MEHI megbízásából a Publicus Kft. által 2020-ban végzett reprezentatív felmérés eredményei [5]. Elemzéseim során egy adat felvételekor arra törekedtem, hogy azt a legpontosabb adatbázisból vegyem. Ha ott az nem állt rendelkezésre, akkor szorítkoztam a kismintás adatokra vagy egyéb felmérésekre. Ez indokolja, hogy számos adat a 2011-es Népszámlálás eredményére épül.



1. ábra: Módszertani áttekintő

3. Épületek felmérése

Összesen 2029 lakóépület felmérése történt meg, a felméréshez KEOP-7.9.0/12-2013-0019 projekt [13] biztosította a forrást és a szakértői bázist. A felméréshez protokollt dolgoztam ki. Elsődleges szempont volt, hogy a felmérés épülettípusonként reprezentatív legyen, sőt az is, hogy földrajzi szempontból is megvalósuljon a reprezentativitás. A cél az volt, hogy rétegzett mintavétel történjen, azért, hogy épülettípusonként elegendő darabszámú felmérés valósuljon meg. Így lehetett garantálni, hogy elegendő adat legyen a későbbi épületmodellek

dc_2011_22

létrehozásához. Minden részcsoporthoz (épülettípusok) a sokaság (összes lakóegység) és a minta (felmért 2029 épület) arányának megfelelő számú elem került kiválasztásra. A homogenitást is épülettípusok szerinti rétegzéssel lehetett biztosítani, mert a típusokat meghatározó paramétereket a népszámlálási kérdőív azon információi alapján határoztam meg, amelyek energetikai szempontból legnagyobb jelentőséggel bírnak (az épület lakásszáma, építési éve, falazata, alapterülete). A rétegzés területileg, megyei bontásban is megtörtént.

4. Számítási módszerek

Az épületfelmérések alapján típusonkénti adattáblákat hoztam létre. Az adatokból valamennyi épülettípusra létrehoztam egy szintetikus átlagos épületet. Ez képezte az alapját a modellezett eredeti állapotoknak.

A rendelkezésre álló statisztikai és felmérési adatok pontosságához igazítva és figyelembe véve az elvégzendő számítási esetek nagy számát, szezonális és havi időléptékű számítási módszerek alkalmazását tartottam célszerűnek és kivitelezhetőnek. Ennek megfelelően a modell számításokat a 7/2006 (V.24.) TNM rendelet alapján végeztem [1]. Ez alól kivételt képeznek a nettó hűtési igény számítások, melyek az EN ISO 52016-1 szabványon alapultak [14], tekintettel arra, hogy a nettó hűtési igény számítása a rendeletben [1] nagyon leegyszerűsített. A napkollektorokra és a napelemekre szintén szezonális és havi számítási módszereket alkalmaztam, a felhasználási céltól függően [15].

Új tudományos eredmények, tézisek

Az eredmények rendeltetésszerű épülethasználat és szabványos 72000 hK hőfokhíd mellett érvényesek. A napelemekre vonatkozó számítások a teljes kihasználható tetőfelület figyelembe vétele mellett történtek.

A számszerű eredmények - amennyiben arról a tézis másképp nem rendelkezik -, a magyarországi lakóépület-állomány egészére vagy átlagára vonatkoznak. A 4. tézisben említett módszer más országokra is alkalmazható. A 5-10. tézisekben megfogalmazottakhoz közeli következtetések - a számszaki adatok nélkül -, állapíthatók meg a hasonló épületállománnyal, energiahordozó szerkezettel és klimatikus adottságokkal rendelkező országokra, különös tekintettel a Kelet-Közép Európai régióra.

A) Módszertani keret

1. Tézis: Lakóépület tipológiai mátrix [16–22]

Kidolgoztam egy 23 elemből álló épületenergetikai tipológiai mátrixot (1. Melléklet) a hazai lakóépület-állomány energetikai értékelésére és modellezésére. A tipológiai mátrix elemei szintetikus átlagos tulajdonságú épületek. A szintetikus épület tulajdonságokat statisztikai módszerekkel határoztam meg, így a tipológiai mátrix elemei az épületek energiafogyasztását alapvetően meghatározó jellemzőkkel bírnak.

A szintetikus épületek bemeneti paramétereit statisztikailag szignifikáns darabszámú (2029), reprezentatív módon kiválasztott és szakértők által felmért valós épület tulajdonságai alapján határoztam meg. A felmérésben résztvevő szakértők számára protokollt dolgoztam ki.

B) A magyarországi lakóépületek jelenlegi állapota

2. Tézis: Eredeti állapot értékelése: indikátorok, aggregált energiafelhasználás [16–22]

Meghatároztam lakóépület típus szerinti bontásban az energetikai szempontból releváns fajlagos indikátor értékeket (energiahordozónkénti végső energiaigény, a nem megújuló primerenergiaigény és széndioxid kibocsátás), valamint extrapoláltam az eredményeket a lakóépület-állomány egészére.

Megállapítottam, hogy rendeltetésszerű használat és szabványos 72000 hK hőfokhíd mellett a magyarországi lakóépület-állomány fajlagos nem megújuló primerenergia igénye 390 PJ/év. A teljes energiafelhasználás 90%-ért az 1990 előtt épült épületek felelnek. Az energiafogyasztás túlnyomó része a családi ház (80.5%) állományhoz köthető, amit a nagy társasház (14.7%) és a kis társasház (4.8%) állomány követ. Két épülettípusra jutó hányad különösen nagy (a teljes energiaigény 34%-a): ezek az alapozás nélküli vályogházak (2. típus) és az 1960-1979 között épült téglá, kő vagy kézi falazóelemmel épített családi házak (5. típus).

3. Tézis: Effektív prebound hatás [16,20,22]

Összevettem a „bottom-up” módszerrel meghatározott országos energiafelhasználást az országos energiamérlegből kiadódó értékkel és értékeltem az eltérés okait. A lakóépület szektor egészét jellemző effektív prebound hatás mértékét 26%-ban állapítottam meg, amit csökkenthet a háztartási tűzifa használatra vonatkozó statisztikákból adódó esetleges bizonytalanság.

4. Tézis: Energiahatékonysági skála [9,22,23]

Megállapítottam, hogy a nemzetközi gyakorlatban alkalmazott energiatanúsítási értékelési skálák nem szolgáltatnak információt arról, hogy egy adott épület energiahatékonysága hogyan viszonyul a lakóépület-állomány többi épületének hatékonyságához. Módszert dolgoztam ki olyan hatékonysági skála létrehozására, mely a lakóépületállomány felmérési adatain alapul, és alkalmas ilyen információ szolgáltatására, továbbá figyelembe vesz új épületekre vonatkozó sajátos szempontokat is. Sarokszámokat határoztam meg a magyarországi kategória határok megállapításához a felmérési minta adatai alapján: a lakóépület-állomány leghatékonyabb 15%-ra igaz, hogy $E_P < 153,2 \text{ kWh/m}^2\text{év}$, az állományra vonatkozó átlagérték $E_P = 276,8 \text{ kWh/m}^2\text{év}$, az épületek legkevésbé hatékony 15%-ára pedig $E_P > 476,2 \text{ kWh/m}^2\text{év}$.

C) A korszerűsítés lehetőségei

5. Tézis: Biomassza alapú hőtermelés [16,20–22]

Megvizsgáltam és számszerűsítettem a családi ház állomány biomassza hőtermelésre való átállításának lehetőségeit és értékeltem ennek lehetséges következményeit.

A felmért épületminta elemzése alapján megállapítottam, hogy azon családi házak arányának becsült felső határa, ahol a biomassza alapú hőtermelésnek adottak a logisztikai feltételei (a tűzifa tárolása, szállítása megoldható) 81%. Kistársasházak esetén ez a szám már csak 26%, nagy társasházak esetén pedig a biomassza alig alkalmazható opció, és környezetvédelmi szempontból is aggályos a típusra jellemző sűrű, városias beépítés miatt. Ezért a biomasszára vonatkozó elemzéseimet a családi házakra korlátoztam.

Meghatároztam jellegzetes tűzifa alapú hőtermelőre átállási változatok indikátorait (fajlagos végső és nem megújuló primer energiafelhasználások) épülettípusonként, és súlyozott átlagokat képeztem a teljes családi ház állományra vonatkozóan. A vizsgált esetek a következők voltak: a) szerkezeti felújítás nélkül, korszerűtlen vegyestüzelésű kazán, melegvízellátás villanybojlerrel; b) épületburok felújítás nélkül, korszerű faelgázosító kazán, melegvízellátás villanybojlerrel; c) referencia szerkezeti felújítás, korszerű faelgázosító kazán, melegvízellátás villanybojlerrel; d) épületburok korszerűsítés, korszerű faelgázosító kazán, melegvízellátás napkollektorral.

Megállapítottam, hogy az épületburok korszerűsítése nélküli a) és b) változatok országos szinten a biomassza felhasználás drasztikus növekedését eredményeznék vagy az illegális fakitermelés és hulladékégetés mértékének növekedésével kellene számolni. Csak az épületburok korszerűsítésével kombinált (c) és d) változatok) biomassza tüzelés esetén biztosítható, hogy a jelenlegi biomassza igények nem növekednek tovább (kismértékű csökkenés realizálható).

Megállapítottam, hogy a hivatalos erdészeti statisztikákból adódó, egyéb fogyasztók (erőművi, fűtőművi, ipari és egyéb) energiaigényének levonása után a háztartásokra maradó érték nagyságrendileg kisebb, mint a „bottom-up” módszerrel számított igény.

6. Tézis: Napenergia hasznosítás [22,24–27]

Meghatároztam a lakóépület-állományra vonatkozó napenergia hasznosítási potenciált - a hasznos tetőfelületek figyelembe vételével -, napkollektoros használati melegvíz előállításra és napelemes villamos energiatermelésre.

Megállapítottam, hogy energiahatékonysági korszerűsítés nélkül a nem megújuló primer energiaigény átlagosan legfeljebb $(E_P - E_{P,eredeti}) / E_{P,eredeti} = -25\%$ -os mértékben változik tetőn elhelyezett aktív napenergia hasznosító rendszerek hatására (napelemekkel vagy napkollektorokkal).

Referencia korszerűsítéssel kombinálva ez az érték $(E_P - E_{P,ref}) / E_{P,ref} = -76\%$ -ra javítható.

Megállapítottam, hogy családi házakra és kis társasházakra a napelemekkel számottevően nagyobb nem megújuló primer energiaigény csökkenés érhető el, mint kollektorokkal (energiahatékonysági korszerűsítés nélkül típustól függően az elérhető változás napelemekre: 13. típusra $(E_P - E_{P,eredeti}) / E_{P,eredeti} = -7\%$, többi típusra $-16\% \dots -46\%$; napkollektorokra: $-2 \dots -12\%$). Nagy társasházak esetén viszont közel azonos megtakarítás prognosztizálható (napelemekre a változás: $-2 \dots 9\%$, napkollektorokra: $-2 \dots 8\%$).

Korszerűsített állapotban több családi háztípus esetén elérhető (1., 2., 5., 7. típusok), vagy megközelíthető a nulla primerenergiaigény éves mérlegben (a típustól függő E_P változás családi házakra napelemekre $(E_P - E_{P,ref}) / E_{P,ref} = -62 \dots -171\%$), míg nagy társasházak esetén a termelés csak az igények kis részének fedezésére lehet elegendő (nagy társasházakra napelemekre $-8 \dots -25\%$).

(A tézisben közölt eredmények éves energiamérleg szemlélet szerint kerültek meghatározásra.)

7. Tézis: Hőtermelés elektrifikációja [16,22,28]

Megvizsgáltam a lakóépület-állomány átlagára vonatkoztatva, hogy a lakóépületek fűtésének és melegvízellátásának villamos hőellátásra való átállítása milyen mértékben módosítja az indikátorokat az eredeti állapothoz viszonyítva.

Megállapítottam, hogy szerkezeti felújítás nélküli esetben a direkt villamos hőtermelés a nem megújuló primer energiafelhasználás $(E_P - E_{P,eredeti}) / E_{P,eredeti} = +80\%$ -os átlagos változását eredményezi, vagyis jelentős növekedés várható. Ha levegő-víz rendszerű hőszivattyút alkalmazunk, akkor a változás -54% -os, azaz csökkenés érhető el.

Ha referencia szerkezeti felújítással társul a direkt elektromos hőtermelés, akkor a nem megújuló primer energiafelhasználás változása $(E_P - E_{P,eredeti}) / E_{P,eredeti} = -43\%$. Ha referencia szerkezeti felújítással hőszivattyú társul, akkor a nem megújuló primer energiafelhasználás változása -80% . A referencia korszerűsítéshez képest csak ez a vizsgált lehetőség ad kedvezőbb eredményt $((E_P - E_{P,ref}) / E_{P,ref} = -66\%)$.

(A megállapítások hálózati villamos energia alkalmazásakor, gépi hűtés nélküli esetben érvényesek.)

8. Tézis: Gépi hűtés [16,22,28]

Megállapítottam, hogy gépi hűtés lakóépületekben való általános alkalmazása esetén árnyékolók nélküli esetben, egyéb korszerűsítés nélkül nem számottevően, átlagosan $(E_{P,eredeti+hűtés}-E_{P,eredeti})/E_{P,eredeti}=+3,5\%$ -os mértékben változik a nem megújuló primer energiafelhasználás a hűtés nélküli esethez képest. Árnyékolók alkalmazásával a gépi hűtés elhanyagolható mértékű E_P növekedést okoz.

Referencia korszerűsítéssel kombinálva nagyobb mértékben, $(E_{P,ref+hűtés}-E_{P,ref})/E_{P,ref}=+19\%$ -kal változik a nem megújuló primer energiafelhasználás a hűtés nélküli esethez képest. Árnyékolókat is alkalmazva a változás mértéke $+1,3\%$. A fajlagos hűtési energiaigények az épületek méretével szignifikánsan növekednek, illetve az újabb épület típusokra magasabb hűtési igény jellemző. Általában, ahol a transzmisszió szerepe nagyobb, ott kisebb hűtési hőigény várható.

Megállapítottam, hogy az épületburok energetikai felújítása a hűtési igények növekedését okozza. Ugyanakkor a változás mértéke jóval kisebb (átlagosan kevesebb, mint $E_{hű,ref}-E_{hű,eredeti}=+8,9 \text{ kWh/m}^2\text{év}$), mint a fűtési energiaigények csökkenése (átlagos változás: $E_{f,ref}-E_{f,eredeti}=-191 \text{ kWh/m}^2\text{év}$) nem megújuló primer energiában kifejezve, tehát a burrok felújítás összességében célszerű. (A számok referencia korszerűsítésre vonatkoznak árnyékolók alkalmazása nélkül.)

9. Tézis: Elektrifikáció és napelemek együttes alkalmazása [16,22,24–31]

Meghatároztam különböző elektromos hőellátási módokat, hogy milyen mértékben lehet kiváltani a nem megújuló primerenergiafelhasználást.

Referencia szerkezeti felújítás, árnyékolás nélkül: Eredeti állapotban a nem megújuló primerenergia felhasználás változása a napelemek hatására éves energia mérleg szemléletben legfeljebb

$$\frac{(E_{P,eredeti+napelem} + E_{h\acute{a}ztart\acute{a}si}) - (E_{P,eredeti} + E_{h\acute{a}ztart\acute{a}si})}{E_{P,eredeti} + E_{h\acute{a}ztart\acute{a}si}} = -21\%$$

(havi energia mérleg szemléletben -16%).

Direkt elektromos hőellátásra átállás esetén a változás

$$\frac{(E_{P,eredeti+direkt+napelem} + E_{h\acute{a}ztart\acute{a}si}) - (E_{P,eredeti+direkt} + E_{h\acute{a}ztart\acute{a}si})}{E_{P,eredeti+direkt} + E_{h\acute{a}ztart\acute{a}si}} = -13\%$$

(havi energia mérleg szemléletben: -10%),

levegő-víz hőszivattyúra átállás esetén pedig

$$\frac{(E_{P,eredeti+direkt+napelem} + E_{h\acute{a}ztart\acute{a}si}) - (E_{P,eredeti+direkt} + E_{h\acute{a}ztart\acute{a}si})}{E_{P,eredeti+direkt} + E_{h\acute{a}ztart\acute{a}si}} = -37\%$$

(havi energia mérleg szemléletben: -25%).

Árnyékolással kombinált referencia szerkezeti felújítás: Referencia korszerűsítés esetén éves napenergia mérleg szemléletben a változás mértéke a napelemek hatására legfeljebb

$$\frac{(E_{P,ref+\acute{a}rny+napelem} + E_{h\acute{a}ztart\acute{a}si}) - (E_{P,ref} + E_{h\acute{a}ztart\acute{a}si})}{E_{P,ref} + E_{h\acute{a}ztart\acute{a}si}} = -48\%$$

(havi energia mérleg szemléletben: -36%).

Direkt elektromos hőellátásra átállás esetén a változás

$$\frac{(E_{P,ref+árny+direkt+napelem} + E_{háztartási}) - (E_{P,ref+árny+direkt} + E_{háztartási})}{E_{P,ref+árny+direkt} + E_{háztartási}} = -33\%$$

(havi energia mérleg szemléletben: -26%),

levegő-víz hőszivattyúra átállás esetén pedig

$$\frac{(E_{P,ref+árny+hősziv+napelem} + E_{háztartási}) - (E_{P,ref+árny+hősziv} + E_{háztartási})}{E_{P,ref+árny+hősziv} + E_{háztartási}} = -64\%$$

(havi energia mérleg szemléletben: -39%).

Társasházak esetén az éves és a havi szemléletben végzett számítás azonos eredményt ad. Családi házak esetén viszont a havi mérlegszemléletű számítással számottevően (23%-kal) kisebb hasznosítható energia mennyiség adódik, mint éves mérlegszemléletű számítással. A lakóépületállomány átlagát tekintve a havi mérlegben végzett számítás 22%-kal alacsonyabb nem megújuló primerenergiafelhasználás csökkenést eredményez, mint az éves szemléletű. A különbség nő az épületek energiahatékonyságának javításával, a vizsgált esetek közül a legmagasabb érték a referencia szerkezeti felújítással kombinált hőszivattyús változat esetén adódott (39%). Az éves mérleg szerint számított kiváltott energia akkor realizálható, ha azt a tarifarendszer támogatja, ami túlmutat az épületek szintjén, azt alapvetően hálózatüzemeltetési szempontok határozzák meg.

10. Tézis: Helyben termelhető megújuló energia hasznosítás lehetőségei [16,22,24–30]

Legfeljebb egy megújuló energiára épülő technológia alkalmazásának esete:

Épülettípusonként megvizsgáltam, hogy a helyben termelt, legfeljebb egy megújuló energiára épülő technológia alkalmazásával milyen mértékű nem megújuló primer energiamegtakarítás realizálható, referencia szerkezeti felújítás mellett. Megállapítottam, hogy a helyben termelt megújuló energiára épülő rendszerekkel a referencia korszerűsítéshez képest legfeljebb 40%-os megtakarítási érték az, ami valamennyi épülettípus esetén elérhető (napenergia hasznosítást éves és havi mérleg szemléletben figyelembe véve egyaránt).

Ennél magasabb érték egyes épülettípusok (18. és 19. típus) esetén nem realizálható. Egynél több technológia együttes alkalmazása esetén jelentős költségtöbblettel kell számolni.

A lakóépület-állomány átlagát tekintve a legnagyobb megtakarítási potenciál a tetőkre telepített napelemekhez tartozik (havi energiamérleg szemlélet esetén $(E_P - E_{P,ref}) / E_{P,ref} = -50\%$). Valamennyi családi háztípusra a napelem, valamennyi társasház típusra a hőszivattyú adja a legnagyobb megtakarítást. Ha minden épülettípus esetén a legjobb eredményt adó megoldást alkalmazzuk, akkor átlagosan $(E_P - E_{P,ref}) / E_{P,ref} = -73\%$ -os (havi energiamérleg szemlélet elszámolás esetén $(E_P - E_{P,ref}) / E_{P,ref} = -62\%$) változás realizálható.

A csökkenés mértéke családi háztípusok esetén számottevően magasabb (típustól függően éves és havi energiamérleg szemlélet elszámolás esetén egyaránt $(E_P - E_{P,ref}) / E_{P,ref} = -62\% \dots -100\%$, a legmérsékeltebb kiváltás értékek a 8. és a 10. típushoz tartoznak), köszönhetően a nagy potenciális energiagyűjtő tetőfelületnek.

Kétféle megújuló energiára épülő technológia alkalmazásának esete:

Ha kétféle megújuló energiát hasznosító rendszert alkalmazunk, akkor a hőszivattyú és a napelem kombinációja adja a legjobb eredményt.

Ha a napelemek mellett még egy megújuló energia is alkalmazásra kerül, akkor - a háztartási energiafogyasztást nem számítva -, a nettó nem megújuló primer energiafelhasználású

épületállomány éves energiamérleg szemléletben elérhető (éves: $E_P = -16 \text{ kWh/m}^2\text{év}$), de havi mérlegek szempontjából nem (havi: $E_P = +15 \text{ kWh/m}^2\text{év}$).

A nem megújuló primer energia relatív változása önmagában alkalmas és elégséges mutató mind energiahatékonysági, mind megújuló energiát hasznosító intézkedések hasznosságának értékelésére. Ezzel szemben a megújuló részarány önmagában nem alkalmas erre a célra, sőt félrevezető lehet.

Hivatkozások

- [1] 7/2006. (V. 24.) TNM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról, (2006).
- [2] European Green Deal, (n.d.). https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en.
- [3] Paris Agreement, (2015). <https://www.un.org/en/climatechange/paris-agreement>.
- [4] Hungarian Central Statistical Office (KSH), Dwelling data in Hungary, (2020).
- [5] I. Szécsi, Z. Koritár, A. Pálffy, F. Dr. Sáfián, Hazai felújítási hullám, 2021.
- [6] L. Koltai, T. Szabó, K. Tóth, A. Varró, A legrosszabb energiahatékonyságú hazai lakóépületek felújításának gazdasági és társadalmi hatásai, Budapest, 2021.
- [7] K. Korytarova, Energy efficiency potential for space heating in Hungarian public buildings. Towards a low-carbon economy., Central European University, 2010.
- [8] A. Novikova, Carbon dioxide mitigation potential in the Hungarian residential sector, Budapest, 2008.
- [9] K. Severnyák, T. Csoknyai, Lakóépületek energiahatékonysága, Budapest, 2021. <http://mnbprogram.bme.hu/lakoepuletek-energiagatekonysaga/>.
- [10] G. Gróf, K. Tihanyi, Prebound és rebound hatás-Az energiahatékonysági fejlesztések eredményeinek korlátozódása, Budapest, 2021. http://mnbprogram.bme.hu/wp-content/uploads/2021/10/2_2_1_Tanulmany_Prebound_es_rebound_hatas.pdf.
- [11] G. Gróf, B. Janky, A. Bethlendi, Limits of household's energy efficiency improvements and its consequence – A case study for Hungary, Energy Policy. 168 (2022) 113078. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113078>.
- [12] Háztartási költségvetési és életkörülmény adatfelvétel (HKÉF), (n.d.). <https://www.ksh.hu/eletmod>.
- [13] KEOP-7.9.0/12-2013-0019/2020, Költségvetési szervek kezelésében álló épületek energiahatékonysági felújítását szolgáló 2014-2020. évi fejlesztési program és akcióterv kidolgozása és a lakossági épület energiahatékonysági potenciál felmérése, Budapest, 2015.
- [14] Épületek energetikai teljesítőképessége. Fűtési és hűtési energiaigények, belső hőmérséklet, valamint az érzékelhető és rejtett hőterhelés 1. rész: Számítási eljárások, 2017.
- [15] M. Horváth, Adott felületre érkező globálsugárzás számítása, rendszerszintű hasznosítása épületekben, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, 2016.
- [16] T. Csoknyai, S. Hrabovszky-Horváth, Z. Georgiev, M. Jovanovic-Popovic, B. Stankovic, O. Villatoro, G. Szendrő, Building stock characteristics and energy performance of residential buildings in Eastern-European countries, Energy and Buildings. 132 (2016) 39–52. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.062>.
- [17] T. Csoknyai, S. Hrabovszky-Horváth, M. Seprődi-Egeresi, G. Szendrő, National Typology of Residential Buildings in Hungary, Budapest, 2014.

http://episcopo.eu/fileadmin/tabula/public/docs/brochure/HU_TABULA_TypologyBrochure_BME.pdf.

- [18] S. Hrabovszky-Horváth, T. Pálvölgyi, T. Csoknyai, A. Talamon, Generalized residential building typology for urban climate change mitigation and adaptation strategies: The case of Hungary, *Energy and Buildings*. 62 (2013) 475–485. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.03.011>.
- [19] T. Csoknyai, Building typology for modeling the Hungarian Building Stock, Preliminary Study for the National Building Energy Strategy (Épülettípológia a hazai lakóépület-állomány energetikai modellezéséhez, Megalapozó tanulmány a Nemzeti Épületenergetikai Stratégiához, Budapest, 2013.
- [20] A. Novikova, T. Csoknyai, Z. Szalay, Low carbon scenarios for higher thermal comfort in the residential building sector of South Eastern Europe, *Energy Efficiency*. (2018). <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9604-6>.
- [21] A. Novikova, T. Csoknyai, M.J. Popović, B. Stanković, Z. Szalay, Assessment of decarbonisation scenarios for the residential buildings of Serbia, *Thermal Science*. 2018 (2018) 1231–1247. <https://doi.org/10.2298/TSCI171221229N>.
- [22] T. Csoknyai, A magyarországi lakóépület állomány energetikai elemzése épülettípológián alapuló modellezéssel, *Magyar Épületgépészet*. LXXI (2022) 3–10.
- [23] T. Csoknyai, Z. Szalay, A. Zöld, M. Horváth, B. Nagy, N. Balázs, E. Barna, A.-T. Balázs, R. Goda, Z. Szánthó, Az épületek energetikai jellemzői meghatározásának módszertana, (2020).
- [24] M. Horváth, D. Kassai-Szoó, T. Csoknyai, Solar energy potential of roofs on urban level based on building typology, *Energy and Buildings*. 111 (2016) 278–289. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.031>.
- [25] M. Horváth, T. Csoknyai, Correlation analysis of tilted and horizontal photovoltaic panel’s electricity generation and horizontal global radiation, *Idojaras*. 120 (2016) 255–264.
- [26] M. Horváth, T. Csoknyai, Simplified calculation method of annual incoming solar energy on tilted and oriented surfaces for the Carpathian basin, *Thermal Science*. 2018 (2018) 977–988. <https://doi.org/10.2298/TSCI170525120H>.
- [27] M. Horváth, T. Csoknyai, Maximal and Optimal DHW Production with Solar Collectors for Single Family Houses, in: 7th International Symposium on Exploitation of Renewable Energy Sources and Efficiency Conference, Subotica, 2015: pp. 59–64.
- [28] L. Czétány, V. Vámos, M. Horváth, Z. Szalay, A. Mota-Babiloni, Z. Deme-Bélafi, T. Csoknyai, Development of electricity consumption profiles of residential buildings based on smart meter data clustering, *Energy and Buildings*. 252 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111376>.
- [29] I. Csoknyai, T. Csoknyai, A HMV hő- és vízfogyasztás vizsgálata panelépületeknél, *Magyar Épületgépészet*. 63 (2014) 19–21.
- [30] M. Horváth, S. Hrabovszky-Horváth, T. Csoknyai, Parametric analysis of solar hot water production in “commi-block” buildings, in: 5th International Youth Conference on Energy (IYCE) 2015, IEEE, Pisa, 2015: pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/IYCE.2015.7180769>.
- [31] T. Csoknyai, J. Legardeur, A. Abi Akle, M. Horváth, Analysis of energy consumption profiles in residential buildings and impact assessment of a serious game on occupants’ behavior, *Energy and Buildings*. 196 (2019) 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.05.009>.

1. Melléklet: Lakóépületek tipológiai mátrixa

	épülettípus	építési idő	falazat
1.	családi vagy sorház (1-3 lakás)		vályog alapozással
2.	családi vagy sorház (1-3 lakás)		vályog alapozás nélkül
3.	családi vagy sorház (1-3 lakás)	-1944	tégla, kő, kézi falazóelem
4.	családi vagy sorház (1-3 lakás)	1945-1959	tégla, kő, kézi falazóelem
5.	családi vagy sorház (1-3 lakás), kicsi	1960-1979	tégla, kő, kézi falazóelem
6.	családi vagy sorház (1-3 lakás), nagy	1960-1979	tégla, kő, kézi falazóelem
7.	családi vagy sorház (1-3 lakás), kicsi	1980-1989	tégla, kő, kézi falazóelem
8.	családi vagy sorház (1-3 lakás), nagy	1980-1989	tégla, kő, kézi falazóelem
9.	családi vagy sorház (1-3 lakás), kicsi	1990-2005	tégla, kő, kézi falazóelem
10.	családi vagy sorház (1-3 lakás), nagy	1990-2005	tégla, kő, kézi falazóelem
11.	családi vagy sorház (1-3 lakás), kicsi	2006-	tégla, kő, kézi falazóelem
12.	családi vagy sorház (1-3 lakás), nagy	2006-	tégla, kő, kézi falazóelem
13.	társasház 4-9 lakással	-1945	tégla, kő, kézi falazóelem
14.	társasház 4-9 lakással	1945-1989	tégla, kő, kézi falazóelem
15.	társasház 4-9 lakással	1990-2005	tégla, kő, kézi falazóelem
16.	társasház 4-9 lakással	2006-	tégla, kő, kézi falazóelem
17.	társasház 10 vagy több lakással	-1944	tégla, kő, kézi falazóelem
18.	társasház 10 vagy több lakással	1945-1989	tégla, kő, kézi falazóelem
19.	társasház 10 vagy több lakással		közép-vagy nagyblokk, öntött beton
20.	társasház 10 vagy több lakással	-1979	panel
21.	társasház 10 vagy több lakással	1980-1989	panel
22.	társasház 10 vagy több lakással	1990-2005	tégla, kő, kézi falazóelem
23.	társasház 10 vagy több lakással	2006-	tégla, kő, kézi falazóelem

(kicsi: 120 m² hasznos alapterület alatti, nagy: 120 m² hasznos alapterületű vagy nagyobb)