

Konzulensek:

dr.Szalay Zsuzsa, egyetemi docens

Szagri Dóra, doktorandusz

FONYÓDI SÁRA

Építőanyagok és Magasépítés Tanszék

PANELÉPÜLETEK FELÚJÍTÁSÁNAK HATÁSA AZ ERENGIAFOGYASZTÁSRA ÉS A NYÁRI TÚLMELEGEDÉSRE

TDK dolgozat 2024

Tartalomjegyzék:

Ábrajegyzék	2
Táblázatjegyzék	3
Absztrakt.....	4
Summary	5
1 Bevezetés.....	6
2 Szakirodalmi áttekintés	8
2.1 Klímaváltozás, hőhullámok.....	8
2.1.1 Klímaváltozás.....	8
2.1.2 Hőhullámok Magyarországon.....	9
2.1.3 Hőhullámok Budapesten	10
2.1.4 Előrejelzések.....	11
2.2 Szakpolitikai áttekintés.....	12
2.3 Hőkomfort	13
2.3.1 ASHRAE 55	13
2.3.2 CEN Standard Adaptive módszerek.....	16
2.4 Panelépületek energiacsökkentése felújítással.....	18
2.5 Épületek felújításának támogatása optimalizációs eljárással	20
3 Módszertan	22
3.1 Vizsgált épület bemutatása	22
3.2 Dinamikus szimuláció	22
3.2.1 Zónák kialakítása	23
3.2.2 Klímaadatok.....	24
3.2.3 Rétegrendek:	24
3.2.4 Világítás:	25
3.2.5 Fűtés és melegvíz fogyasztás.....	25
4 Eredmények.....	26
4.1 Meglévő épület eredményei	26
4.2 Érzékenység vizsgálat	28
4.2.1 Vizsgálat:.....	29
4.2.2 Eredmény:	31
4.3 Optimalizáció.....	34
4.3.1 Beállítások:	37
4.3.2 Eredmények.....	37
4.4 További vizsgálatok	43
4.5 Összehasonlítás eredmények:.....	44

5	Összefoglalás és megállapítások	46
	Köszönetnyilvánítás.....	47
	Irodalomjegyzék	48

Ábrajegyzék

1. ábra: Éves hőmérsékletváltozás különböző kutatócsoportok mérései alapján [15]	8
2. ábra: Hőmérsékletváltozás 1951-1980-hoz viszonyítva globális szinten[15]	8
3. ábra: A trópusi és a tartós hóhullámos napok országos átlaga 1901 és 2016 között [16]	9
4. ábra: Hóhullámos napok számának változása 1981 és 2021 között [17]	10
5. ábra : A hóhullámos napok éves számának országos átlaga 1901 és 2021 között [17]	10
6. ábra: Trópusi éjszakák éves száma 1901-2021 között Budapest-belterület állomáson [17]	10
7. ábra: A hőségnapok ($T_{max} \geq 30\text{ }^{\circ}\text{C}$) éves számának változása 2021-2050-ben és 2071- 2100-ben az ALADIN5.2 és a REMO modellszimulációk eredményei alapján az 1971-2000 referencia időszakhoz viszonyítva [18]	11
8. ábra: A nyári napok ($T_{max} > 25\text{ }^{\circ}\text{C}$) éves számának változása 2021-2050-ben és 2071- 2100-ben az ALADIN5.2 és a REMO modellszimulációk eredményei alapján az 1971-2000 referencia-időszakhoz viszonyítva [18]	11
9. ábra: Megjósolt százalékos elégedetlenség (PPD) az előrejelzett átlagos hőérzet (PMV) függvényeként [19]	14
10. ábra: Elfogadható operatív hőmérséklet és nedvességtartalom tartomány amik megfelelnek a kritériumoknak [19]	15
11. ábra: Elfogadható operatív hőmérséklet és nedvességtartalom tartomány télen [20]	15
12. ábra: Elfogadható operatív hőmérséklet és nedvességtartalom tartomány nyáron [20] .	16
13. ábra: Alapértelmezett tervezési értékek a beltéri operatív hőmérséklethez mechanikus hűtéssel nem rendelkező épületek esetén [21]	17
14. ábra: A 3FOG épülettípus éghajlatváltozási potenciál és a vizsgált időpontok (2020,2060,2090)[22].....	19
15. ábra: A vizsgált épület	22
16. ábra: A vizsgált épület szimulációs modellje.....	23
17. ábra: Zónák kialakítása az 1. 7. és 10. szinten.....	24
18. ábra: Összevont zónák kialakítása egy szinten.....	24
19. ábra Mért külső hőmérséklet és relatív páratartalom [30]	24
20. ábra: Éves távfűtés szimulációs görbéje	27

21. ábra: Levegő hőmérséklet, sugárzási hőmérséklet, operatív hőmérséklet	28
22. ábra: Levegő hőmérséklete az 1. a 7. és a 10. szinten	28
23. ábra: Az opciók valószínűségi eloszlása	30
24. ábra: A változók csökkenő fontossági sorrendben	32
25. ábra: A diszkomfortos órák gyakoriságának eloszlása	32
26. ábra: Az épület energiafogyasztásának gyakoriság eloszlása	32
27. ábra: A változók csökkenő fontossági sorrendben	32
28. ábra: A változók kiválasztása az optimalizációhoz fontosságuk alapján [31]	33
29. ábra: Az evolúciós genetikus algoritmus folyamatábrája a DesignBuilder programban [34]	36
30. ábra: Optimalizáció eredmények	38
31. ábra: Optimalizáció eredménye a szigetelés vastagságának eloszlása szerint	39
32. ábra: Optimalizáció eredménye a árnyékoló fajtájának függvényében	40
33. ábra: Optimalizáció eredménye a nyílászáró fajtájának függvényében	41
34. ábra: Optimalizáció eredménye az árnyékvető szerkezet méretének függvényében.....	41
35. ábra: Pareto front az árnyékvető szerkezet méretének eloszlása szerint	42
36. ábra: Világítás fajta.....	43
37. ábra: Lapostető rétegrend	44
38. ábra: Fűtés beállítás	45
39. ábra: Jövő klímamodellek a 2050-ben és 2100-ben az iparodoodás előtti szinthez viszonyított sugárzási kényszer függvényében	45
40. ábra: Hőmérsékletek összehasonítása felújítás előtt és után.....	46

Táblázatjegyzék

1. táblázat: Operatív hőmérséklet korrekciós tényezők a légsebesség függvényében [21].....	18
2. táblázat: Rétegrendek	25
3. táblázat: Hőátbocsátási tényezők	25
4. táblázat: A szimuláció során kapott értékek összehasonlítása a számlán lévő értékekkel .	27
5. táblázat: Tervezési változók mátrixa	29
6. táblázat: A változók kiválasztása	34
7. táblázat: Szimulációs idők összehasonlítása [32]	35
8. táblázat: Tervezési változók mátrixa optimalizációhoz.....	37
9. táblázat: Optimális megoldások	43

Absztrakt

A hazai lakóépületállomány jelentős energiafelhasználása miatt szükségzerű a rendkívül széles körben elterjedt panellakások korszerűsítése, energetikai felújítása. Nyáron a klímaváltozás miatt egyre gyakoribb hőhullámok miatt az emberek komfortérzete nagyon lecsökken, ezért is egyre nagyobb az igény ezeknek az épületeknek a modernizálására.

A dolgozat keretein belül megvizsgáltam a témában fellelhető szakirodalmat, illetve egy tipikus panelépületet tanulmányoztam dinamikus épületszimulációval. Rendelkezésre állt az épület átlagos éves fogyasztása, ezen belül a melegvíz és fűtési célra használt távhő fogyasztás értékei. A szimulációs modellt a valós fogyasztás szerint kalibráltam majd különböző épületszerkezeti felújítási alternatívákat vizsgáltam és hasonlítottam össze. Optimalizációs eljárás, valamint érzékenységvizsgálat segítségével tanulmányoztam, hogy melyek a leghatékonyabb módszerek az épület felújítására. Elemeztem, hogy mennyivel csökkenthető az épület üvegházhatású gázkibocsátása, és a felújítás mennyire befolyásolja a lakók komfortérzetét. Megvizsgáltam, hogy csak passzív módszerekkel lehetséges-e visszaszorítani az épület nyári túlmelegedését.

Az eredmények segítségével felújítási javaslatok adhatók, mely nem csupán a lakók számára hoz közvetlen előnyöket, hanem a környezetre és a jövőre nézve is pozitív hatást gyakorol. Az energiahatékonyság növelése hozzájárul a klímaváltozás elleni küzdelemhez, miközben javítja az épületek állapotát és élettartamát. A korszerűsítés tehát kulcsfontosságú a fenntartható városfejlődés szempontjából, így minden szinten elősegíti egy élhetőbb jövő megteremtését.

Summary

Due to the high energy consumption of the building stock, the energy retrofit of the widespread prefabricated concrete ('panel') multi-family buildings is necessary in Hungary. In the summer, the increasing frequency of heat waves due to climate change is causing a severe loss of comfort for people, which is also increasing the need for building modernisation.

In this research, I examined the state-of-the-art and studied a typical panel building using dynamic building energy simulation. The average annual consumption of the building was available, including values for hot water and space heating consumption. The simulation model was calibrated according to the real consumption and different building design retrofit alternatives were investigated and compared. I used an optimization procedure and sensitivity analysis to study the most efficient methods for building renovation. I analysed how much the greenhouse gas emissions of the building could be reduced and how this would affect the comfort of the occupants. I examined whether passive methods alone could reduce the overheating of the building in summer.

The results can be used to give recommendations for retrofits that will not only bring direct benefits to the occupants, but also have a positive impact on the environment and the future. Increasing energy efficiency contributes to the fight against climate change while improving the condition and lifetime of buildings. Modernisation is therefore key to sustainable urban development, helping to create a more liveable future at all levels.

1 Bevezetés

A klímaváltozás egy összetett és sürgető probléma, amelyet elsősorban az emberi tevékenységek, különösen az üvegházhatású gázkibocsátás okoz [35].

Az építőipar is nagy szerepet játszik a klímaváltozásban, ugyanis az Európai Unió teljes energia-felhasználásának a 40%-áért, az üvegházhatást okozó gázok kibocsátásának 36%-áért az épületek felelősek [1]. Az összes kitermelt anyag 50%-át teszi ki, hulladéktermelésének több mint 35%-áért felelős. Az anyagkitermelésből, az építési termékek gyártásából, valamint az épületek építéséből és felújításából származó üvegházhatású gázok kibocsátását a teljes országos üvegházkibocsátás 5-12%-ára becsülik. A nagyobb anyaghatékonyság a kibocsátás 80%-át takaríthatja meg [2].

A lakóépületek energiafelhasználásának 64 %-a helyiségfűtésre fordítódik (Magyarországon: 71%), ezt követik a világítás és elektromos berendezések (EU: 15%, Magyarország: 11%), majd a HMV ellátás (EU: 14%, Magyarország: 13%), a főzés (EU: 6,4%, Magyarország: 5,0%), és a hűtés (EU: 0,4%, Magyarország: 0,2%). A helyiségűtés energiaigénye a statisztikák szerint ugyan csekély, de értéke folyamatosan növekszik [3].

Magyarországon az elmúlt 20 év átlagában évente kevesebb, mint 24.000 lakás épült. 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 nyílászárócserék 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 [3].

Magyarországon a 4 millió 65 ezer lakásból 837 ezer található lakótelepeken, ebből 772 ezer lakott, és a lakótelepi lakásokban közel 1,9 millió ember él. Budapest 121 lakótelepén 260 ezer lakásban mintegy 622 ezer ember él. A megyei jogú városokban még a budapestinél is magasabb arányokat találunk, mivel a lakások 43,3%-a van lakótelepi környezetben. A lakótelepi lakásoknak ugyanakkor csak körülbelül 62%-a, összesen 517 ezer lakás épült házigyári paneles technológiával. Jelenleg a lakosság 13,8 %-a él ilyen lakásokban [4].

A panelházak építése a világon a második világháború utáni időszakban kezdődött Európában. Az első ilyen lakásépítési programok célja a gyors és költséghatékony lakásellátás volt, hogy enyhítsék a háború okozta lakáshiányt. Különösen a Szovjetunióban és Európában vált népszerűvé ez a technológia, mivel a nagy népsűrűségű városokban gyorsan kellett nagy mennyiségű lakást építeni [6].

Magyarországon a panelházak építése az 1960-as évek elején indult meg, és egészen az 1980-as évek végéig folytatódott. Az első nagyobb lakásépítési programot 1961-ben indították el, amelynek célja 15 év alatt egymillió lakás építése volt, ebből mintegy 550 ezer készült el panellakásként. A program keretében nemcsak Budapesten, hanem vidéki nagyvárosokban is épültek lakótelepek, mint Miskolc, Szeged, Pécs, Győr, és kisebb településeken, például Siófokon és Szentesen is. Az 1990-es évekre a panelépítkezések lezárultak, de Magyarországon a 30 év alatt közel 788 ezer panellakás épült, amelyek ma is jelentős szerepet játszanak a lakáspiacon [7].

A panelos épületek nagy része mára mind fizikailag elavult, ezért korszerűsítésre szorul. Bár az épületek tartószerkezeteinek várható élettartama meghaladhatja a száz évet, számos, a megfelelő használathoz szükséges eleme élettartama végéhez közeledik. Az ablakszerkezeteket, az épületgépészeti rendszerek, -szerelvények nagy részét harminc évre méretezték, a hőszigetelések is elöregedtek, a lapostetőkön gyakori a beázás. A szerkezetek gyakran erősen megrongálódtak, a külső betonrétegen gyakori a repedezés, leválás. A külső szerkezetek épületfizikai és hővédelmi tulajdonságai a nyolcvanas évek előtt épült épületeknél különösen rosszak, aminek eredménye a magas hőfelhasználás. A külső nyílászárók elöregedtek, huzatosak, ezért mindenképpen javításra, vagy inkább cserére szorulnak. A panelépületekre jellemzőek a magas fűtési költségek is, ennek oka nagyrészt a nagy csomóponti hőveszteség és a helyi szabályozás hiánya, mely gyakran túlfűtést eredményez. Az épületben gyakoriak a hőérzeti problémák. Télen a rosszul szabályozott fűtési rendszerekkel csak úgy lehet biztosítani az előírt 20 °C hőmérsékletet, hogy a lakások nagy részében túlfűtés keletkezik. A nyári hőérzeti problémák még kellemetlenebbek, különösen a felső szintű lakásokban, ahol a lapos tető rendkívüli mértékben felmelegedhet. A panelek korszerűsítése folyamatos, például hőszigeteléssel és nyílászárók cseréjével, de még így is nagy számban találhatók felújítatlan épületek [8].

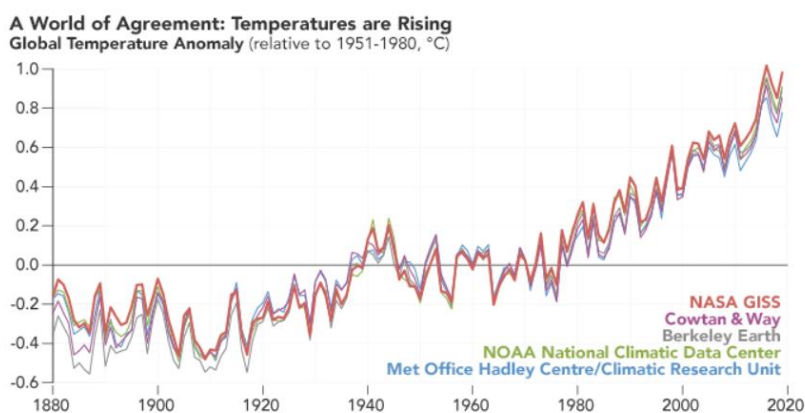
A dolgozat célja a panelépületek vonatkozó optimális felújítási stratégiák keresése, amely során az energiatakarékosság, a nyári túlmelegedés csökkentése és a komfortérzet javítása áll a középpontban.

2 Szakirodalmi áttekintés

2.1 Klímaváltozás, hőhullámok

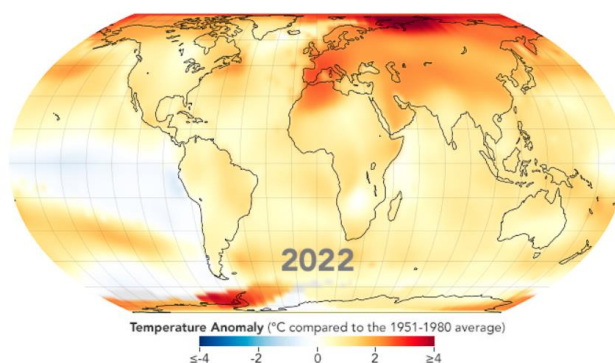
2.1.1 Klímaváltozás

A klímaváltozás kutatásának területén számos vizsgálat és felmérés készült, azonban ezek között jelentős módszertani különbségek tapasztalhatók. Az alábbi vonaldiagram [1. ábra] az éves hőmérsékletváltozásokat mutatja 1880 és 2020 között a különböző kutatócsoportok vizsgálata szerint. Bár évről évre vannak eltérések, mind az öt felmérés egymással szinkronban mutatja a csúcsokat és a völgyeket. Mindegyik gyors felmelegedést mutat az elmúlt néhány évtizedben, és mindegyik az elmúlt évtizedet mutatja a legmelegebbnek [15].



1. ábra: Éves hőmérsékletváltozás különböző kutatócsoportok mérései alapján [15]

A NASA által készített 2. ábra alapján egyértelműen megfigyelhető, hogy a hőmérséklet-emelkedés nem egyenletes a Földön; egyes területeken akár 5°C-os növekedés, máshol pedig 2°C-os csökkenés is tapasztalható. Érzékelhető még hogy Európa kimondottan veszélyeztetett a felmelegedés szempontjából.



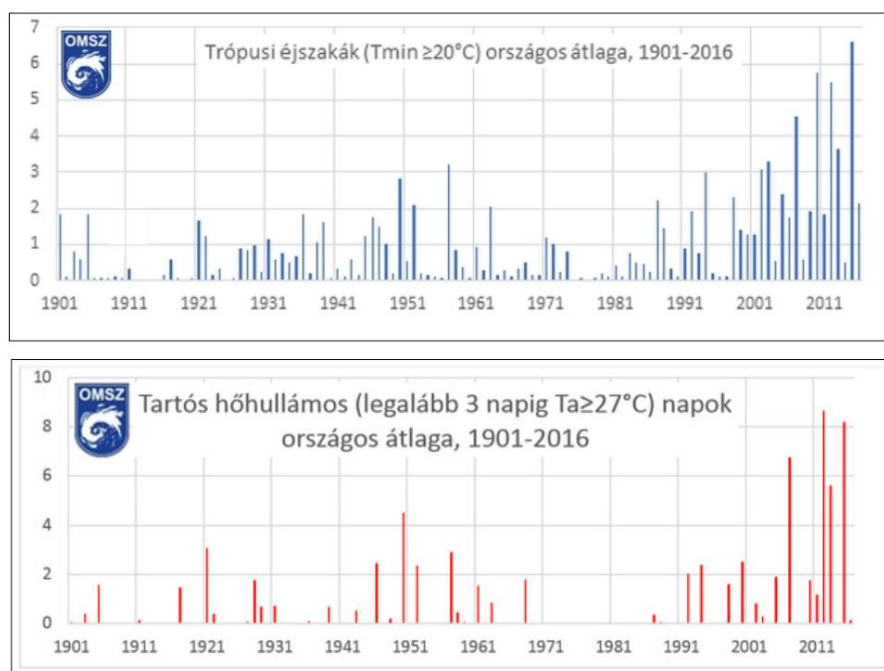
2. ábra: Hőmérsékletváltozás 1951-1980-hoz viszonyítva globális szinten [15]

2.1.2 Hőhullámok Magyarországon

A klímaváltozás miatt jelentősen megemelkedett a hőhullámos napok száma Magyarországon. Ezen kívül növekedett a trópusi éjszakák száma és a tartós hőhullámos napok száma is [16]. Ezt jól szemlélteti a 3. ábra.

Az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) az alábbi módon definiálja a forró nap, trópusi éjszaka, a hőhullámos nap és a tartós hőhullámos nap fogalmát [16]:

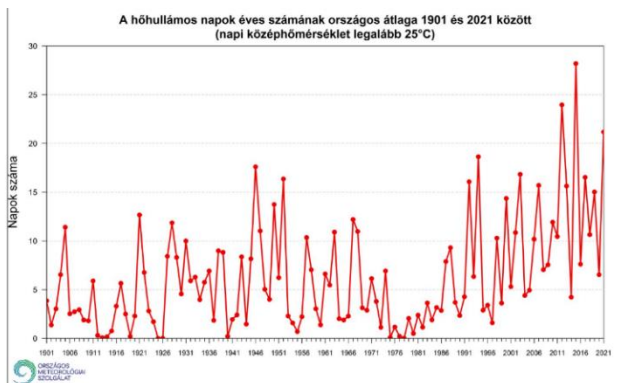
- Forró nap: napi maximumhőmérséklet $\geq 35\text{ °C}$
- Trópusi éjszaka: napi minimumhőmérséklet $\geq 20\text{ °C}$
- Hőhullámos nap: napi középhőmérséklet $\geq 25\text{ °C}$ (hőségriasztás első fokozata)
- Tartós hőhullámos nap: legalább három napig a középhőmérsékletet $\geq 27\text{ °C}$ (a korábban alkalmazott hőségriasztás harmadik fokozata)



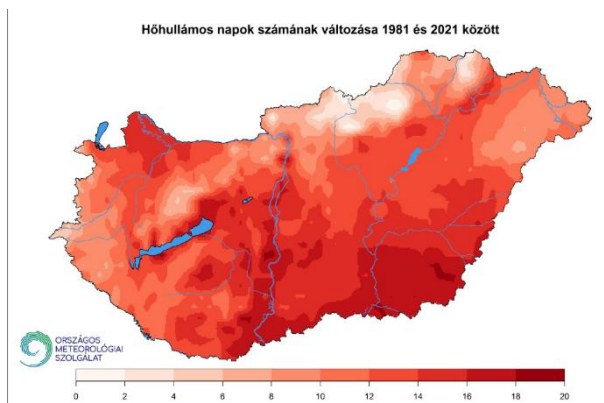
3. ábra: A trópusi és a tartós hőhullámos napok országos átlaga 1901 és 2016 között [16]

Az 5. ábra szemlélteti a hőhullámos napok országos átlagát a 20.század elejétől. 1901 óta több mint 7 nappal nőtt a hőhullámos napok száma lineáris trenddel becsülve [17].

Hasonlóképpen a 4. ábra is a hőhullámos napok jellemzésére szolgál, de egy rövidebb, 1981-ben kezdődő és 2021-ig tartó időszakra. Az ábrán jó kirajzolódik a domborzat hatása, a középhegységeinkben alacsonyabb hőmérsékleti értékek jellemzőek, így kevésbé növekedett a hőhullámos napok száma ezekben a régiókban.



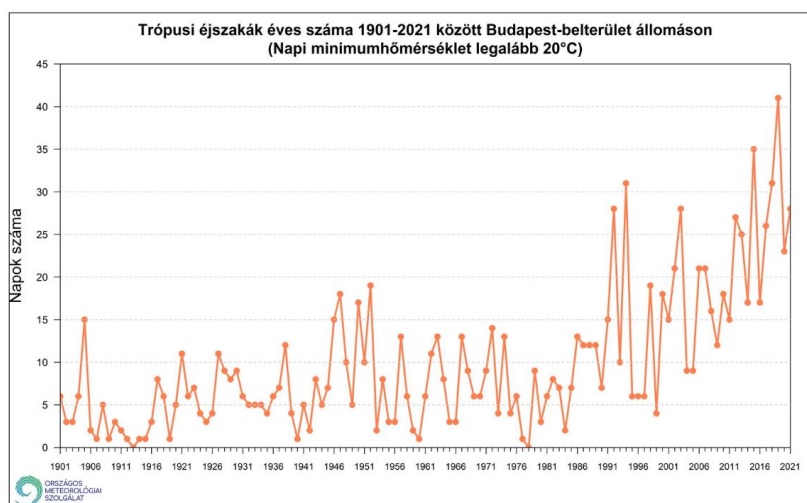
5. ábra : A hőhullámos napok éves számának országos átlaga 1901 és 2021 között [17]



4. ábra: Hőhullámos napok számának változása 1981 és 2021 között [17]

2.1.3 Hőhullámok Budapesten

A városi hősziget hatás miatt Budapesten még inkább jelentős a felmelegedés és annak a következményei, különösen a nyári hőhullámok idején. A város központi területein, ahol sűrű a beépítés, a levegő hőmérséklete akár 4-8°C-kal is magasabb lehet éjszaka, mint a külső, zöldőbb városrészekben vagy a vidéken [36]. Ez a jelenség azért következik be, mert az épületek, az aszfaltozott utak és a burkolt felületek sokkal több hőt tárolnak és bocsátanak ki, mint a természetes talajfelületek, például a parkok vagy erdők. A nagyobb hőtároló tömeg miatt este is nehezebben hűl le a levegő, aminek köszönhetően jelentősen megnő a trópusi éjszakák száma Budapesten. Ezeken az éjszakákon a nyugodt pihenés sem biztosított és fokozott egészségügyi kockázattal jár, ami főleg az idősebb korosztályt érinti. A 6. ábra szemlélteti a trópusi éjszakák számának a megnövekedését.



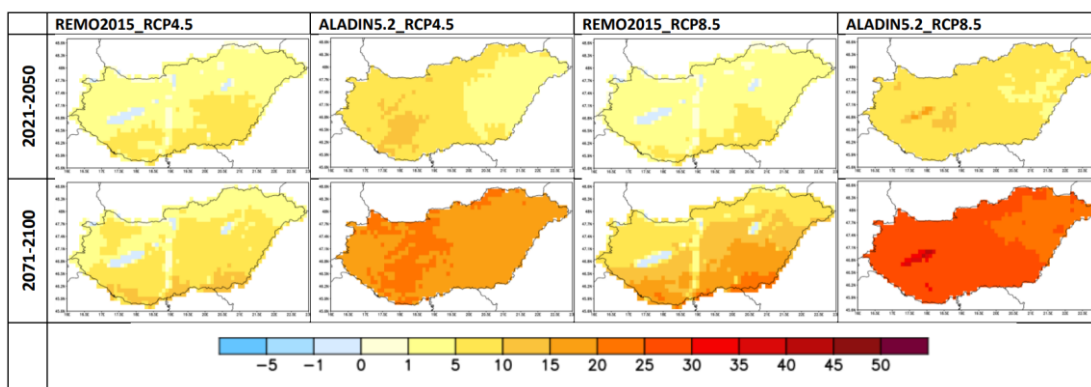
6. ábra: Trópusi éjszakák éves száma 1901-2021 között Budapest-belterület állomáson [17]

2.1.4 Előrejelzések

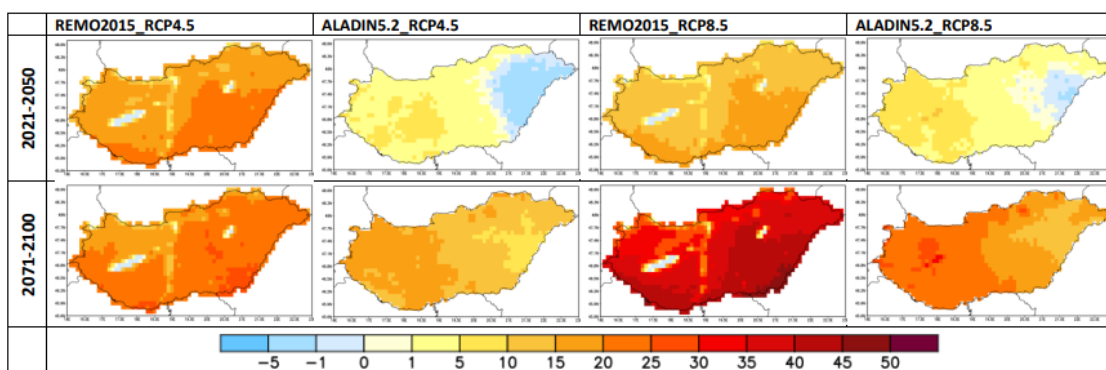
Magyarországon az éghajlatváltozás hatásának feltérképezését a KlímAdat projekt végezte regionális klímamodell-szimulációk elvégzésével és reprezentatív fejlesztésével. A szimulációk során két regionális klímamodell, az ALADIN-Climate 5.2 és a REMO 2015 modellt alkalmazták Magyarország jövőbeli éghajlati viszonyainak előrejelzésére. Ezeket a modelleket a globális éghajlati modellek (GCM) eredményei alapján futtatták, figyelembe véve különböző kibocsátási forgatókönyveket, mint az RCP4.5 (mérsékelt üvegházhatású gáz-kibocsátás) és az RCP8.5 (magas kibocsátás). A modellszimulációk 10 km-es térbeli felbontásúak voltak, ami lehetővé tette a részletes helyi éghajlati viszonyok elemzését.

A 2021-2050-es időszakra az ALADIN és REMO modellek szerint a hőségnapok száma 9-23 nappal növekedhet [7. ábra]. A nyári napok száma 21-23 nappal emelkedhet [8. ábra]. A 2071-2100-as időszakban a hőségnapok száma akár 34-47 nappal is növekedhet [7. ábra], míg a nyári napok száma 41-45 nappal lesz több [8. ábra]. Ezek alapján a nyarak jelentősen forróbbak lesznek, ami komoly alkalmazkodási kihívást jelent [18].

- Nyári napok száma: napi maximumhőmérséklet $>25^{\circ}\text{C}$
- Hőségnapok száma: napi maximumhőmérséklet $\geq 30^{\circ}\text{C}$



7. ábra: A hőségnapok ($T_{\max} \geq 30^{\circ}\text{C}$) éves számának változása 2021-2050-ben és 2071-2100-ban az ALADIN5.2 és a REMO modellszimulációk eredményei alapján az 1971-2000 referencia időszakhoz viszonyítva [18]



8. ábra: A nyári napok ($T_{\max} > 25^{\circ}\text{C}$) éves számának változása 2021-2050-ben és 2071-2100-ban az ALADIN5.2 és a REMO modellszimulációk eredményei alapján az 1971-2000 referencia-időszakhoz viszonyítva [18]

2.2 Szakpolitikai áttekintés

2015-ben írták alá a Párizsi megállapodást, amely globális szinten kötelezte az országokat arra, hogy erőfeszítéseket tegyenek a klímaváltozás mérséklésére, konkrét célkitűzéssel a globális átlaghőmérséklet-emelkedés 1,5–2°C-ra történő korlátozására az iparosodás előtti szintekhez képest [9].

A Párizsi Megállapodás következtében az EU meghatározta az ún. Európai Zöld Megállapodást (European Green Deal), amely a klímasemlegességet 2050-re tűzte ki célul [10].

Az EU Fit for 55 csomag közvetlen folytatása ennek a stratégiának. A „Fit for 55” csomag célja, hogy az EU 2030-ra teljesítse az üvegházhatású gázok kibocsátásának 55%-os csökkentését, ami a Zöld Megállapodás egy mérőköve [11]. A 2024/1275 irányelv pedig ezen belül konkrétan az épületek energiahatékonyságának javítására vonatkozó intézkedések révén segíti az EU-t a Párizsi Megállapodás és a Zöld Megállapodás céljainak elérésében.

Az EU már évtizedek óta foglalkozik az épületek energiahatékonyságának kérdésével. Az első jelentős lépés az EPBD (Energy Performance of Building Directive) 2002-ben történt, amely először szabályozta az energiahatékonysági követelményeket és az energiahatékonysági tanúsítványokat. 2010-ben, majd 2018-ban további módosításokat vezettek be, hogy még szigorúbb energiahatékonysági szabványokat határozzanak meg [14].

Az Európai Unió 2024/1275 irányelve az épületek energiahatékonyságának növelését célozza meg, hozzájárulva az EU azon törekvéséhez, hogy 2050-re klímasemleges legyen. A stratégiának az alapelvei hogy csökkentsék a CO₂ kibocsátást, növeljék az energia hatékonyságot, biztosítsák a megfizethető építkezést, és minél nagyobb arányban hasznosítsák újra az építőanyagokat. További cél az épületek ellenállóképességének növelése az éghajlatváltozás miatt [12].

Az épületek energia-teljesítményéről szóló felülvizsgált irányelv kettéosztja a lakó és a nem lakó épületek kezelését. A tagállamoknak nemzeti épületfelújítási terveket kell meghatározni annak érdekében, hogy a lakóépületek primer energia fogyasztását 2030-ig 16%-kal, 2035-ig pedig 20-22%-kal csökkentsék. A legrosszabb teljesítményű épületek 16%-át, 2030-ig 26%-át 2033-ig kell felújítani [13].

Magyarországnak, mint Uniós tagállamnak meg kell felelnie ezeknek az előírásoknak, ezért is nagyon fontos az épületeink üvegházhatású gázkibocsátásának csökkentése.

2.3 Hőkomfort

A hőkomfort egy szubjektív érzés, amely azt fejezi ki, hogy az emberek elégedettek-e a környezeti hőmérsékleti viszonyokkal. Mivel minden ember eltérő fiziológiai és pszichológiai tulajdonságokkal rendelkezik, nehéz teljes mértékben kielégíteni minden egyes személyt.

2.3.1 ASHRAE 55

Az ANSI/ASHRAE 55-2004 szabvány pontos iránymutatásokat nyújt a hőkomfort eléréséhez és fenntartásához különféle beltéri környezetben, figyelembe véve a különböző környezeti és személyes tényezőket. A szabvány azokat a feltételeket írja le, amelyek biztosítják, hogy az emberek többsége megfelelően komfortos hőérzetet éljen át egy adott térben [19].

A szabvány hat fő tényezőt határoz meg amelyek befolyásolják a hőkomfortot:

-Személyes tényezők:

- anyagcsere sebessége: az emberek anyagcsere sebessége eltérő és függ az aktivitási szinttől. Az ASHRAE 55 táblázatot ad az anyagcsere sebességéről különféle tevékenységekhez. Egyes általános értékek: 0,7 met az alvásnál, 1,0 met az ülő és csendes testhelyzetnél, 1,2–1,4 met az álló helyzetben, 2,0 met vagy több olyan tevékenységeknél, amelyek mozgással, gyaloglással, nehéz terhek emelésével vagy gépek kezelésével járnak.
- ruházat: az ember által viselt ruházat mennyisége jelentősen befolyásolja a hőkomfortot. A ruházat csökkenti a test hőveszteségét és szigetelésként szolgál. Mértékegysége a clo. A tipikus téli öltözet clo értéke 1, a tipikus nyári öltözet clo értéke 0,5.

-Környezeti tényezők:

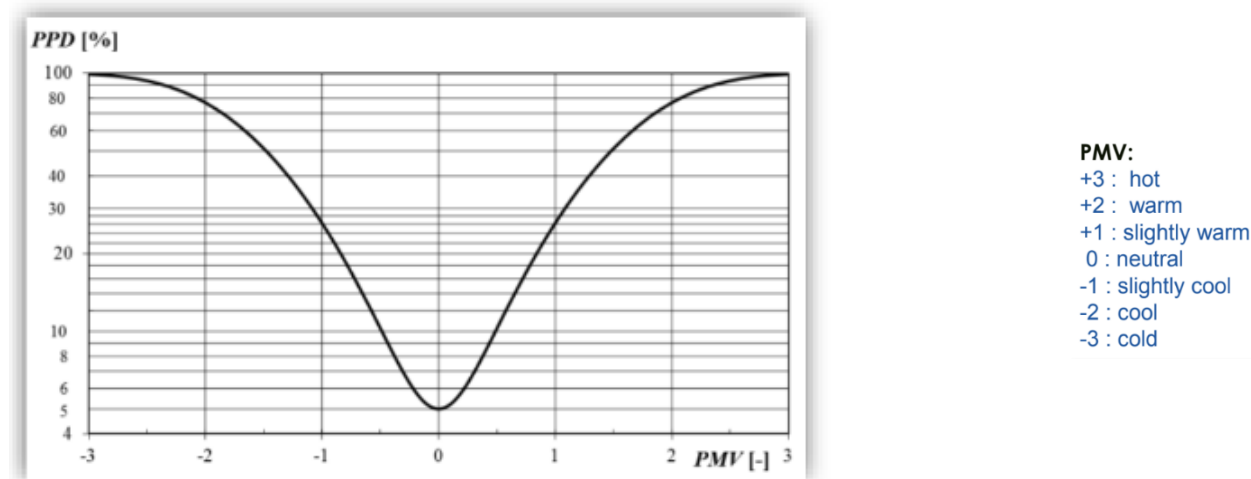
- levegő hőmérséklete: a lakót körülvevő levegő átlagos hőmérséklete.
- átlagos sugárzási hőmérséklet: A környező felületek hőmérséklete, amely sugárzó hőt bocsát ki.
- levegő sebessége: a levegő mozgása a bőrön segíthet lehűteni a forró napon azáltal, hogy gyorsabban eltávolítja a testhőt.
- relatív pártartalom: a levegő nedvességtartalma. Az izzadás egy hatékony hőveszteség mechanizmus, amely a bőrből történő párolgáson alapul. Magas relatív páratartalom mellett azonban a levegőben közel van a maximálisan befogadható vízgőz, így a párolgás, és ezáltal a hőveszteség is csökken. A beltéri páratartalom javasolt szintje 30-60% között van.

A szabvány két módszert nyújt a komfortzóna meghatározására. A számítógépes modellezés során figyelembe veszi a különböző környezeti tényezőket és személyes paramétereket. Az alábbi indexeket használja:

- PMV (Predicted mean vote): Ez az index az emberek átlagos hőérzetét adja meg egy hétfokozatú skálán, amely a nagyon hideg és a nagyon meleg érzéstől a semleges hőérzetig terjed. A komfortos hőérzet -0,5 és + 0,5 PMV között van.
- PPD (Predicted percentage of dissatisfied): Ez az index mutatja meg, hogy a lakók hány százaléka lesz elégedetlen a megadott hőmérsékleti feltételekkel. A PPD-t a PMV-ből származtatja az alábbi képlet segítségével: $PPD = 100 - 95 \cdot e^{(-0,0335 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2)}$

[9. ábra]

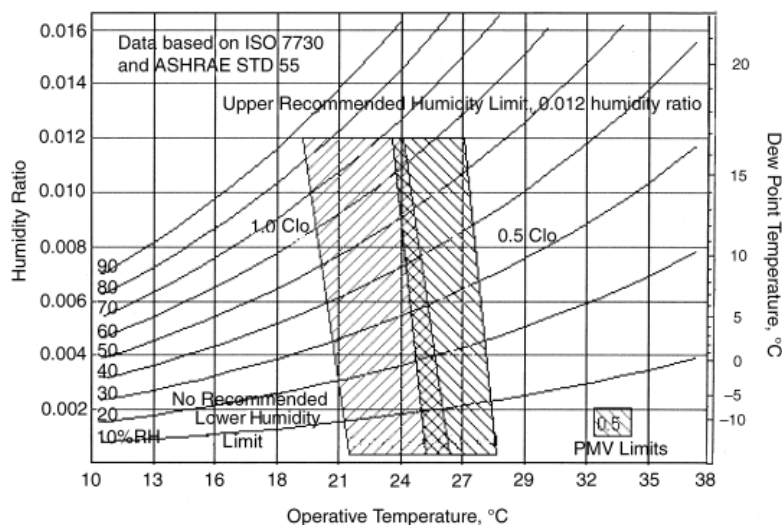
A hőmérséklet komfortos, ha $PPD < 10$.



9. ábra: Megjósolt százalékos elégedetlenség (PPD) az előrejelzett átlagos hőérzet (PMV) függvényeként [19]

A másik módszer a komfortzóna meghatározásához a grafikus módszer. A 10. ábrán látható grafikon alapján lehet meghatározni a komfortos hőmérsékletet. A ferde vonallal kitöltött rész jelöli az emberek számára kellemes hőmérsékletet. A ruházat értékének 0,5 és 1 között kell lennie. A vízszintes tengelyen az operatív hőmérséklet szerepel, aminek a tartományát lineáris interpolációval határozták meg a 0,5 Clo és 1,0 Clo határértékek között. Az operatív hőmérséklet a levegő hőmérsékletének és az átlagos sugárzási hőmérséklet kombinációja. A függőleges tengelyen a levegő nedvességtartalma található. Az ajánlott levegő maximum nedvességtartalom 0,012. Az ábrát csak akkor lehet használni, ha a metabolikus ráta 1-1,3 között mozog. A 0.20 m/s-nál nagyobb levegősebességnél növelhetjük az operatív

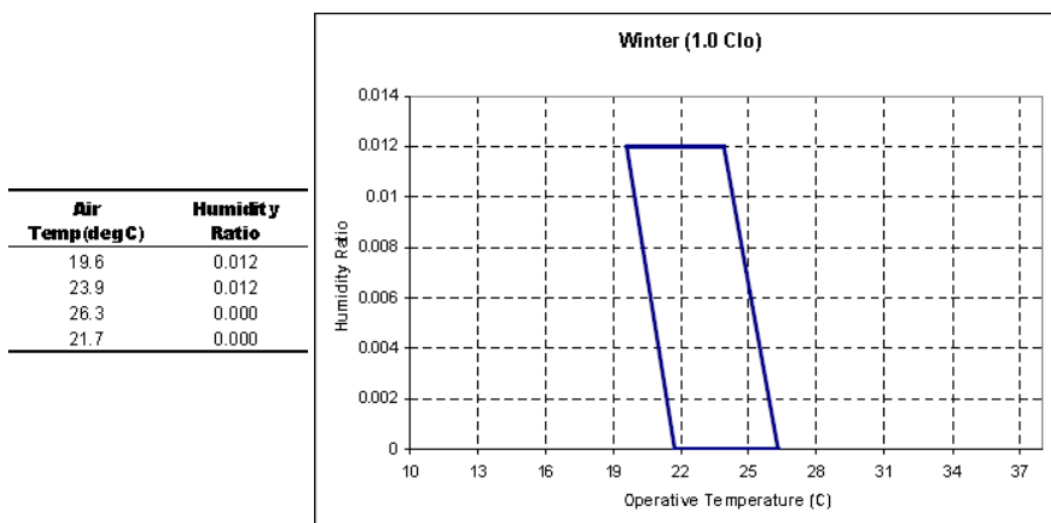
hőmérséklet felső határát. A növelő tényezőt a szabvány egy másik táblázat alapján határozza meg.



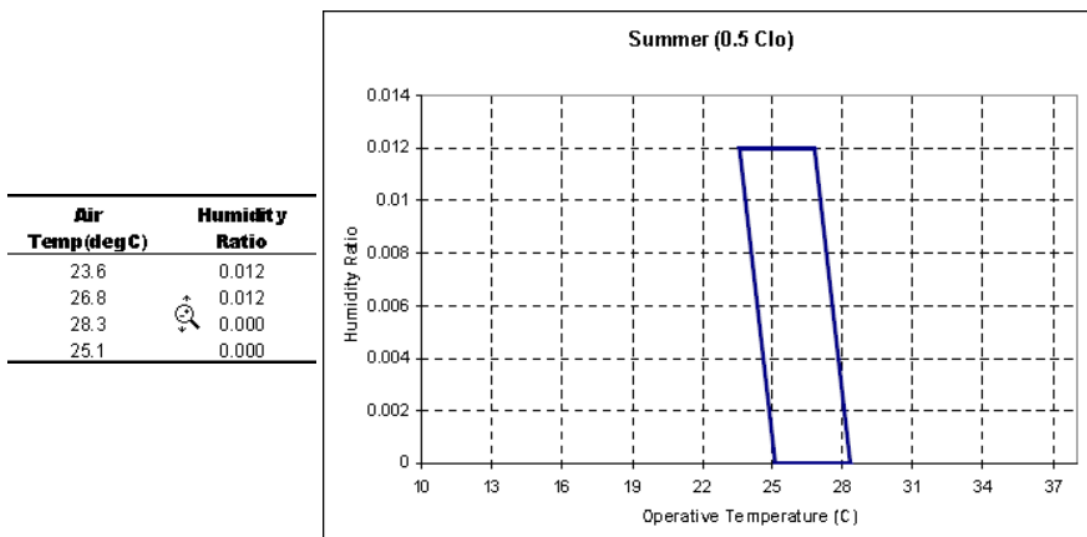
10. ábra: Elfogadható operatív hőmérséklet és nedvességtartalom tartomány amik megfelelnek a kritériumoknak [19]

Egyszerűsített ASHRAE 55:

A DesignBuilder dinamikus szimulációs szoftver többféle komfort analízist kínál. Ezek közül az egyik a Simplified ASHRAE 55-2004. Ez az elemzés leegyszerűsíti az eredeti ASHRAE 55 szabványt. Az operatív hőmérsékletet a levegő és az átlagos sugárzási hőmérséklet átlagának veszi. Nyáron a 0,5 ruházat szintet használ, télen 1-et. A 11. ábrán látható a leegyszerűsített grafikon téli időszakban, a 12. ábrán a leegyszerűsített grafikon a nyári időszakban [20].



11. ábra: Elfogadható operatív hőmérséklet és nedvességtartalom tartomány télen [20]



12. ábra: Elfogadható operatív hőmérséklet és nedvességtartalom tartomány nyáron [20]

2.3.2 CEN Standard Adaptive módszerek

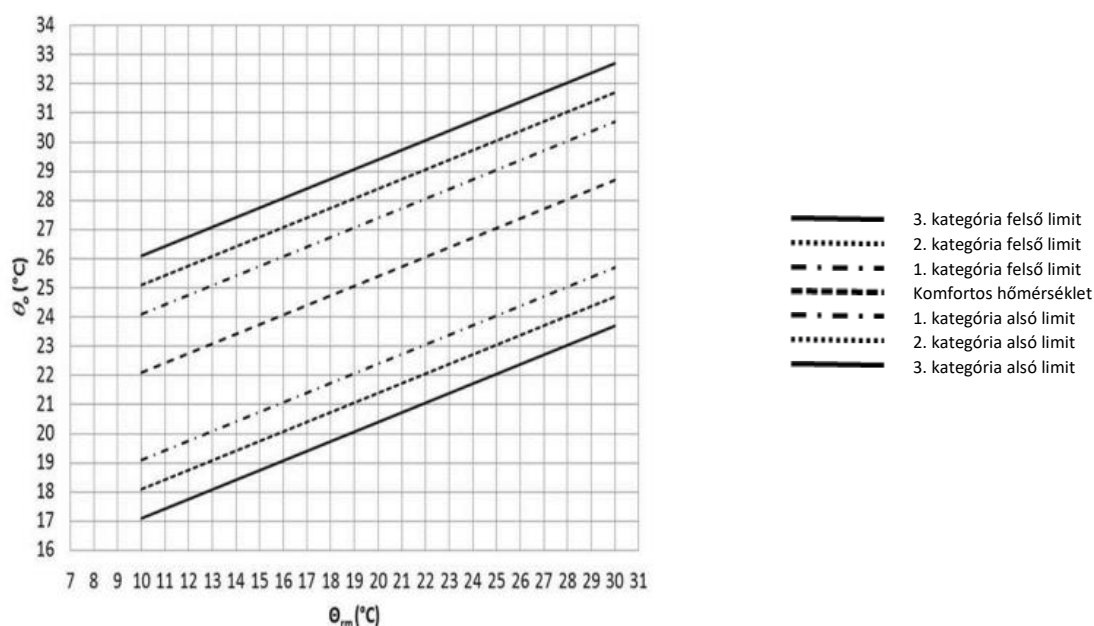
Az MSZ EN 16798-1:2019 szabvány a diszkomfortos hőmérsékletet több kategóriára osztja, amelyek célja a beltéri hőmérsékleti komfort biztosítása különböző épülettípusokban és évszakokban. A CEN 1 kategória a legmagasabb komfortszint elérését célozza meg, szigorú operatív hőmérsékleti tartományokkal. Ennek a kategóriának a választása biztosítja a hőkomfort optimalizálását a felhasználók számára olyan helyiségekben, ahol nagy jelentősége van a stabil hőmérsékletnek és a komfortérzet maximalizálásának [21].

Téli időszak operatív hőmérsékleti határértékei:

Az operatív hőmérséklet optimális tartományait a helyiség és az évszak határozza meg. Egy lakóépületben azok a helyiségekben amit élettérként használunk, mint a nappali, konyha, hálósoba, a minimum téli hőmérséklet $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ lehet, közelítőleg $1,0$ ruhaszintet feltételezve. Ezen helyiségekben a szabvány ülő tevékenységet feltételez, ami közelítőleg $1,2$ metabolikus rátának felel meg. A további helyiségekben, mint a raktár, mosókonyha, a minimum téli hőmérséklet $18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Ezekben a helyiségekben a szabvány álló-sétáló tevékenységet feltételez, ami közelítőleg $1,5$ metabolikus rátának felel meg.

Nyári időszak operatív hőmérsékleti tartományok és adaptív kritériumok alkalmazása:

A nyári, tavaszi és őszi időszakban azokban az épületekben amik nem rendelkeznek mechanikus hűtő rendszerrel a 13. ábra szerinti adaptív kritériumoknak kell megfelelnie a belső hőmérsékletnek. Az adaptív hőmérsékleti kritériumok lehetővé teszik az operatív hőmérséklet szezonális változását az aktuális külső hőmérséklet függvényében. Az adaptív hőkomfort megközelítés azokban az épületekben releváns, ahol az ablakok vagy más természetes szellőztetési eszközök révén a beltéri hőmérséklet dinamikusan követi a külső hőmérsékleti változásokat.



13. ábra: Alapértelmezett tervezési értékek a beltéri operatív hőmérséklethez mechanikus hűtéssel nem rendelkező épületek esetén [21]

A 13. ábrán az y tengely a belső operatív hőmérsékletet jelenti, az x tengely a napi átlagos külső levegő hőmérsékletének súlyozott átlaga látható. A szabvány a külső hőmérséklet növekedésével megengedi a komfortzónák eltolását, feltételezve hogy az ember alkalmazkodik a magasabb hőmérsékleti viszonyokhoz.

További diszkomfort tényezők:

A szabvány kitér azokra a további tényezőkre is, amelyek a hőkomfortérzet csökkenését okozhatják. Ilyen például a légsebesség ami télen maximum 0,1 m/s, nyáron 0,12 m/s lehet. A hőmérsékleti különbség a fej és boka magassága között maximum 3K (kelvin) lehet. A hőmérséklet különbséget 1,1 és 0,1 méterrel a padló felett kell mérni. A padló felületi hőmérséklet tartománya 19-29 C° között kell legyen.

Belső operatív hőmérséklet korrekciós tényezője a légsebesség függvényében:

Nyári komfortkörülmények között, amikor a beltéri üzemi hőmérséklet $> 25\text{ °C}$, a mesterségesen megnövelt légsebesség kompenzálja a megnövekedett léghőmérsékletet az 1. táblázat szerint.

Average Air Speed (v_a) 0,6 m/s	Average Air Speed (v_a) 0,9 m/s	Average Air Speed (v_a) 1,2 m/s
1,2 °C	1,8 °C	2,2 °C

1. táblázat: Operatív hőmérséklet korrekciós tényezők a légsebesség függvényében [21]

2.4 Panelépületek energiacsökkentése felújítással

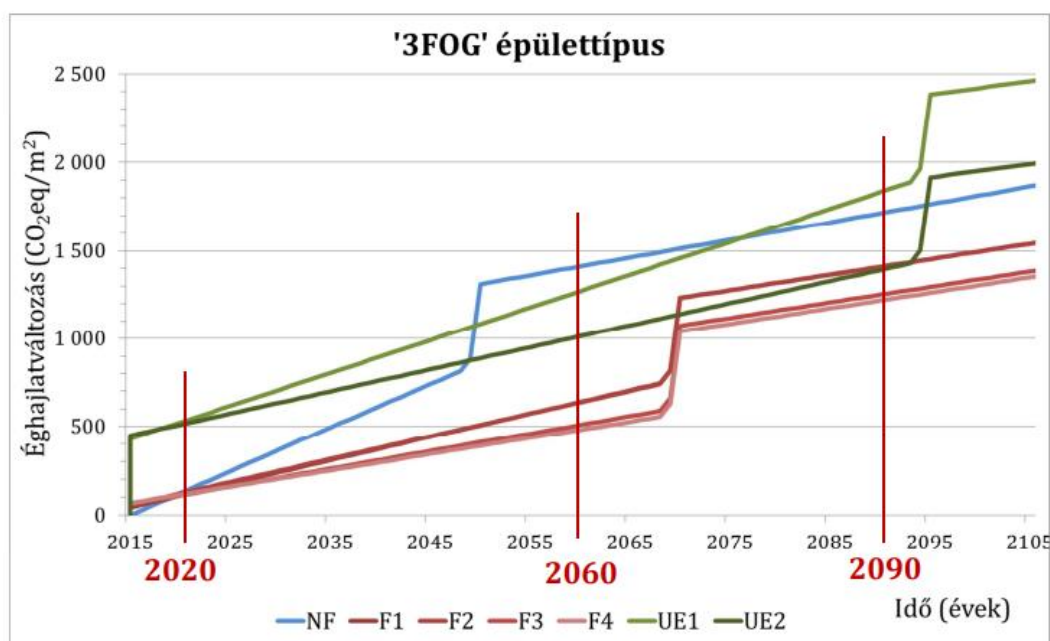
A következőkben a hazai panelépületekre vonatkozó kutatásokat tekintem át.

A Hrabovszky-Horváth Sára által készített értekezésben a kutatás módszertanának középpontjában az életciklus-elemzés áll, amelyet az energiatudatos panelépület felújítás hatékonyságának vizsgálatára alkalmaztak [22]. Az életciklus-elemzés célja, hogy átfogó képet adjon az épületek teljes élettartamán keresztül felmerülő környezeti hatásokról, amely magába foglalja a tervezést, építést, használatot, karbantartást és végül a bontást.

A kutatás során többféle felújítási forgatókönyvet is vizsgáltak, hogy felmérjék, melyik módszer vezet a legnagyobb mértékű energiamegtakarításhoz és károsanyag-kibocsátás csökkentéshez. A felújítási scenáriók a következő kategóriákra oszthatók:

- Nincs felújítás (NF) : Ez a scenárió az épület eredeti állapotát feltételezi
- Felújítás:
 - Felújítás 1 (F1): Az épület határoló-szerkezeteinek hőszigetelése. Tető, homlokzat, pincefödém valamint az ablak és lépcsőházi bejáratú ajtó csere
 - Felújítás 2 (F2): Az előbbinél fokozottabb hőszigetelés és ablakcsere
 - Felújítás 3 (F3): A felújítás 2 scenárió épületgépészeti korszerűsítéssel
 - Felújítás 4 (F4): A felújítás 3 scenárió központi hővisszanyerő szellőzés telepítésével
- Bontás és újépítés:
 - Új épület 1 (UE1): Nagyfokú hőszigetelés és jó minőségű ablakok, gázfűtés
 - Új épület 2 (UE2): Közel nulla energiafelhasználású feltételeknek megfelelő épület. Hővisszanyerő szellőzés és napenergia használat.

A kapott eredmények a 14. ábrán láthatóak. A klímaváltozás szempontjából a használati életciklus a domináns. A vizsgált épület scenáriók esetében, a használathoz szükséges energiát döntően a fosszilis energiahordozók elégetésével állítják elő, ugyanis az eredeti állapotú, illetve a felújított épületek földgáz alapú távhővel, az új épületek pedig gázkazánnal fűtöttek.



14. ábra: A 3FOG épülettípus éghajlatváltozási potenciál és a vizsgált időpontok (2020,2060,2090)[22]

A felújítási scenáriók fűtési energiaigény, és ezáltal az üvegházhatást okozó gázok kibocsátása nagyon közel áll egymáshoz, ezért a diagramon a görbék szinte egybeolvadnak.

Az első 5 évben a nincs felújítás állapot fenntartása tűnik a legjobb megoldásnak, de ezen idő letelte után az összes felújítási scenárió alacsonyabb környezetterheléssel bír. Majd az ezt követő 60 év elteltéig a mélyfelújításnak, azaz az F4 scenáriónak van a legalacsonyabb éghajlatváltozási potenciálja. A felújított épület akkor elér a meghosszabbított élettartamának a végére, s elbontásra kerül. Az új épület, a folyamatosan szigorodó energetikai előírások miatt várhatóan alacsonyabb energiafelhasználással, - és így CO₂eq kibocsátással bír majd. Az épület mélyfelújításával (F4) a 'nincs felújítás' scenárióhoz képest fajlagosan, 1 m² alapterületre vetítve, az éghajlatváltozást tekintve 2020-ra 7,6%, 2060-ra 64,1%-os 2090-re pedig 31,1%-os CO₂eq kibocsátás csökkenést érhetünk el.

Az életciklus szakaszok változását tekintve elmondható, hogy a felújítás szakasza növekszik, a használati fázis CO₂eq kibocsátása csökken. A karbantartás aránya ezzel szemben nő.

Az elbontás után új – a meglévővel azonos méretű, ám a mai korszerű anyagokkal és hőtechnikai igényekkel tervezett – épület esetében (UE2 scenárió) az összes CO₂eq kibocsátáshoz képest az építési kibocsátás 28,8%, a használati fázis kibocsátása 47,9%, a karbantartásé 19,8%, a bontás és újrahasznosítás kibocsátása pedig 3,2% a 75 éves időtartamra vetítve. Azaz a használati fázis energiafogyasztásának csökkenésével egyre jelentősebb hatással bír az építéskor, illetve a karbantartás során keletkező üvegházhatású gázok kibocsátása [22].

A Solanova projekt keretén belül egy Dunaújvárosi panelépületet újíttak fel komplex energiatudatos passzívház-technikákkal. A felújítás során leszigetelték az épületet, kicserélték a nyílászárókat, kialakítottak egy extenzív zöldtetőt a lapostetőn, leszigetelték a pincefödémét, hővisszanyerős szellőző rendszert építettek ki, a régi fűtési rendszert teljesen elbontották és egy új, kis teljesítményű függőleges kétsőves rendszerre cserélték. Ezek mellett víztakarékos zuhanyfejeket szereltek fel a lakásokban, illetve napkollektorokat a földszinti előtetőre ami árnyékol és energiát is termel. Ezeknek az intézkedéseknek eredménye az épület fűtési energiafelhasználásának több mint 80%-os csökkenése, a téli és nyári komfort javulása, illetve a lakások értékének az emelkedése [23].

További energetikai vizsgálatokat végeztek 10 iparosított technológiával épület panel lakóépület vonatkozásában, legalább 70%-os energia-megtakarítást célzó beruházás előkészítésére és megvalósítására. A vizsgálat során megállapították a 70%-os energia-megtakarítás valamennyi épületnél elérhető. Ehhez hővisszanyerő szellőző rendszert, kétsőves, fűtési rendszer, valamint szolár energiatermelő rendszerek telepítése szükséges. A nem megfelelően karbantartott épületek energetikai felújítása drágább [24].

2.5 Épületek felújításának támogatása optimalizációs eljárással

Az optimalizáció területén számos kutatás született, melyek értékes betekintést nyújtanak a különféle energetikai felújítási stratégiák hatékonyságába. A következőkben ezek közül néhány tanulmányt tekintek át.

Iráni lakóépületek felújítási stratégiáit vizsgálták klímaváltozási scenáriók figyelembevételével, különös tekintettel az energiahatékonyságra, költségekre és komfort szintre. Az EnergyPlus szimulációs motort használták, ami a DesignBuilder beépített szoftvere, amely egy részletes épületenergetikai-szimulációs program. Az EnergyPlus-t kombinálták a Matlabbal, amely egyedi programkódokat és iterációkat hajtott végre. Alkalmaztak passzív és aktív megoldásokat is. A passzív módszerekhez tartozott az épület szigetelése, ablakcseréje, a

természetes szellőzés optimalizálása. Az aktív intézkedések közé tartozik a fűtési és hűtési rendszer korszerűsítése, hőszivattyúk telepítése, napelemek elhelyezése. A modell 3 fő célfüggvényt használt: az éves energiafogyasztást, a komfort szintet, és az életciklus költséget. A kutatás eredményeképpen az alábbi megállapítások születtek: A CO₂ kibocsátás akár 73%-os csökkentése valósult meg, miközben a komfortszint akár 46%-kal javult. Az energiahatékonysági megoldások életciklus-költségei magasak voltak. A tanulmány hangsúlyozta hogy a klímaváltozás hatással van a hőterhelésre, így a jövőbeli felújítási stratégiák figyelembe kell hogy vegyék a hőmérsékleti változásokat [25].

Egy másik kutatás során kidolgoztak egy keretrendszert a meglévő lakóépületek nulla energiaigényű épületekké történő átalakítására. Ehhez egy pekingi ház példáját használták. A keretrendszer két fő lépést tartalmazott: először az energiafogyasztás minimalizálása passzív megoldásokkal, majd a megújuló energiák integrálása, például napelemek telepítésével. A felújítás előtti és utáni energiafogyasztást valós időben mérték, amelyet szimulációs modell segítségével ellenőriztek. Az eredmények igazolták, hogy a felújítást követően a ház energiaigénye 40%-kal csökkent, míg a megújuló energiák által termelt energia lefedte a fűtési és hűtési szükségleteket [26].

Optimalizációval vizsgálták az európai panelépületek energiafelújítás lehetőségeit, az életciklus költséghatékonyság és a nettó zero kibocsátás függvényében. Számos energiafelújítási intézkedéseket teszteltek. Az eredmények szerint a költséghatékonyabb megoldások között a szigetelés, alacsony szén-dioxid kibocsátású kazánok és napkollektorok voltak. Ezek a módosítások 60%-os üvegházhatású gázkibocsátás csökkentést okoztak. Ha még tovább szeretnénk csökkenteni a gázkibocsátást, akkor további beavatkozásokra van szükség, mint például háromrétegű üvegezésű ablakok beépítése, központi biomassza kazán beépítése, illetve napelemek fotovoltikus-hőtechnikai panelek beépítése. Ezekkel az intézkedésekkel az üvegházhatású gázkibocsátás 87-96%-os csökkenését érték el [27].

Egy másik kutatás áttekintést nyújt a 2017-2024 közötti energiafelújítási stratégiákról, amelyek különböző klímák és épülettípusok esetén alkalmazhatóak. Az irodalmi áttekintés során 385 tudományos cikket elemeztek, amelyek aktív és passzív stratégiákat vizsgáltak, valamint összegezték az egyes stratégiák előnyeit és hátrányait. A tanulmány szerint a felújítási stratégiák 30-60%-os energiamegtakarítást eredményeznek, különösen az épületgépészeti és világítási rendszerek fejlesztése esetén. A megújuló energiaforrások alkalmazásával az épületek akár önellátóvá és válhatnak. A kutatás javasolja az életciklus elemzést a stratégiai döntések

támogatásához, továbbá hangsúlyozza, hogy a felújítások régiós szintű megközelítése előnyös lehet a fenntartható fejlődéshez [28].

Egyes tanulmányok arra is rámutatnak, hogy a megfelelő épületforma és homlokzat kombinációja jelentős energiahatékonysági javulást eredményezhet [29].

3 Módszertan

3.1 Vizsgált épület bemutatása

A vizsgált épület, Budapest 18.kerületében található [15. ábra]. A 6248 lakásos, előregyártott technológiával épült Havanna lakótelepen található. A kerület lakosságának közel harmada él lakótelepen, és a kerület lakosságának mintegy 15%-a él a vizsgált területen [30]. Az épületek nagy része elavult, a lakásállomány energiahatékonysága alacsony. Általánosságban elmondható, hogy a külső falak, a tetők és a kerítések hőszigetelő képessége gyenge, a gépészeti rendszerek és berendezések technológiája is elavult, és télen gyakori a távfűtés túlfogyasztása. A fentieket figyelembe véve a kiválasztott épület meglehetősen rossz állapotú, így indokolt a felújítása.

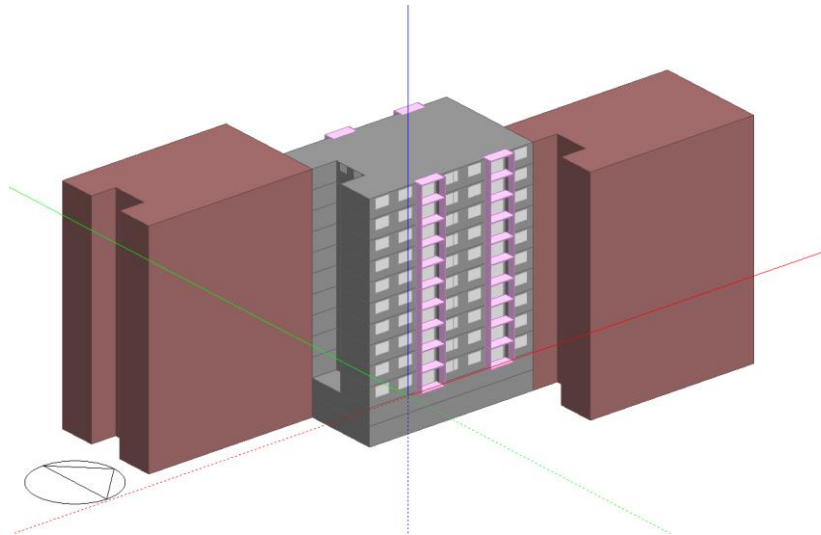


15. ábra: A vizsgált épület

3.2 Dinamikus szimuláció

Az épület dinamikus szimulációjához a DesignBuilder programot használtam (Verziószám v.7.3.0.043). Az épület modelljét Szagri Dórától, konzulensemtől kaptam meg [16. ábra]. A vizsgált panelépület 7 egymás után fekvő paneltömb része. A lemodellezett panelépület 10 emeletes, minden emeletén 6 lakás található, 3 db a Nyugati oldalon és 3 db a Keleti oldalon. Az épületnek van még egy földszintje továbbá egy fogadószintje. Az épületet két másik ugyanolyan panelház határolja, ezért ezek a panelházak adiabatikus blokkonként

lettek figyelembe véve. Az adiabatikus felületek nem adják át a hőt és olyan határok modellezésére alkalmasak, amelyek nagyjából azonos hőmérsékletűek a határos zónával. Az épület Nyugati és Keleti oldalán erkélyek találhatóak, amelyek „standard component blokk”-ként lettek modellezve. A standard component blokk nem tartalmaz zónákat, árnyékoló, fényvisszaverő felületként kezeli a program.



16. ábra: A vizsgált épület szimulációs modellje

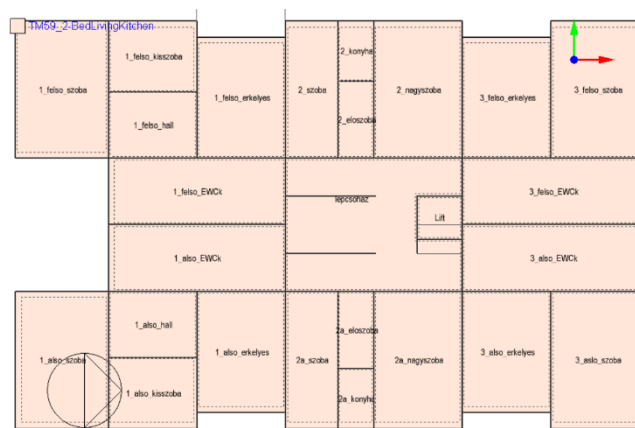
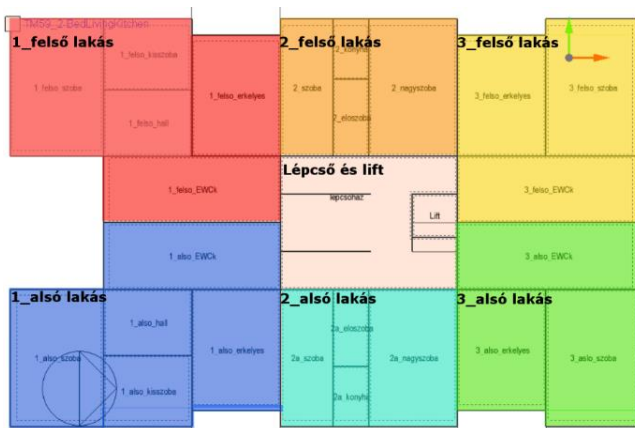
3.2.1 Zónák kialakítása

A futtatott szimulációk gyorsítása miatt a lakásokban lévő zónákat összevontam az összes emeleten [18. ábra], kivéve az 1., a 7. és a 10. emeleten [17. ábra].

Az egyszerűsített szinteken az alábbi zónák jöttek létre:

- 1_felső lakás
- 2_felső lakás
- 3_felső lakás
- 1_alsó lakás
- 2_alsó lakás
- 3_alsó lakás
- Lift és lépcsőház

Összesen 129 zónát adtam meg

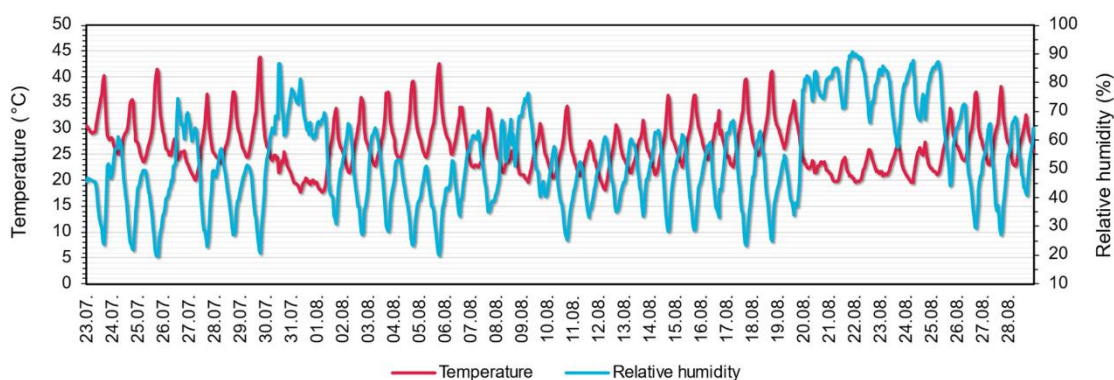


18. ábra: Összevont zónák kialakítása egy szinten

17. ábra: Zónák kialakítása az 1. 7. és 10. szinten

3.2.2 Klímaadatok

A vizsgált panelépület 10 emeletes. A 7. emeletén az 1_felső névvel ellátott lakásban szenzoros méréseket végeztek, amely nyomon követte a beltéri levegőminőséget, mint a hőmérséklet, relatív páratartalom, CO₂ szintet, valamint a lakók szokásait, a lakásban tartózkodásuk idejét és a szellőztetési szokásaikat. Az adatok a lakások nyári túlmelegedésének és a használati szokások elemzésére és számszerűsítésére szolgáltak. A mérések azt mutatták, hogy az átlaghőmérséklet augusztusban minden helyiségben 26 °C felett volt, és többször előfordult, hogy a hőmérséklet meghaladta a 30 °C-ot [30]. A mérések eredményeit használtam fel az épület modellezésében időjárási adatokként [19. ábra].



19. ábra Mért külső hőmérséklet és relatív páratartalom [30]

3.2.3 Rétegrendek:

A rétegrendek az épület tervei, illetve hasonló épületszerkezeteknél használt általános rétegrendek alapján lettek felvéve [37]. A hőhidak hatását is figyelembe kellett venni a kalibrálásnál. Az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról szóló rendeletben szereplő csatlakozási hőhidak hatását kifejező korrekciós tényezőkkel lett módosítva a modell

[38]. Erősen hőhidasnak feltételeztem a szerkezetet, ezért a fal hőátbocsátási tényezőjét megnöveltem 40%-kal, a lapostetőét pedig 20%-kal.

Rétegrendek:				
Külső panel:	Tető:	Válaszfal:	Földem:	Ablak:
6 cm vasbeton	1 cm bitumenes lemez	15 cm tömörített beton	17 cm vasbeton	4 mm általános átlátszó üveg
6 cm hőszigetelés	20 cm levegő			16 mm argon gáz
13 cm vasbeton	12 cm üveggyapot hőszigetelés			4 mm üveg
	12 cm vasbeton			
	1,3 cm vakolat			
	16 cm EPS hőszigetelés			

2. táblázat: Rétegrendek

Hőátbocsátási tényező	
Külső panel :	2,055 W/m ² -K
Tető:	0,346 W/m ² -K
Válaszfal:	3,074 W/m ² -K
Földem:	2,555 W/m ² -K
Ablak:	2,715 W/m ² -K

3. táblázat: Hőátbocsátási tényezők

3.2.4 Világítás:

A világításnak egy alacsony színvonalú, felfüggesztett világításfajtát választottam alapértelmezettként. Az épület világításigényének 100 lux-ot állítottam be. A világítás 18:00-tól 23:00-ig van bekapcsolva. A lámpatestek felkapcsolása lineáris módon történik. Lineáris vezérlés alatt azt értjük, hogy a szimulációs program a mesterséges világítást a természetes nappali megvilágítás függvényében szabályozza. Amikor nincs természetes fény, a mesterséges világítás maximális teljesítményen működik. Ahogy a természetes fény csökken, a rendszer lineárisan növeli a mesterséges fényt. Ez leegyszerűsítve annyit jelent, hogy minél sötétebb van éjszaka, annál több lámpát kapcsolnak fel a lakók.

3.2.5 Fűtés és melegvíz fogyasztás

Rendelkezésemre álltak a 7 paneltömb fűtési és melegvíz célra használt távhő fogyasztás értékei havi bontásban 2016-ban 2019-ben és 2021/22-ben. A fogyasztás értékeit

elosztottam 7-tel hogy megkapjam a vizsgált panelház átlagos távhő fogyasztás értékeit. Az átlagos fűtés 1 évben 429 213 kWh, az átlagos melegvíz 136 704 kWh. A modell ezek az értékek alapján lett kalibrálva.

3.2.5.1 Melegvíz

A melegvíz fogyasztásnak 1,184 l/m²/nap adtam meg. Mivel 1 lakásban átlagosan 2,2 ember lakik Magyarországon, ezért a napi átlagos melegvíz fogyasztás az épületben 36,1 l/fő/nap.

3.2.5.2 Fűtés

Az épület fűtése 22 fokra lett beállítva. Télen a szellőzés 0,5 ac/h lett beállítva, összhangban a hazai ÉKM rendelettel [38]. Ez azt jelenti, hogy 0,5-ször cserélődik ki a levegő 1 óra alatt. Ez infiltrációból és a belső levegőminőség biztosításához szükséges ablaknyitásból. Az infiltráció a szellőzésnek nem kívánt, nem ellenőrzött formája, mely az épület résein keresztül megvalósuló levegőszivárgást jelenti és fokozott fűtési vagy hűtési terhelést okoz abban az esetben, ha a kinti levegő bejut az épületbe és fel kell melegíteni vagy le kell hűteni. Az infiltrációt nem lehet megakadályozni csak csökkenteni tudjuk az épület energetikai felújításával. A nyári időszakra az éjszakai többletszellőztetés miatt a szellőztetés 3 ac/h lett beállítva.

A természetes szellőztetéshez további korlátozások lettek beállítva. A szellőztetés megáll ha a benti hőmérséklet 20 °C alá csökken, ezzel megakadályozva, hogy télen nagyon lehűljön az épület a szellőztetés miatt. Ezen kívül a kinti hőmérsékletnek minimum 2 fokkal hidegebbnek kell lennie mint belső hőmérsékletnek ahhoz, hogy elinduljon a szellőztetés, ezzel megelőzve hogy a nyári meleg levegő felfűtse az épületet.

Az épületet úgy modelleztem, hogy egyik lakás sem rendelkezik hűtéssel.

4 Eredmények

4.1 Meglévő épület eredményei

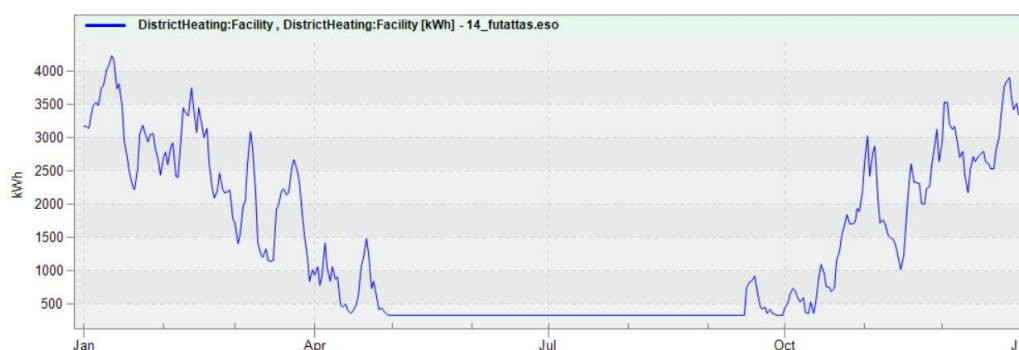
A beállított paraméterekkel 1 évre futtattam le a szimulációt. A kapott fogyasztási értékeket megszoroztam 1,15-el amivel figyelembe vettem a szállítási és szabályozási veszteségeket. Ezeket a számokat összehasonlítottam a számlákból kiszámolt fogyasztásokkal. Az összehasonlításokat a 4. táblázat tartalmazza.

	Szimuláció során kapott értékek szorozva 1,15-el (kWh)	Szállám lévő értékek (kWh)	Különbség(%)
Fűtés	435 532 kWh	429 213 kWh	1,47%
Melegvíz	136 748 kWh	136 704 kWh	0,0003%

4. táblázat: A szimuláció során kapott értékek összehasonlítása a számlán lévő értékekkel

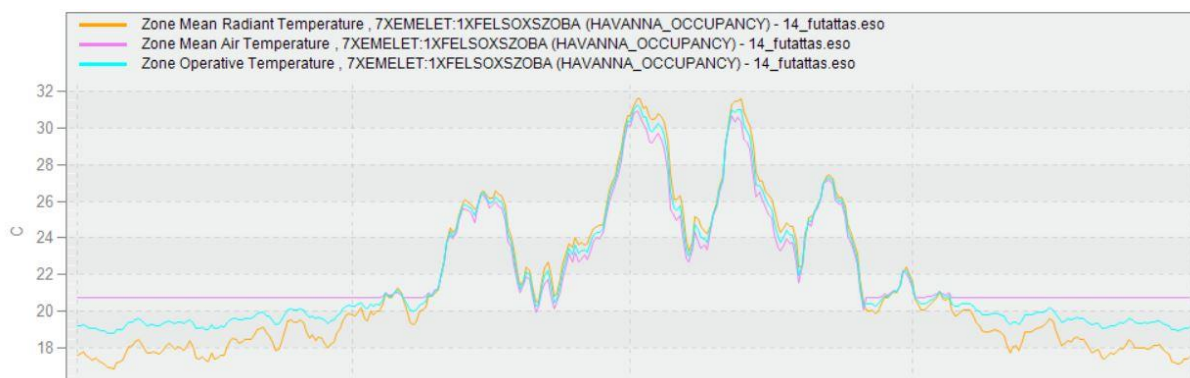
A táblázatban látható, hogy a számlához közeli értékeket kaptunk, tehát feltételezhető hogy a modell jól volt beállítva.

A szimuláció eredményeképpen a 20. ábrán látható távfűtés értékeket kaptam. Az ábra jól szemlélteti, hogy a téli hónapokban a legjelentősebb a fűtés és fokozatosan csökken nyárig.



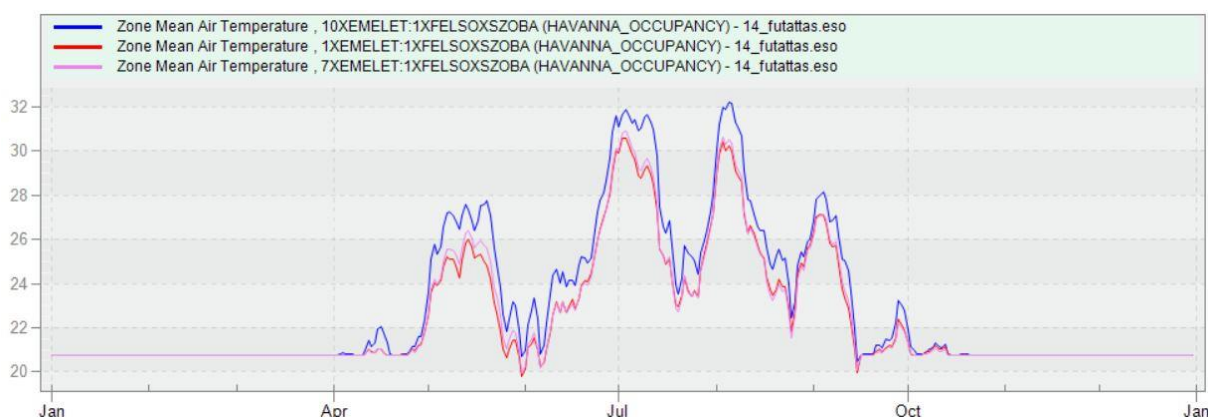
20. ábra: Éves távfűtés szimulációs görbéje

A monitoring mérések a 7.emelet 1_felső lakásban történtek, így ennek a lakásnak az egyik zónáját elemeztem hőmérséklet szerint. Látható a 21. ábrán, hogy az operatív hőmérséklet, ami alapján a komfortérzet meg van határozva mindig a levegő és a sugárzási hőmérséklet között szerepel. Télen alacsonyabb a sugárzási hőmérséklet, mert ilyenkor a felületek lehűlnek, nyáron pedig felmelegszenek a falak és meleget sugároznak magukból. Ezért fontos a ház hőszigetelése, hogy télen kevésbé tudjanak a falak lehűlni, nyáron pedig felmelegedni.



21. ábra: Levegő hőmérséklet, sugárzási hőmérséklet, operatív hőmérséklet

Az 1. a 7. és a 10. emelet vizsgáltam hőmérséklet szempontjából. Nyáron a levegő hőmérséklete a 10. emeleten a legmagasabb, utána a 7.-en és végül az első emeleten, amit a 22. ábra jól szemléltet. Ez az ábra is jól bizonyítja, hogy a túlmelegedésre a fenti emeleteken lévő lakások jobban ki vannak téve. Érzékelhető még az ábrából, hogy az első és a 7.emelet között nincsen nagy hőmérsékletkülönbség, viszont a 10. emeleten akár 2 fokkal is melegebb hőmérséklet érzékelhető.



22. ábra: Levegő hőmérséklete az 1. a 7. és a 10. szinten

4.2 Érzékenység vizsgálat

Az érzékenység vizsgálat azt vizsgálja, hogy a kimeneti bizonytalanság mennyire függ az egyes bemeneti változóktól. Míg a bizonytalanságelemzés a modell kimenetében megjelenő hibát számszerűsíti a bemenetek bizonytalansága miatt, az érzékenységvizsgálat azt vizsgálja, hogy a bemenetek bizonytalansága milyen mértékben járul hozzá a kimeneti bizonytalansághoz.

Változó alatt a tervezési elemeket értjük, ami lehet pl.: hőszigetelés, világítás, nyílászáró. Minden változóhoz hozzárendelünk opciókat. pl.: hőszigetelés típusa, nyílászáró fajtája.

Az érzékenységi elemzés során alternatív változókat és hozzájuk tartozó opciókat adhatunk meg és tesztelhetjük, hogy ezek a változók mennyire befolyásolják a modellünk kimenetét.

Az érzékenységi elemzésnek sok előnye van, segít értékelni mennyire stabilak az eredmények a bizonytalan bementi adatok mellett. Megérthetők a bementek és a kimenetek közötti kapcsolatok. Csökkenthető a modell bizonytalansága azáltal, hogy azonosíthatóak azok a bemenetek amelyek jelenetős bizonytalanságot okoznak a kimenetben, így az elemzés ezekre összpontosíthat a pontosság növelése érdekében. Egyszerűsíthető a modell, az érzékenységvizsgálat kiszűrheti azokat a bemeneteket, amelyek nem gyakorolnak jelentős hatást az eredményre, így a modell strukturális egyszerűsítése is megvalósítható [39].

A következőkben felújítási alternatívákat adtam meg. Ezt követően az érzékenységvizsgálattal csökkentettem a változók számát, amely lehetővé tette az optimalizáció egyszerűsítését és pontosítását. Az elemzési és optimalizációs lépések együttesen képezik a módszertan alapját, amelynek célja hogy átfogó képet adjanak a felújítási megoldásokról.

4.2.1 Vizsgálat:

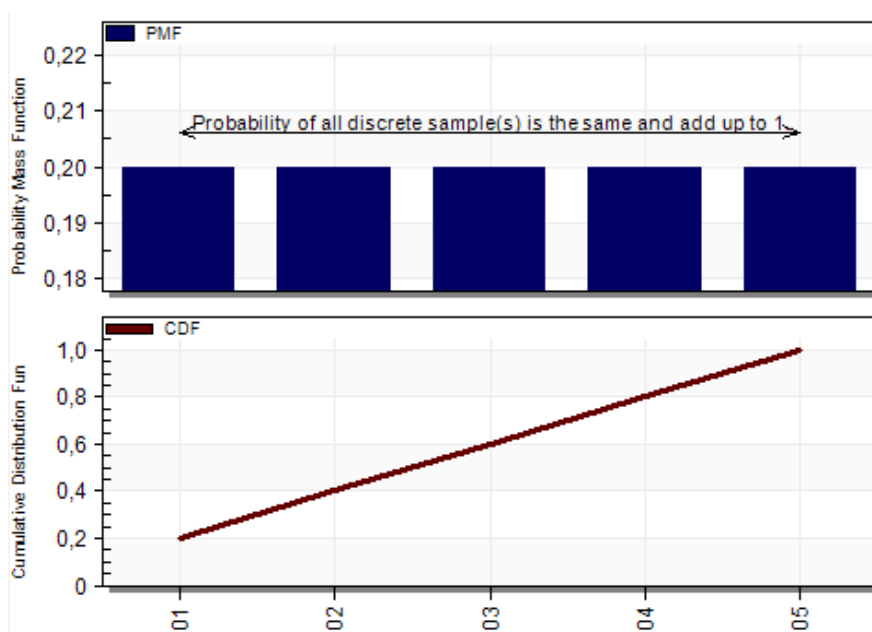
A vizsgálat során az 5. táblázat található változókat és a hozzájuk tartozó opciókat adtam meg. Ezeket a változókat úgy választottam meg, hogy azok az épület felújítása esetén befolyással bírjanak az épület energetikai viselkedésében.

Matrix of design variable options								
Wall_Homlokzat	Insulation (cm)_Szigetelés	4	8	12	16	20	24	
	U-value	0,673	0,402	0,287	0,223	0,182	0,154	
Roof_Tető	Insulation(cm)_Szigetelés	4	8	12	16	20	24	
	U-value	0,257	0,204	0,17	0,145	0,127	0,112	
Window_Ablak	Glazing type_Nyílászáró típusa	3-13-3-13-3, three-layer glass filled with argon gas	3-13-3-13-3, three-layer air-filled glass, low "e"	3-13-3, two-layer glass filled with air, low "e"	two-layer glass filled with argon gas, low "e"	SageGlass Climatop Classic		
	U-value	1,058	1,256	1,786	1,512	0,688		
Shading_Árnyékolás	South-local shading type_Déli oldal árnyékvető szerkezet	None	0.5m Overhang	1 m Overhang	1.5m Overhang	2 m Overhang		
	Window blind type_Ablak árnyékolás típusa	Drapes-close weave dark	Drapes-open weave dark	None	Blind with high reflectivity slats	Blind with low reflectivity slats	Shade roll-medium translucent	High reflectance-low transmittence shade
System_Rendszer	Lighting template_Világítás típusa	LED	LED with linear control	CFL	T5	T5 with linear control		

5. táblázat: Tervezési változók mátrixa

Az alábbi változókat definiáltam: A homlokzat és a tető szigetelésének a vastagságát. Ezek a változók a hőátbocsátási tényezőt tudják nagymértékben csökkenteni, ami fontos egy ház energetikai felújításánál. Az árnyékvető szerkezetet is vizsgáltam, amely egy olyan mozgatható szerkezet, amely a transzparens szerkezetekkel funkcionális és jellemzően szerkezeti kapcsolatban áll, továbbá célja, hogy szabályozható módon a direkt napsugárzás továbbjutását részben vagy egészben megakadályozza [38]. Az árnyékvető szerkezetet az épület déli oldalán elhelyezve vizsgáltam, mert Magyarország földrajzi elhelyezkedése miatt a napsugárzás iránya miatt a déli homlokzatok különösen ki vannak téve a túlmelegedés veszélyének. Az árnyékolókat és a nyílászárókat is vizsgáltam annak függvényében, hogy mennyi fényt és hőt eresztenek be a belső térbe. A világítás fajtáját is tanulmányoztam, mert hőtermelésével szerepet játszik az épület felmelegedésében.

A 6 változó megadása után számszerűsítettem az egyes bemenetek bizonytalanságát. Ezt valószínűség-eloszlásgörbével lehet megtenni, mely a vizsgált esetekben egyenletes, diszkrét eloszlású volt [23. ábra], tehát egy változón belül minden opció egyenlő eséllyel lett kiválasztva a szimuláció során. A szoftveren belül szerepel a változó neve, típusa, valószínűség-eloszlás és annak paraméterei, illetve, hogy az adott változót az épület mely részein alkalmazom.



23. ábra: Az opciók valószínűségi eloszlása

A vizsgálatok során 2 érzékenységi elemzést is futtattam. Az egyik elemzésnél a diszkomfortos órák számának érzékenységét vizsgáltam, a másik szimulációnál pedig az épület teljes energia felhasználását.

Ezután összehasonlítottam a két elemzés értékeit és megállapítottam, hogy melyek azok a változók, amik nagyban befolyásolják a diszkomfortos óráknak a számát és az épület teljes energia felhasználását.

4.2.2 Eredmény:

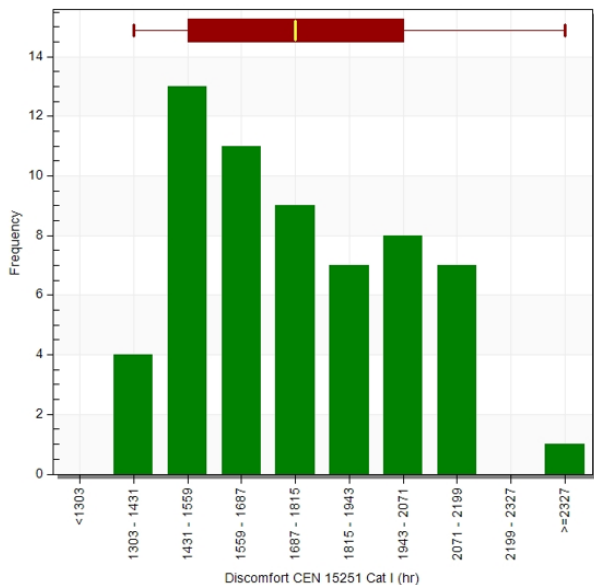
Első futtatásnál a diszkomfortos órák érzékenységet vizsgáltam. A két szabvány közül a CEN Standard Adaptive módszert alkalmaztam, mert az egyszerűsített ASHRAE 55 szabvánnyal számolva jelentős eltéréseket kaptam. Vélhetően azért, mert a levegő nedvességtartalma nem volt kalibrálva a modellben, illetve nem HAMT (Combined Heat and Moisture Transfer) modellt használtam, ellenben a szabvány nagyon érzékeny rá és emiatt a kapott eredmények nagymértékben torzultak.

A diszkomfortos órák a CEN 15251 szabvány első kategóriája szerint lettek meghatározva. A vizsgálat során 60 db szimulációt futtattam. Minden futtatásnál a program automatikusan kiválaszt minden változóból egy opciót és azokkal a paraméterekkel szimulálja a modellt. Az opció kiválasztása a valószínűség-eloszlás görbe alapján történik. Az összes szimuláció végén kapunk egy eredményt, amely megmutatja, hogy mennyi volt a kiválasztott opciókkal a diszkomfortos órák száma. A 60 darab szimuláció végén kapunk egy hisztogramot a diszkomfortos órák eloszlásával [25. ábra]. A hisztogram az összes szimuláció során kapott diszkomfortos órák eloszlását ábrázolja, így vizualizálja a különböző szimulációs eredményeket és azok gyakoriságát. Az érzékenységvizsgálat segít megérteni, hogyan változik a diszkomfortos órák értéke, ha bármelyik bemeneti változót variáljuk. A standardizált regressziós együttható (SRC) minden bementi változó érzékenységet adja meg, ezáltal azonosítja a legfontosabb és kevésbé fontos változókat. Ez azt jelenti, hogy ha egy változónak magas az SRC értéke, akkor annak a paraméternek a megváltoztatása nagymértékben befolyásolja a diszkomfortos órák számát az épületben. A 26. ábrán láthatjuk az érzékenységvizsgálat eredményét. A változók csökkenő sorrendbe vannak téve a fontosságuk szerint, minél magasabb egy oszlop, annál fontosabb változó.

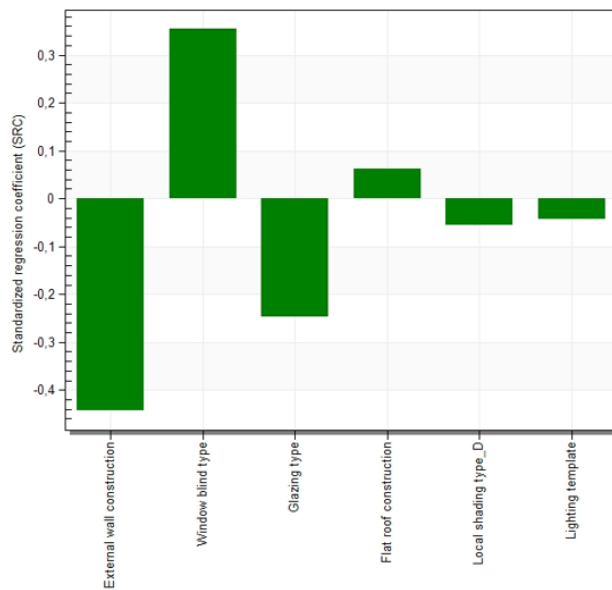
Leolvasható, hogy a legfontosabb változó a külső fal rétegrendje, utána követi az árnyékolás típusa, a nyílászáró fajtája, a lapostető rétegrendje, az árnyékvető szerkezet, és a legkevésbé fontos paraméter a világítás típusa.

Mean	SD	Min	Q1	Median	Q3	Max
1747,2	244,4	1303	1551	1710	1955	2327

3.3.1.2 Output Uncertainty Histogram:



25. ábra: A diszkomfortos órák gyakoriságának eloszlása

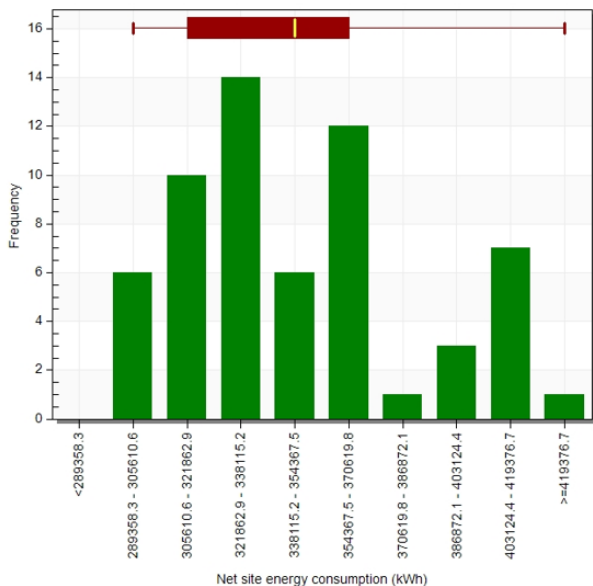


24. ábra: A változók csökkenő fontossági sorrendben

A másik futtatásnál az épület össze energiakibocsátását vizsgáltam. Ugyanazokat a változókat és opciókat adtam meg, mint a diszkomfortos órák változásának vizsgálatakor. Az érzékenységvizsgálat eredményei a 25. ábrán és a 24. ábrán láthatóak. Az ábráról leolvasható, hogy a legfontosabb bementi paraméter a külső fal rétegrend, utána az üvegezés típusa, az árnyékolás típusa, a világítás, az árnyékvető szerkezet majd a lapostető rétegrendje.

Mean	SD	Min	Q1	Median	Q3	Max
347834,7	35276,6	289358,3	320328,8	339988,5	364318,8	419376,7

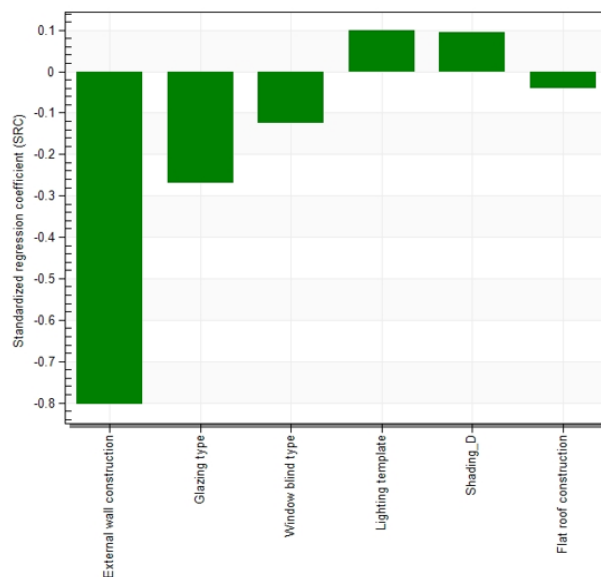
3.3.1.2 Output Uncertainty Histogram:



27. ábra: Az épület energiafogyasztásának gyakoriság eloszlása

1.1 Output: Net site energy (Net site energy consumption)

4.1.1 Sensitivity Analysis Graph



26. ábra: A változók csökkenő fontossági sorrendben

Ezek után összehasonlítottam a kapott eredményeket. A DesignBuilder rangsorolja a változókat a fontosságuk alapján. Zölddel jelöli a fontos változókat, sárgával a közepesen fontosakat és pirossal azokat, amelyek nem befolyásolják jelentősen a kimeneti eredményeket. A 28. ábra alapján kiválasztottam azokat a változókat, amelyeket az optimalizáció során vizsgálni fogok. Az ábra azon az elven alapszik, hogy az optimalizáció során csak azokat a bemeneteket kell vizsgálni ami mind a két kimeneti értéket befolyásolja. Amennyiben a kimeneti értéket csak az egyik bemeneti paraméter befolyásolja, úgy a bemeneti adatot csak a nagymértékben befolyásolt paraméter alapján kell kiválasztani. Emiatt kizárhatjuk az optimalizációs vizsgálatból. Ha a változó egyik kimeneti értékünket sem befolyásolja, úgy bármilyen értéket választhatunk neki és kizárhatjuk az optimalizációs vizsgálatból.

Ezzel a módszerrel egyszerűsíthető az optimalizáció mert kizárjuk azokat a paramétereket amik kevés hatást gyakorolnak a kimeneteinkre. Ezáltal egy egyszerűbben értelmezhető eredményt fogunk kapni az optimalizáció során.

		OBJECTIVE 1		
		High	Medium	Low
OBJECTIVE 2	High	Keep	Keep (Optional) Select value as per Objective 2	Ignore (Select value as per Objective 2)
	Medium	Keep (Optional) Select value as per Objective 1	Keep	Ignore (Select value as per Objective 2)
	Low	Ignore (Select value as per Objective 2)	Ignore (Select value as per Objective 2)	Ignore (Select any suitable value)

28. ábra: A változók kiválasztása az optimalizációhoz fontosságuk alapján [31]

Energiafogyasztás	Diszkomfortos órák	Optimalizáció
External wall construction	External wall construction	Igen
Glazing type	Glazing type	Igen
Window blind type	Window blind type	Igen
Lighting template	Lighting template	Nem
Shading D	Shading D	Igen
Flat roof construction	Flat roof construction	Nem

6. táblázat: A változók kiválasztása

A 6. táblázat alapján a hat változóból a lapostető rétegrendje és a világítás típusát zártam ki a további optimalizációs vizsgálatokból. A lapostető rétegrendjét a diszkomfortos órák számának függvényében kell meghatározni, a világítás típusát pedig az energiafogyasztásra gyakorolt hatása alapján kell kiválasztani.

4.3 Optimalizáció

A DesignBuilder szoftverben az optimalizáció alatt egy több kritériumos elemzést értünk, mely egy genetikus algoritmust használ ami gyorsan megtalálja az optimális beállítást a projekthez. Egészen a közelmúltig ez a fajta analízis csak komplex, időigényes kódokkal volt lehetséges, ami hasznos volt kutatásokhoz, de nem volt alkalmas a szélesebb körű használatra. 2013-ban, a DesignBuilder bemutatta az első kereskedelmi életképes, széles körben használható optimalizációs eszközt. Azóta az optimalizáció jelentősen javult, lehetővé téve az egyszerű felhasználónak is a használatát.

Az optimalizáció egyre szükségesebb a magas energiahatékonyságú épületek tervezésénél. Az épület egy komplett ökoszisztéma, ahol ezer különböző alkotóelem hat egymásra, ami meghatározza, hogy mekkora az épület fogyasztása, mennyi a szén-dioxid kibocsátás, mennyire kényelmes az épületben élni és dolgozni. Ezek a változók lehetnek az anyagok szigetelése, üvegezése, árnyékolás, HVAC rendszer, világítás, időjárási hatások és még sok minden más. Ha csak egy változót is megváltoztatunk, az hatással van nagyon sok másikra, vagy az összesre, láncreakciót okozva. Emiatt nagyon nehéz a tervezett épületet optimalizálni. A magas energiahatékonyságú épületek tervezésének teljeskörűnek kell lennie, az adott tulajdonságoknak jól kell egymással együtt működniük, hiszen nem elég, ha a változók önmagukban jól teljesítenek, egymással is tudniuk kell együttműködni [31]. Ilyen teljeskörű elemzések nem voltak elérhetőek tradicionális iteratív és parametrikus modellezéssel.

Az alábbi fogalmakkal érdemes tisztában lenni a tervezés során:

- Tervezési tér: a permutációk teljes száma a projekt szempontjából releváns tervezési változók összes lehetséges kombinációjához.
- A tervezési tér mérete: A tervezési tér nagyságát a változók száma és az egyes változókhoz rendelt opciók mennyisége határozza meg. A tervezési tér nagyságát úgy számoljuk ki, hogy az egyes változóhoz tartozó opciók számát összeszorozzuk. pl: ha 2 változónk van, az egyikhez 8 opciót rendelünk, a másikhoz 9-et, akkor a tervezési tér nagysága $8 \times 9 = 72$. A változók és az opciókat is a felhasználó adja meg figyelembe véve a projekt szempontjából releváns elemeket.

Feltételezve, hogy 1 szimuláció 1 perc alatt fut le, 10 változó esetén, a 7.táblázatban látható szimulációs időket kapjuk.

Opciók száma	Variációk	Szimulációs idő
3	$3^{10} > 59\,000$	40 nap
4	$4^{10} > 1\,000\,000$	2 év
10	$10^{10} > 10\text{ Bn}$	18 000 év

7. táblázat: Szimulációs idők összehasonlítása [32]

A 7. táblázatban látható, hogy egy egyszerű szimulációnál milyen sok variációt kell megvizsgálni, ami akár évekbe is telhet. A régebbi algoritmusok egyszerűbbek voltak, nem tudtak effektíven ilyen sok variációt megvizsgálni emiatt nem volt alkalmazható. Az optimalizációs algoritmusok, mint a genetikai algoritmus csak később fejlődött ki és vált széles körben hozzáférhetővé. Mára a számítástechnika, a szimulációs technológiák és az algoritmusok fejlődésével az optimalizáció elérhetővé vált a mindennapi tervezésben, így komplex rendszerek optimalizálására is alkalmasak.

Evolúciós Genetikai Algoritmus

Az optimalizációhoz a program az evolúciós genetikai algoritmust használja. Ez az algoritmus a természetes szelekció és az evolúció elvein alapul. Az algoritmus lényege, hogy a problémák megoldására olyan módszert alkalmaz, amely hasonló természetben megfigyelhető élőlények fejlődéséhez.

Működési elve:

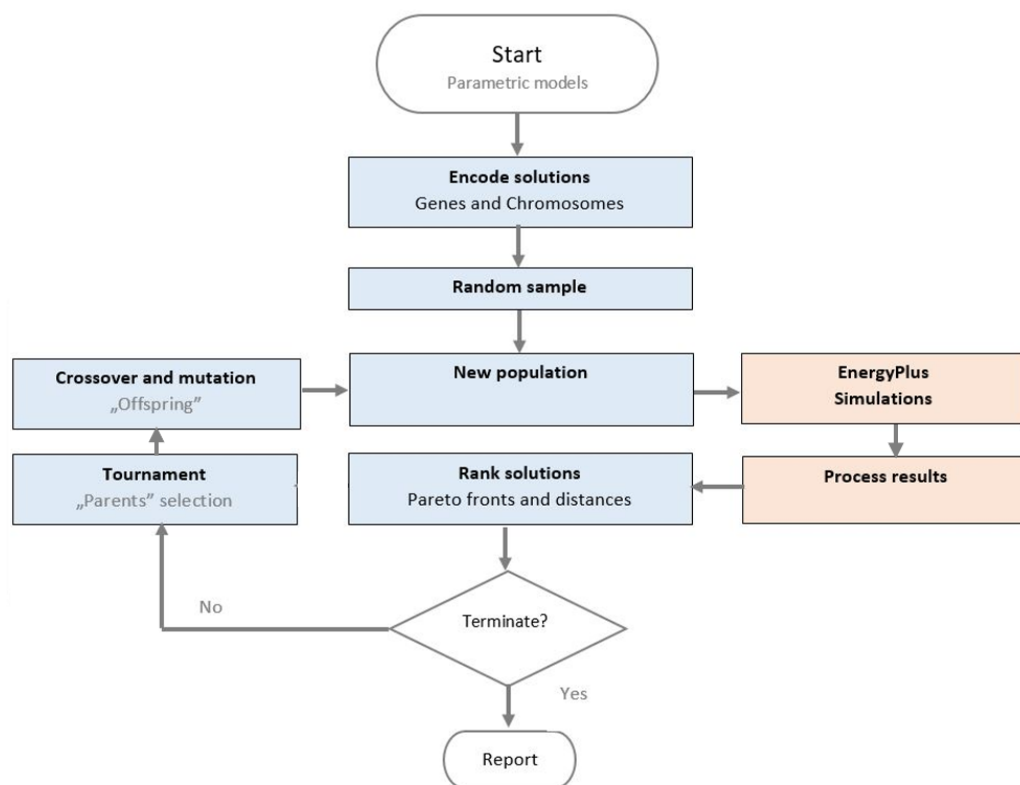
Először létrejön egy halmaz különböző megoldási lehetőségekből, amelyek egy probléma megoldására vannak használva. Ezt a halmazt nevezzük populációnak. Minden egyes megoldás egy „egyén” vagy „kromoszóma”. Ezek az egyének véletlenszerűen generált megoldások, és lehetnek például különböző paraméterek kombinációi egy problémára.

Minden egyes egyén kiértékelésre kerül egy alkalmassági függvény segítségével. Ez a függvény megmondja, hogy egy adott megoldás mennyire jó vagy mennyire közel van az optimális megoldáshoz. Azok a megoldások, amelyek jobbak, magasabb alkalmassági értéket kapnak.

A legjobb egyének kiválasztásra kerülnek mert jobban közelítik a megoldást. A kiválasztott legjobb egyének párokat alkotnak, és ezeket összekeverjük, hogy új megoldásokat hozzunk létre. Ez az úgynevezett keresztezés. Két megoldás összekeveredésével egy új megoldást kapunk, amely a „szülők” tulajdonságainak kombinációját tartalmazza.

Az új megoldások néha véletlenszerűen módosításra kerülnek, hogy ne legyenek teljesen azonosak a szülőkkel. Ez a mutáció. Ez segít új és esetleg jobb megoldásokat találni, amelyek a korábbi generációkban nem voltak jelen.

Az újonnan létrehozott egyedek alkotják a következő generációt. Ez a folyamat addig ismétlődik, amíg el nem érjük a kívánt megoldást, vagy amíg nem látjuk, hogy a populáció egyre jobb megoldásokkal közelíti meg az optimális eredményt [33]. Az algoritmusnak a DesignBuilder programba való beépítését a 29. ábra szemlélteti.



29. ábra: Az evolúciós genetikus algoritmus folyamatábrája a DesignBuilder programban [34]

4.3.1 Beállítások:

Célkitűzés:

Az optimalizáció során 2 célt lehet meghatározni az elemzés során. Én ezeknek a céloknak az épület energiafogyasztását és a diszkomfortos órák számának a csökkenését jelöltem ki.

Korlátok:

Korlátozásokat lehet beállítani az épület teljesítményére vonatkozóan. A futtatáshoz nem állítottam be korlátozásokat.

Változók:

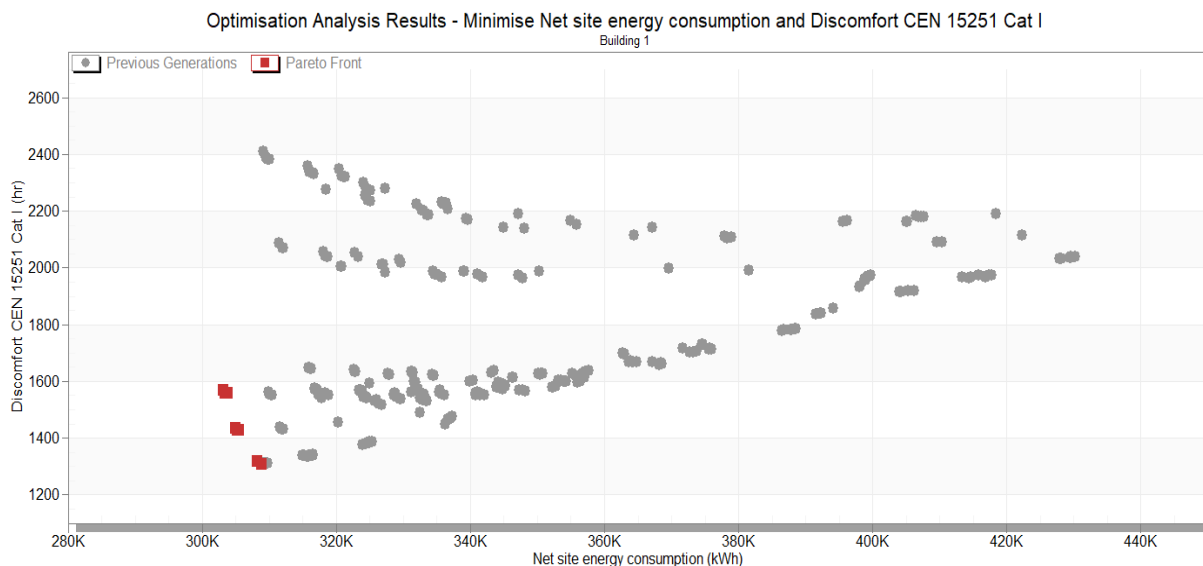
A 8. táblázat láthatóak a változók és a hozzájuk tartozó opciók. Ezek azok a változók, amik az érzékenységvizsgálat szerint mind az energiafogyasztásra, mind a diszkomfortos órák számára hatással voltak, így vizsgálni kell hogy milyen hatással vannak egymásra. A túl sok változó használata nehezíti az eredmények értelmezését, illetve rendkívül lassítja az optimalizáció idejét.

Matrix of design variable options								
Wall:	Insulation (cm)	4	8	12	16	20	24	
	U-value	0,673	0,402	0,287	0,223	0,182	0,154	
Window	Glazing type	3-13-3-13-3, three-layer glass filled with argon gas	3-13-3-13-3, three-layer air-filled glass, low "e"	3-13-3, two-layer glass filled with air, low "e",	two-layer glass filled with argon gas, low "e",	SageGlass Climatop Classic		
	U-value	1,058	1,256	1,786	1,512	0,688		
Shading	South-local shading type	None	0.5m Overhang	1 m Overhang	1.5m Overhang	2 m Overhang		
	Window blind type	Drapes-close weave dark	Drapes-open weave dark	None	Blind with high reflectivity slats	Blind with low reflectivity slats	Shade roll-medium translucent	High reflectance-low transmittence shade

8. táblázat: Tervezési változók mátrixa optimalizációhoz

4.3.2 Eredmények

Az optimalizációs folyamatot két nap után leállítottam, mivel úgy ítélt meg, hogy az addig futtatott szimulációk száma elegendő volt a modell reprezentatív eredményeinek biztosításához. A szimulációk száma 379 volt.

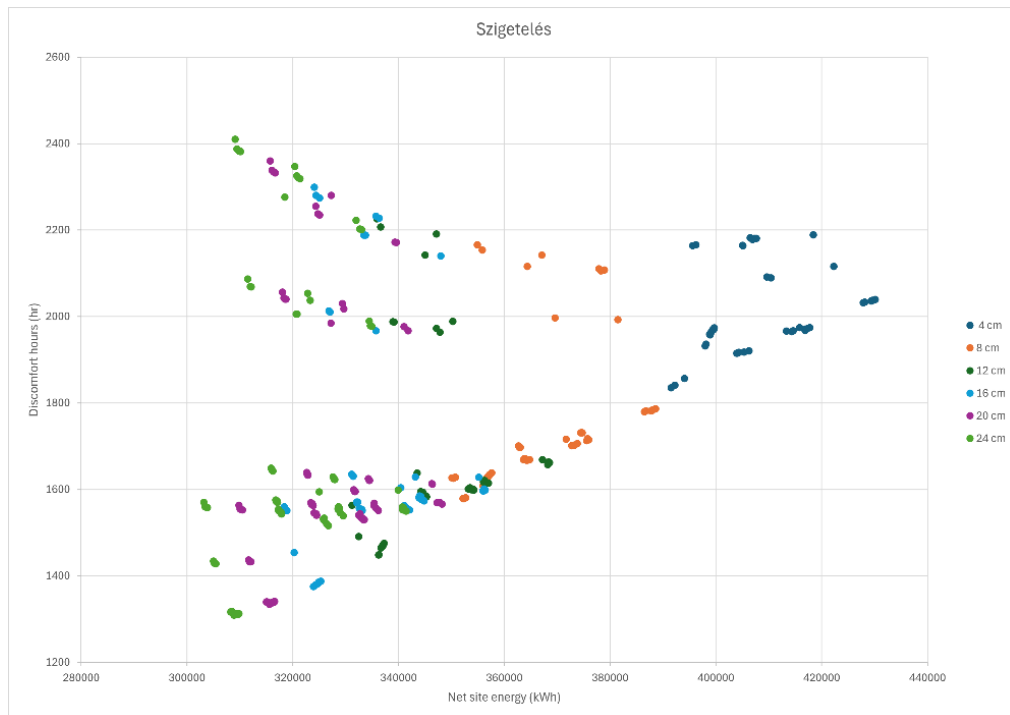


30. ábra: Optimalizáció eredmények

Az optimalizáció során kapunk egy grafikont a szoftveren belül, [30. ábra] aminek az x és y tengelyén a 2 célfüggvény található. Minden egyes pont egy szimulációnak az eredményét jelöli. Az optimális megoldásokat a piros színnel jelölt pareto front jelenti. Ezek azoknak a megoldásoknak a halmaza, ami a legjobban megfelel mind a 2 célfüggvénynek. A kapott eredményeket változónkként fogom értékelni.

Hőszigetelés:

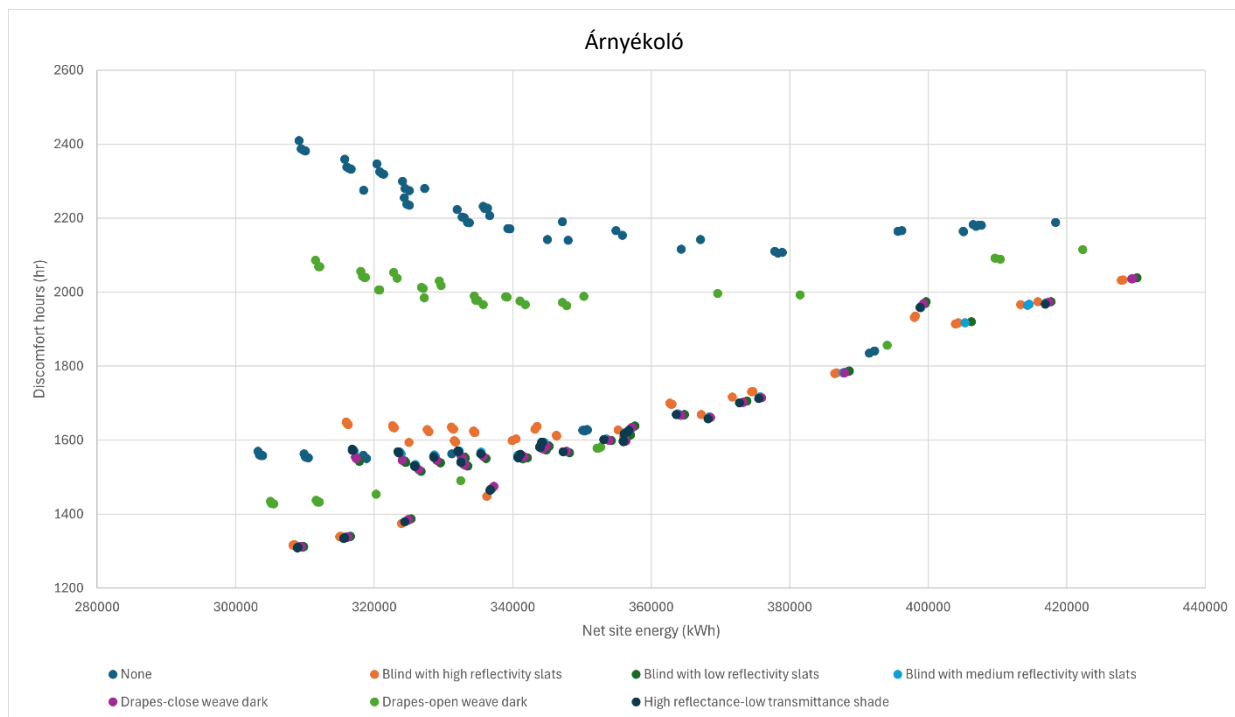
Különböző színekkel ábrázoltam az egyes homlokzati hőszigetelés vastagságokhoz tartozó eredményeket [31. ábra]. Látható, hogy a szigetelés jelentős szerepet játszik az épület energiafogyasztásának csökkentésében. A 4 cm és 8 cm szigetelés élesen elválasztható egymástól, látható, hogy az energiafogyasztásra ebben a tartományban a többi változónak nincs jelentős hatása. Ezzel szemben a vastagabb szigetelésekkel elérhető energiafogyasztás értékek már összefolynak, a többi változó helyes megválasztásával akár ugyanakkora energiafogyasztás érhető el 12 cm-es szigeteléssel mint 24-gyel. Az optimális felújítási alternatíva kiválasztása során figyelembe kell venni az aktuális energetikai szabályzásokat is, így legalább 16 cm hőszigetelés alkalmazása javasolt [38].



31. ábra: Optimalizáció eredménye a szigetelés vastagságának eloszlása szerint

Árnyékolás:

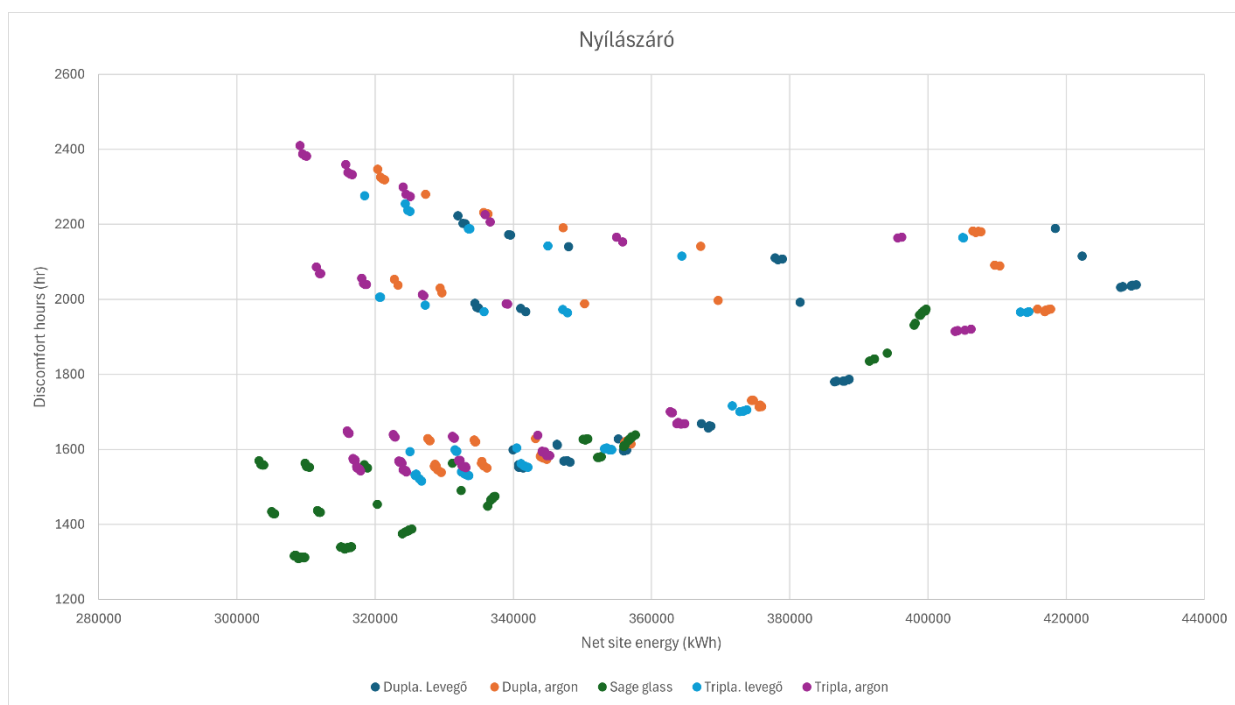
A 32. ábrán az árnyékolást ábrázoltam színek szerint. Az eredmények alapján elmondható, hogy függöny típusa nagyban befolyásolja a diszkomfortos órák számának alakulását. A legrosszabb eredményeket akkor kapjuk, ha semmilyen árnyékolást nem helyezünk az ablakra. Rossz értékeket kapunk akkor is, ha kevésbé sűrűn szőtt a függöny. Az első eset kézzel, az utóbbi világos zölddel van ábrázolva a grafikonon és elkülöníthetőek a többi esettől. A többi opció nehezen elkülöníthető egymástól, valószínűleg hasonlóan hatékonyak és eredményességük a többi opció megválasztásától függ.



32. ábra: Optimalizáció eredménye az árnyékolók fajtájának függvényében

Nyílászáró típusa:

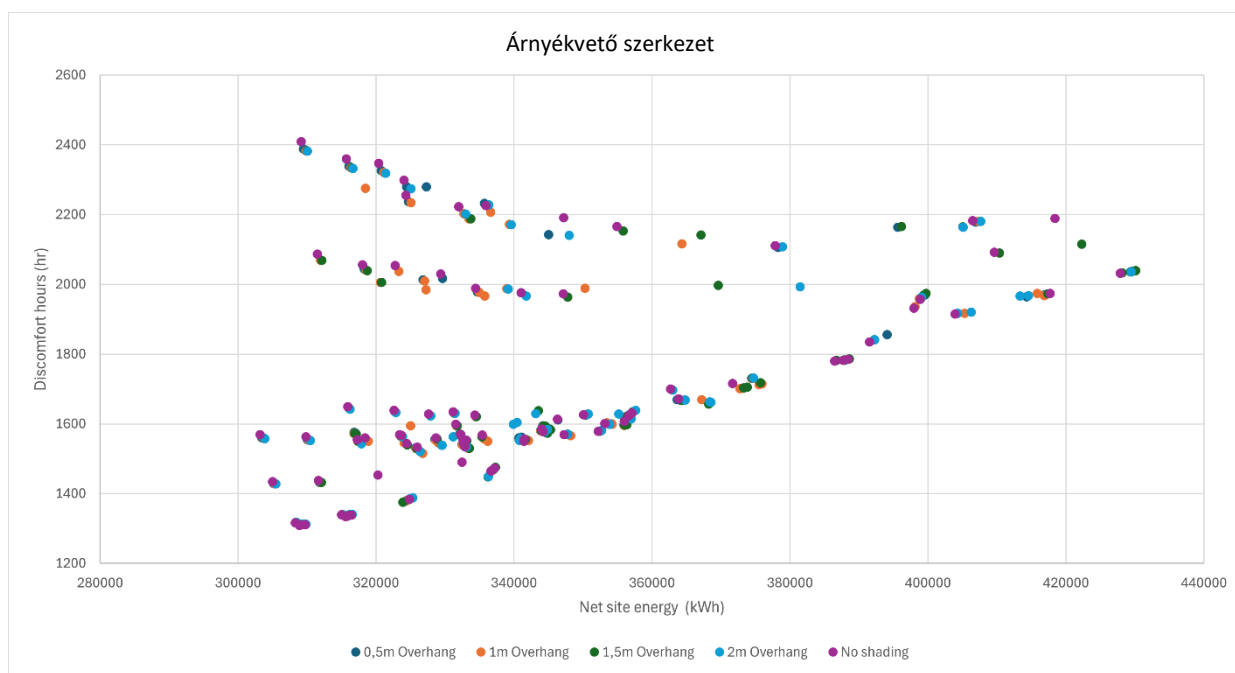
A 33. ábra szerint a nyílászáró megválasztása nagymértékben befolyásolja az épület energiafogyasztását. Hatékonysága jelentősen függ attól, hogy az épület melyik oldalára van leszigetelve. Ez a tendencia a 4 cm vastag szigetelés értékeknél figyelhető meg legjobban. Látható, hogy ugyanakkora szigeteléshez különböző nyílászárókat kiválasztva más energiafogyasztást kapunk. A legrosszabb nyílászáró típus a levegővel töltött dupla üvegű ablak, ezt követi a dupla üvegű argon gázzal töltött ablak, majd a tripla üvegű levegővel töltött ablak, tripla üvegű argon gázzal töltött ablak és végül a legjobb nyílászáró a modern elektokróm üveg. Látható még hogy az elektokróm üveget nem befolyásolja, hogy milyen árnyékolót választunk hiszen az elektokróm üveg egyfajta intelligens üvegtechnológia, amely képes váltani az átlátszó és átlátszatlan állapotok között az alkalmazott feszültségre reagálva. Több üvegrétegből áll, közöttük vékony elektokróm bevonattal [40].



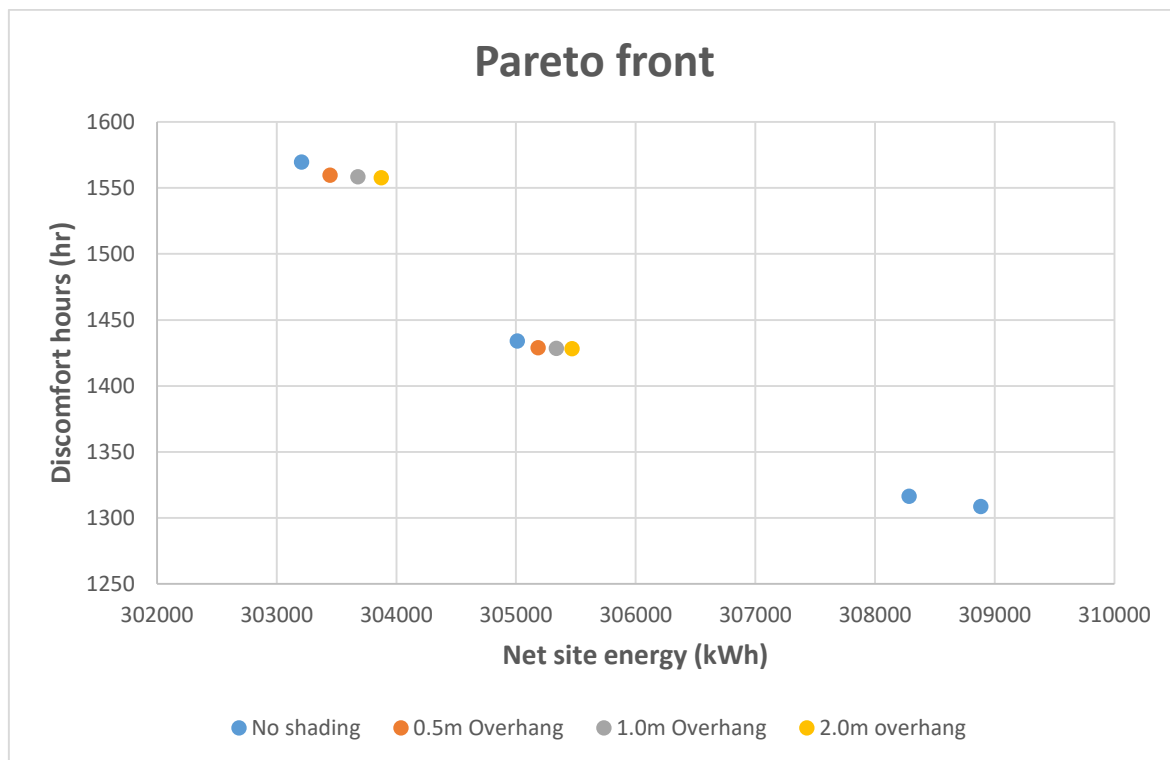
33. ábra: Optimalizáció eredménye a nyílászáró fajtájának függvényében

Árnyékvető szerkezet:

Első ránézésre semmilyen szabályosságot nem követ az árnyékvető szerkezet megváltoztatásának hatása [34. ábra]. Ahhoz, hogy észrevegyük az összefüggéseket egy közelebbi kép alapján kell megvizsgálnunk az opciókat.



34. ábra: Optimalizáció eredménye az árnyékvető szerkezet méretének függvényében



35. ábra: Pareto front az árnyékvető szerkezet méretének eloszlása szerint

A 35- ábrán a pareto frontot ábrázoltam és az árnyékvető szerkezetet színekre bontottam a mérete szerint. Ezek a pontok azért alkalmasak az elemzésre mert az egy csoportban lévő pontoknak az összes változója megegyezik kivéve az árnyékvető szerkezet nagyságát, így megvizsgálhatjuk, hogy milyen mértékben változnak az eredmények, ha csak az árnyékvető szerkezetet változtatjuk. Látható, hogy nem okoz szignifikáns nagymértékű változást a déli oldalon lévő árnyékvető. Ez betudható annak, hogy csak az épület egyik oldalára van elhelyezve, viszont ez még így is nagyon csekély mértékben befolyásolja a kimenetünket. Érzékelhető, hogy a 0,5 m árnyékvető használatával kissé csökken a diszkomfortos órák száma, ezzel együtt nő az épület energiafogyasztása. Ez nem meglepő, hiszen így kevésbé tud besütni a nap, ami miatt az épületet télen jobban kell fűteni. Amennyiben tovább növeljük az árnyékvető méretét úgy egyre több lesz az épület energiafogyasztása, viszont a diszkomfortos órák száma nem csökken szignifikánsan.

A 9. táblázat láthatóak a legoptimálisabb megoldások változónként. A homlokzat leszigetelésénél 24 cm-t kaptunk minden esetben a legoptimálisabbnak, az üvegezés típusánál pedig az elektokróm üveget. Az árnyékolásnál különböző eredményeket kaptunk. Valószínűsíthető, hogyha tovább futott volna a szimuláció akkor még több optimális megoldás születik. Az elektokróm üvegnek köszönhetően az optimális megoldásokhoz tartozik az az eset is, amikor nem használunk árnyékolást, illetve amikor a függönyöknek vékony a szövése és

könnyen átengedik a hőt. Ennek ellenére a diszkomfortos órák számában így is jelentős különbség érzékelhető az árnyékoló megválasztása során (lásd 4.3.2)

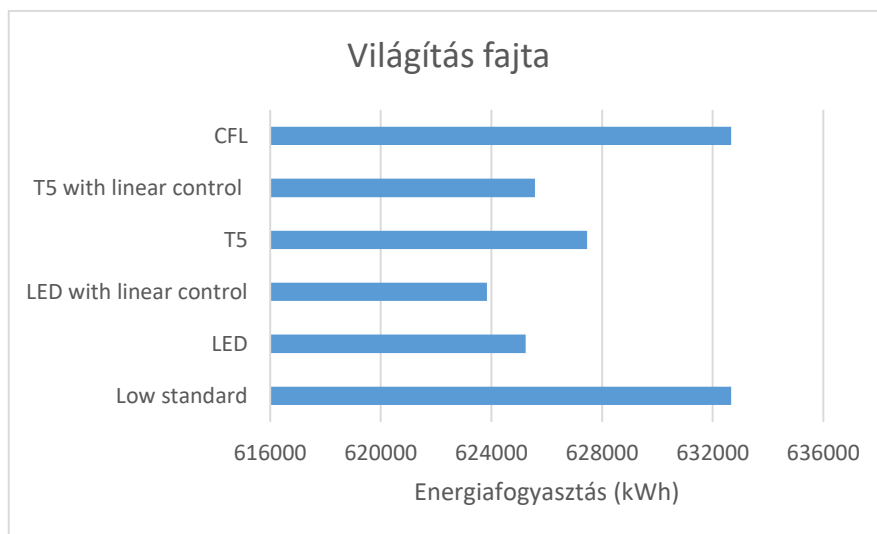
Net site energy consumption (kWh)	Discomfort CEN 15251 Cat I (hr)	External wall construction	Glazing type	Window blind type	Local shading type_D
303443.5295	1559.699999	24	SageGlass Climatop Classic SR2.0 No Tint	<None>	0.5m Overhang
303676.7238	1558.630175	24	SageGlass Climatop Classic SR2.0 No Tint	<None>	1.0m Overhang
303871.1718	1557.946506	24	SageGlass Climatop Classic SR2.0 No Tint	<None>	2.0m Overhang
303205.6583	1569.808743	24	SageGlass Climatop Classic SR2.0 No Tint	<None>	No shading
308284.631	1316.331819	24	SageGlass Climatop Classic SR2.0 No Tint	Blind with high reflectivity slats	No shading
305182.2015	1429.069006	24	SageGlass Climatop Classic SR2.0 No Tint	Drapes - open weave dark	0.5m Overhang
305335.3507	1428.505346	24	SageGlass Climatop Classic SR2.0 No Tint	Drapes - open weave dark	1.0m Overhang
305467.2553	1428.220349	24	SageGlass Climatop Classic SR2.0 No Tint	Drapes - open weave dark	2.0m Overhang
305008.5819	1434.225662	24	SageGlass Climatop Classic SR2.0 No Tint	Drapes - open weave dark	No shading
308882.7558	1308.696433	24	SageGlass Climatop Classic SR2.0 No Tint	High reflectance - low transmittance shade	No shading

9. táblázat: Optimális megoldások

4.4 További vizsgálatok

Világítás típusa:

Az érzékenységvizsgálat eredménye szerint a világítás az energiafogyasztásra volt hatással, így ennek a függvényében vizsgáltam. A futtatás eredményeképpen megkaptam, hogy a LED világítás a legalkalmasabb, ami lineáris kontrol szerint van irányítva. Az eredmények a 36. ábrán láthatóak.

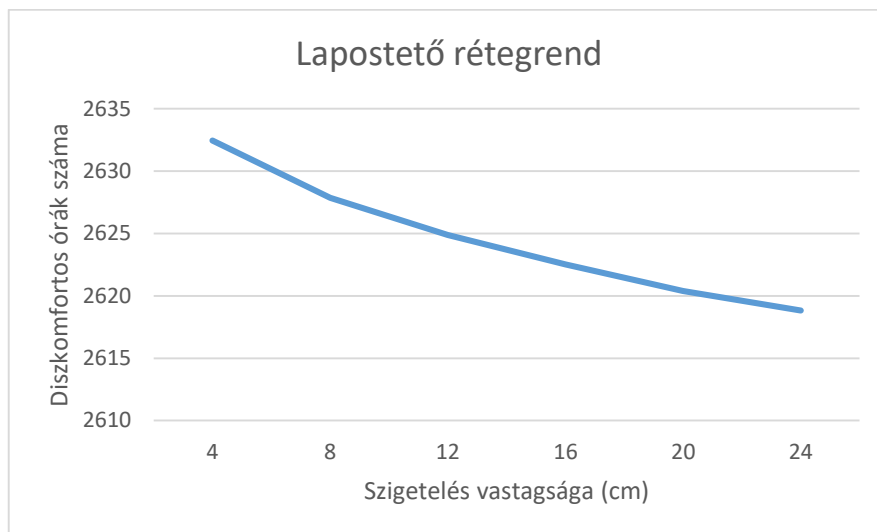


36. ábra: Világítás fajta

Lapostető szigetelése:

A tető szigetelés vastagságát a komfortos órák számának a függvényében vizsgáltam. A szigetelés vastagságát 4 cm-ként növeltem 24 cm-ig. A kapott értékek a 37. ábrán láthatóak. A legjobb megoldást a 24 cm hőszigetelésre kaptam, ami nem meglepő, viszont érdemes megfigyelni a görbét ami egyre jobban ellaposodik. Ez azt jelenti, hogy egyre vastagabb szigeteléssel tovább tudjuk csökkenteni a diszkomfortos órák számát, azonban a hatékonysága lecsökken. Érdemes tehát megkeresni azt a vastagságot, aminél még viszonylag sokkal tudjuk

csökkenteni a diszkomfortos órák számát és nem a legvastagabb szigetelést használni mert az gazdaságtalan.



37. ábra: Lapostető rétegrend

Ezeknek a további vizsgálatoknak köszönhetően kiválasztottam egy ideális felújítási alternatívát, amelyben az alábbiak szerint változtattam meg a modellt:

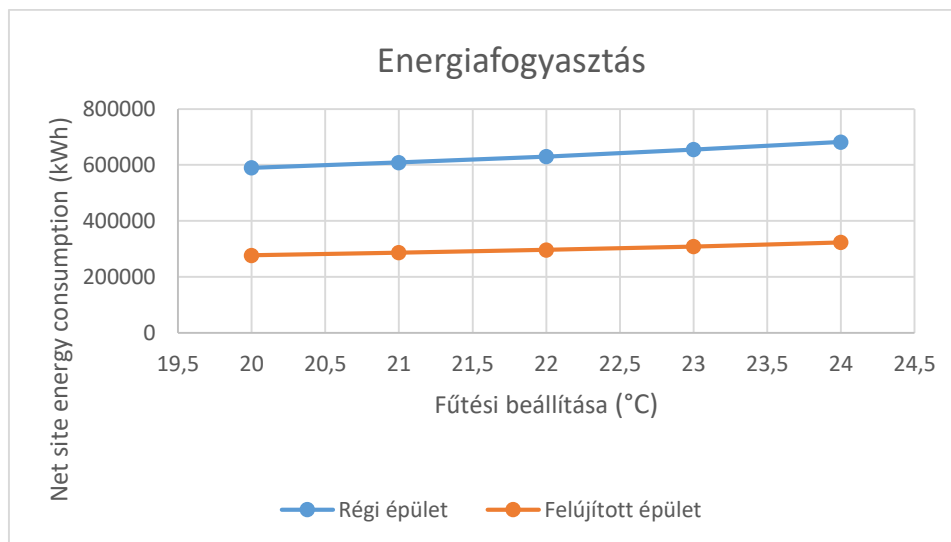
- Lapostető szigetelés vastagsága: 16 cm
- Világítás fajta: Led lineáris kontrollal
- Árnyékvető szerkezet: nincs
- Üvegezés típusa: Elektokróm üveg
- Homlokzat szigetelése: 24 cm
- Árnyékoló: redőny magas fényvisszaverő képességgel

A felújított scenáriót így össze tudtam hasonlítani a régivel.

4.5 Összehasonlítás eredmények:

Fűtés beállítások:

A panellakások köztudottan túl vannak fűtve télen, ezért tanulmányoztam, hogy mennyit csökkenne az épület energiafogyasztása ha más hőmérsékletre lenne beállítva a fűtés. A kapott eredmények alapján [38. ábra] a fűtés beállítása nagyon sokkal befolyásolja az épület energiafogyasztását. A kapott görbe egyre meredekebb, tehát az egyre melegebb beállításokhoz egyre több energiafogyasztás társul. A felújított épületnél sokkal kevesebbet kell fűteni, illetve a görbe kevésbé meredekebb. Emiatt a felújított épület energiafogyasztása nem annyira érzékeny a fűtés beállítására.

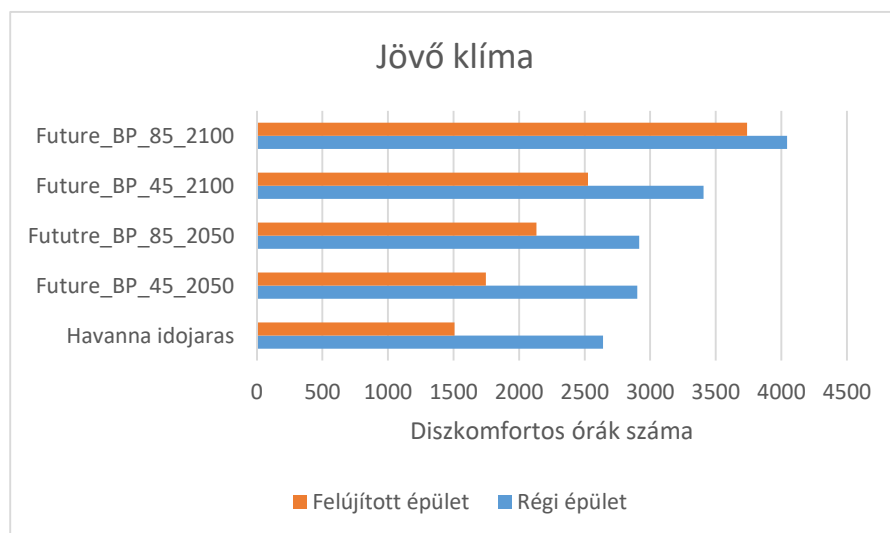


38. ábra: Fűtés beállítás

Jövő klíma modellek:

A diszkomfortos órák számát vizsgáltam 2050-ben és 2100-ban különböző az iparosodás (kb. 1765) előtti szinthez viszonyított sugárzási kényszer alakulásának függvényében [

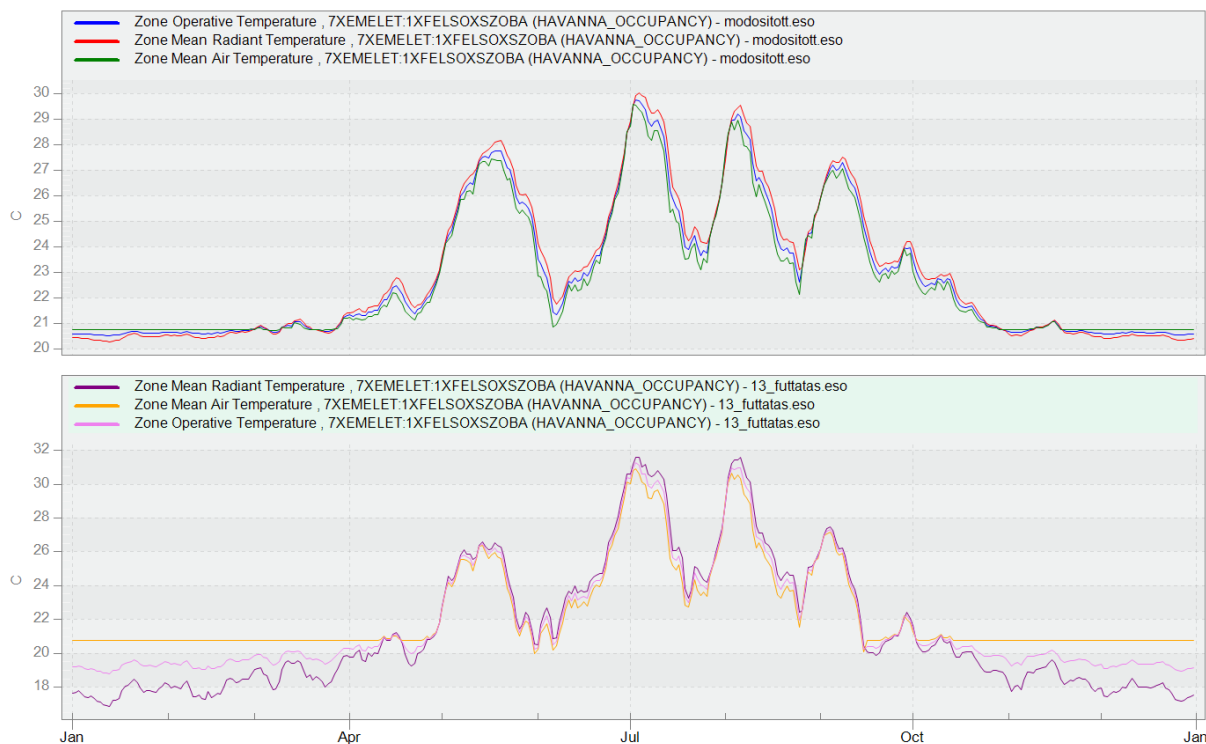
39. ábra]. A jelenlegi épület kék színnel, a felújított épület narancssárgával van jelölve. A „Havanna időjárás” a jelenleg használt időjárás fájl. Látható, hogy a mostani időjárást tekintve a diszkomfortos órák száma 2600-ról 1500-ra csökkenthető, ami igen jelentős változás. Az egyre rosszabb időjárás scenáriókat vizsgálva azonban a felújítással elérhető csökkentés egyre csekélyebb jelentőséggel bír. Emiatt kijelenthető, hogy csak passzív módszerekkel nem



lehetséges visszاسzorítani az épület nyári túlmelegedését.

39. ábra: Jövő klímamodellek a 2050-ben és 2100-ban az iparosodás előtti szinthez viszonyított sugárzási kényszer függvényében

A 40. ábrán látható a felújítás előtti és utáni levegő, sugárzó és operatív hőmérséklet összehasonlítása. A fűtési szezonban figyelhető meg a legjobban a felújítás hatása. Látható, hogy a nem felújított épület sokkal gyorsabban kihűl, az operatív hőmérséklet téli időszakban 20 fok alá esik. A felújított épületben ezzel szemben végig 20 fok feletti az operatív hőmérséklet télen.



40. ábra: Hőmérsékletek összehasonlítása felújítás előtt és után

5 Összefoglalás és megállapítások

A kutatás célja az volt, hogy részletesen megvizsgálja a különböző felújítási alternatívák hatását a panelépületek energiafogyasztására és a nyári túlmelegedés okozta diszkomfortos órák számára.

Az érzékenységvizsgálattal a modell bemeneti változóinak hatását értékeltem. Ennek célja az volt, hogy azonosítsa a kritikus tényezőket, amelyek jelentős mértékben befolyásolják a modell kimenteleit. Ez a lépés nagyon fontos, mivel a felesleges vagy kevésbé fontos változók kiszűrésével az optimalizációs folyamat hatékonyabbá és gyorsabbá vált. Az optimalizáció során 4 féle felújítási alternatívát vizsgáltam, figyelembe véve azok hatását az épület energetikai teljesítményére és a hőkomfort javítására.

- Energiafogyasztás csökkentése: Az optimalizációs elemzések kimutatták, hogy a megfelelő szigetelés alkalmazása, különösen a külső falak esetén, kulcsfontosságú az energiafogyasztás csökkentésében.
- Diszkomfortos órák csökkentése: A felújítási megoldások közül az árnyékolás a nyári túlmelegedés szempontjából kiemelkedő fontosságú volt. Az optimalizációs vizsgálat eredménye szerint a diszkomfortos órák száma akár 50%-al, 2640 órától akár 1308 órára csökkenthető
- A D-i tájolású árnyékvető szerkezetek használata nem javasolt ugyanis kevésbé hatékony.
- Üvegezés: az üvegezés korszerűsítése nagyban hozzájárul az energiafogyasztás csökkentéséhez. A modern elektokróm üveg pedig nagymértékben csökkenti a diszkomfortos órák számát.
- A hőszigeteléssel jobb lesz a fűtés hatékonysága, ugyanis a sugárzási hőmérséklet megnő, aminek köszönhetően az operatív hőmérséklet magasabb lesz ugyanakkora fűtés esetén.

A kutatást a későbbiekben érdemes lehet kiegészíteni további költségelemzésekkel, amely megmutatná, hogy mely felújítási opciók nyújtják a legkedvezőbb arányt, ezzel még inkább támogatva a döntéshozók és lakók számára a legoptimálisabb felújítási terv kiválasztását, továbbá érdemes elemezni az épület viselkedését olyan esetekben is, amikor a lakások hűtéssel vannak felszerelve.

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni konzulenseimnek Dr.Szalay Zsuzsa egyetemi docensnek, Szagri Dóra doktorandusznak, hogy a kutatás alatt segítették a munkámat, hasznos szakmai tanácsokkal láttak el. Köszönöm szépen a VPKnet körnek hogy megengedték hogy a szervereiken futtassam a szimulációkat.

Irodalomjegyzék

- [1] European Commission (2020) In focus: Energy efficiency in buildings, 2024.11.02., Available at: https://commission.europa.eu/news/focus-energy-efficiency-buildings-2020-02-17_en
- [2] European Commission Building and construction, 2024.11.01., Available at: https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/buildings-and-construction_en
- [3] Csoknyai Tamás (2022) A magyarországi lakóépület-állomány energetikai modellezése, a korszerűsítés lehetőségei, MTA doktori értekezés, Budapest,
- [4] Egedy Tamás (2006) 'A városrehabilitációs stratégiák szerepe az épület-és lakásállomány megújulásában', Tér és Társadalom ., vol.20, no. 1, pp. 37-56
- [5] I. Szécsi, Z. Koritár, A. Pálffy, F. Dr. Sáfián, (2021) Hazai felújítási hullám,
- [6] REPLAN (2015) Paneltörténelem Magyarországon, 2024.10.29., Elérhető: https://replankutatas.blog.hu/2015/03/25/paneltortenelem_magyarorszagon
- [7] RITKÁN LÁTHATÓ TÖRTÉNELEM (2020) 60 éve panel, 2024.11.07., Elérhető: 60 éve panel - https://ritkanlathatotortenelem.blog.hu/2020/10/08/60_eve_panel
- [8] Csoknyai Tamás (2004) Iparosított technológiával létesített lakóépületek energiatudatos felújítása
- [9] Európai Tanács az Európai Unió Tanácsa (2024) Az éghajlatváltozásról szóló Párizsi Megállapodás, 2024.11.02., Elérhető: <https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/paris-agreement-climate/>
- [10] Európai Tanács az Európai Unió Tanácsa (2024) Az európai zöld megállapodás, 2024.11.02., Elérhető: <https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/green-deal/>
- [11] Európai Tanács az Európai Unió Tanácsa (2024) Irány 55% , 2024.11.01., Elérhető: <https://www.consilium.europa.eu/hu/policies/fit-for-55/>
- [12] Európai Parlament és Tanács (2024) Az Európai Parlament és a Tanács (EU) 2024/1275 irányelve az épületek energiahatékonyságáról, 2024.09.14., Elérhető: Irányelv - EU - 2024/1275 - EN - EUR-Lex
- [13] Európai Parlament (2024) Revision of the Energy Performance of Buildings Directive, Available at: Revision of the Energy Performance of Buildings Directive | Think Tank | Európai Parlament
- [14] Európai Parlament (2024) Energiahatékony épületek: a Parlament elfogadta a kibocsátáscsökkentési terveket, 2024.09.18., Elérhető: Energiahatékony épületek: a Parlament elfogadta a kibocsátáscsökkentési terveket | Hírek | Európai Parlament
- [15] NASA Earth Observatory (2020) World of Change: Global Temperatures, Available at: World of Change: Global Temperatures

- [16] HungaroMet (2017) Hőhullámok: ami ma szélsőséges, az a jövőben valószínűleg átlagos lesz
2024.10.12., Elérhető: Hőhullámok: ami ma szélsőséges, az a jövőben valószínűleg átlagos lesz - Tanulmányok - met.hu
- [17] HungaroMet (2022) Hőhullámok Magyarországon, 2024.10.12., Elérhető: Hőhullámok Magyarországon - Tanulmányok - met.hu
- [18] Megyeri-Korotaj Otília, Bán Beatrix, Suga Réka, Országos Meteorológiai Szolgálat (2022) A REMO2015 és az ALADIN5.2 regionális klímamodellek projekciós eredményeinek közös kiértékelése
- [19] ANSI/ASHRAE Standard 55 (2004): Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy
- [20] DesignBuilder Help, Simplified ASHRAE 55-2004 Graph Related Outputs, 2024.10.29., Available at:
https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/index.htm#Comfort_Analysis.htm?Highlight=ASHRAE
- [21] European Committee for Standardization(CEN) (2019), MSZ EN 16798-1, Energy performance of buildings-Ventilation for buildings
- [22] Hrabovszky-Horváth Sára (2015), Az energiatudatos panel-rehabilitáció klímastratégiai aspektusai
- [23] Dr. OsztróLuczky Miklós, Dr. Csoknyai Tamás (2006) Panelépület felújítás passzív ház technikákkal, Építészforum, 2024.11.07., Elérhető:
<https://epiteszforum.hu/panelepulet-felujitas-passzivhaz-technikakkal>
- [24] Dr. Magyar Zoltán, Baráth Géza (2015) Panel lakóépületek komplex energetikai felújítása, a Magyar Mérnöki Kamara Épületgépészeti Tagozatának lapja, 2024.09.26., Elérhető: Panel lakóépületek komplex energetikai felújítása
- [26] Zhichao Wang, Xiaoyu Liu, Gaofeng Deng, Hui Shen, Zhaowei Xu, (2021), A framework for retrofitting existing houses to nearly zero energy buildings: Development and a real-life case study, Energy and Buildings,. vol.252, no. 111438, 2024.11.02., Available at:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821007222>
- [25] Farzad Mostafazadeh, Saeed Jalilzadeh Eirdmousa, Mehdi Tavakolan, (2023), Energy, economic and comfort optimization of building retrofits considering climate change: A simulation-based NSGA-III approach, Energy and Buildings,. vol.280, 2024.11.02., Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778822008921>
- [27] Maria Panagiotidou, Lu Aye, Behzad Rismanchi, (2021), Optimisation of multi-residential building retrofit, cost-optimal and net-zero emission targets, Energy and Buildings,. vol.252, 2024.11.02., Available at:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821006691>
- [28] Candi Citadini de Oliveira, Igor Catão Martins Vaz, Enedir Ghisi, (2024), Retrofit strategies to improve energy efficiency in buildings: An integrative review, Energy

- and Buildings,. vol.321, 2024.11.02., Available at:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778824007400>
- [29] Carlos Rubio-Bellido, Alexis Pérez-Fargallo, Jesús A. Pulido-Arcas, (2016), Optimization of annual energy demand in office buildings under the influence of climate change in Chile, *Energy and Buildings*, . vol.114, pp. 569-585, 2024.11.02., Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216311240>
- [30] Szagri Dóra, Dobszay Bálint, Nagy Balázs, Szalay Zsuzsa (2022) Wireless Temperature, Relative Humidity and Occupancy Monitoring System for Investigating Overheating in Buildings, *Sensors*, 2024.11.03., Available at:
<https://doi.org/10.3390/s22228638><https://www.mdpi.com/1424-8220/22/22/8638>
- [31] DesignBuilder Software (2021) Uncertainty and Sensitivity Analysis Simplify and Speed up Optimisation Studies 16.July 2024.11.07., Available at:
https://www.youtube.com/watch?v=tjPQTRKqb_A
- [32] DesignBuilder Software (2021) Design Optimisation Making Rigorous Cost Benefit Simulations a Reality 16.July. 2024.10.23., Available at:
<https://www.youtube.com/watch?v=PBjRSoAcmIE&list=PLPU58tWB1sVvicdfeaSh2cTMAaRLNBfVb>
- [33] Dr. Aradi Petra, Graff József, Dr. Lipovszki György (2014) Számítógépes szimuláció, Optimum kereső szoftverek, 2024.10.29., Elérhető:
https://www.mogi.bme.hu/TAMOP/szamitogepes_szimulacio/math-ch05.html
- [34] DesignBuilder Software (2021) Optimizing an Eco Friendly House Design using DesignBuilder , 16.July, 2024.10.29., Available at:
<https://www.youtube.com/watch?v=rjCtu0dvE5k&t=1352s>
- [35] Intergovernmental Panel on Climate Change (2023) Climate change 2023 Synthesis Report, Summary for policymakers, 2024.11.06., Available at:
https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf
- [36] U.S Enviromental Protection Agency (2024), Learn about heat islands, 2024.11.06., Available at: <https://www.epa.gov/heatislands/learn-about-heat-islands>
- [37] Szlávik Tibor (1984) Statikai számítások, A Bp. XVIII. ker. Havanna út 1-13 árkádbeépítéséhez „C” szekció, Budapest
- [38] Nemzeti Jogszabálytár (2023) 9/2023.V.25. ÉKM rendelet az épületek energetikai jellemzőinek meghatározásáról, 2024.11.06., Elérhető: <https://njt.hu/jogszabaly/2023-9-20-8X>
- [39] DesignBuilder Help, Uncertainty and Sensitivity Analysis, 2024.11.07., Available at:
<https://designbuilder.co.uk/helpv7.0/Content/UASA.htm>
- [40] IQGlass, What is electrochromic glass and how does it work? 2024.11.07., Available at: <https://www.iqglassuk.com/technical-advice/what-is-electrochromic-glass-and-how-does-it-work/s144078/>