



PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Energia Design Szintézis – Az Energia Design módszertan kiterjesztése
algoritmikus geometria generáló és predikciós modellek felhasználásával

Doktori értekezés

Horváth Kristóf Roland

Pécs

2021

A doktori iskola megnevezése:

Breuer Marcell Doktori Iskola

tudományága: Építészet

vezetője: Prof. Dr. Bachmann Bálint
egyetemi tanár
PTE, MIK

témavezető: Prof. Dr. Kistelegdi István
kutató professzor
PTE, MIK

Dr. Háber István Ervin
adjunktus
PTE, MIK

.....
a iskolavezető jóváhagyása

.....
a témavezető jóváhagyása

Tartalomjegyzék

Jelölésjegyzék.....	5
1. Bevezetés és célkitűzések.....	6
1.1. A témakör jelentősége.....	6
1.2. Célkitűzés: Energia Design Szintézis épületoptimalizálási módszer.....	7
2. Szakirodalmi áttekintés.....	9
2.1. Bevezetés – a jelenlegi helyzet –problémák és azok okai.....	9
2.1.1. Épülettervezés kutatás, beleértve az épület alakjának módosítását eset változatok létrehozása érdekében (korlátozott geometriával kapcsolatos tervezési változókkal).....	15
2.1.2. Épülettervezés kutatás, beleértve az épületformák generálását eseti változatok létrehozásához.....	16
2.1.3. Épülettervezés optimalizációs kutatás az alapvető épületforma-módosítások felhasználásával eseti változatok létrehozásához.....	17
2.1.4. Épülettervezés optimalizációs kutatás a fejlett épületforma-módosítás alkalmazásával esetváltozatok létrehozására.....	20
2.1.5. Épülettervezés optimalizációs kutatás, beleértve az épületformák generálását az eseti változatok létrehozásához.....	23
2.1.6. Következtetések.....	23
2.2. Algoritmusok a épületgeometriai tervezési változóknak, beleértve a épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációt is.....	32
2.2.1. Az algoritmusok szerepe az építészeti tervezés optimalizálásában.....	34
2.2.2. Optimalizációs platformok (eszközök): white box, black box, grey box.....	36
2.2.3. Épületek teljesítményértékelési modelljei:.....	37
2.2.4. Szintézis az építészeti optimalizációban.....	38
2.2.5. Többváltozós lineáris regresszió alkalmazhatósága az épületfizikai optimalizálásban.....	39
2.3. A szakirodalmi feldolgozás áttekintő értékelése.....	40
3. Energiatervezési szintézis: az épületkonfigurációk algoritmikus előállítás.....	44
3.1. Bevezetés.....	44
3.2. Alapvető megjegyzések.....	44
3.3. Építészeti tervezési szabályok.....	46
3.4. Generáló módszer.....	46
3.5. A követelményeknek való megfelelés.....	48
3.6. A kötegek azonosítása.....	51
3.7. Eredmények és következtetések.....	54
4. Szimulációs adatbázis-fejlesztés, amely támogatja az épületek optimalizálását.....	55
4.1. Bevezetés.....	55

4.2. Geometriai konfigurációk tulajdonságai	55
4.3. Épületmodell-generálás	56
4.4. Szimulációs módszer	58
4.5. Eredmények és épületfizikai összefüggések ismertetése.....	60
4.6. Következtetés	63
5. Érzékenyég vizsgálat.....	64
6. Többváltozós lineáris regresszió alkalmazhatósága az épületfizikai optimalizálásban.....	69
6.1. Bevezetés.....	69
6.2. Alapadatok és peremfeltételek	69
6.3. Az épületgeometria leíró változói épületgeometriai tervezési változók:.....	71
6.4. Gépi tanulás.....	72
6.5. Lineáris regresszió.....	73
6.6. Hipotézis.....	73
6.7. Modell kialakítás	73
6.8. Modell értékelése	74
6.9. Közelítési eredmények	75
6.10. Nemlineáris regresszió	76
6.11. Eredmények.....	76
6.11.1. Közelítési pontosság.....	76
6.12. Anomáliapontok vizsgálata	78
6.12.1. Lineáris regressziós együtthatók vizsgálata	79
6.13. Következtetés	80
6.14. Továbbfejlesztés.....	80
7. Végő következtetések, összefoglalás	80
8. Eredmények.....	81
9. Mellékletek.....	83
9.1. Táblázatok	83
9.2. Irodalomjegyzék.....	95
9.3. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk	104
10. Köszönetnyilvánítás	104

Jelölésjegyzék

	angol névjegyzék	magyar névjegyzék
AC	Air-Conditioning	léghőszabályozás
ACH	Air Change	légsere
ADV	Active Design Variable	aktív tervezési változó
AEC	Architecture, Engineering and Construction	Építészet, mérnöki és építőipar
ANN	Artificial Neural Network	mesterséges neurális hálózat
ANOVA	Analysis of Variance	varianciaelemzés, eltérés elemzés
AR	Aspect Ratio	alaprajzi arány
BIPV	Building Integrated Photovoltaic	épületbe integrált fotovoltaiikus
BMC	Building Modular Cell	moduláris épület cella
BOP	Building Optimization Problem	épület optimalizálási probléma
CFD	Computational Fluid Dynamics	numerikus áramlástan
CMA-ES	Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy	kovariancia mátrix adaptációs evolúciós stratégia
DAE	Differential-Algebraic Equation	differenciálalgebrai egyenletrendszer
DF	Daylight Factor	nappali fény tényező
DHW	Domestic Hot Water	használati melegvíz
DOE	Design Of Experiments	kísérlettervezés
EA	Evolutionary Algorithm	evolúciós algoritmus
EEF	Efficient Form-finder	Hatékony formakereső
EPSAP	Evolutionary Program for Space Allocation Program	Evolúciós program a helyelosztási programhoz
ES	Evolution Strategy	evolúciós stratégia
EUI	Energy Use Intensity	energiafelhasználás intenzitása
GA	Genetic Algorithm	genetikai algoritmus
GH	GrassHopper	grasshopper szoftver (szöcske)
GBM	Gradient Boosting Machine learning	gradiens-növekvő gépi tanulás
GR	Glazing Ratio (e.g. wall-window ratio)	üvegezési arány
GSA	Global Sensitivity Analysis	globális érzékenységi elemzés
GUI	Graphic User Interface	grafikus felhasználói felület
HDE	Hybrid Differential Evolution	hibrid differenciális evolúció
HJ	Hooke-Jeeves	algoritmus neve, mintakereső algoritmus
HVAC	Heating, Ventillation, and Air Conditioning	fűtés, szellőzési és léghőszabályozó
LCC	Life Cycle Cost	élekciklusköltség
LCCA	Life Cycle Cost Assessment	élekciklusköltség-elemzés
LCEI	Life Cycle Energy Impact	élekciklusra gyakorolt energiahatás
MDO	Multidisciplinary Design Optimization	multidiszciplináris tervezési optimalizálás
MO	Multi-Objective	többcélú
MOGA	Multi-Objective Genetic Algorithm	többcélú genetikai algoritmus
MOO	Multi-Objective Optimization	többcélú optimalizáció
N, NE, E, SE, E, SW, W, NW	North, North-East, East, South-East South, South-West, West, North-West	észak, észak-kelet, kelet, dél-kelet dél, dél-nyugat, nyugat, észak-nyugat
NSGA	Non-dominated Sorting Genetic Algorithm	nem dominált rendező genetikai algoritmus
NV	Natural Ventilation	természetes szellőzés
ORI	ORIENTATION	tájékolás

PDV	Passive Design Variable	passzív tervezési változó
PEC	Primary Energy Consumption	primerenergia-fogyasztás
PSO	Particle Swarm Optimization	részecske raj optimalizálás
RC	Relative Compactness	relatív tömörség
SA	Simulated Annealing	szimulált izzítás
sDA	spacial Daylight Autonomy	területi napfény-autonómia
SF	Shape Factor	alaktényező
SHADE	shading	árnyékolás
SHC	Stochastic Hill Climbing	sztochasztikus hegy mászás (matematikai optimalizációs módszer)
SHGC	Solar Heat Gain Coefficient	napenergia-hőnyereség együttható
SO	Single-Objective	egycélú
STR	Structures, materials	szerkezetek, anyagok
TDT	Thermal Discomfort Time	termikus diszkomfort idő
TM	Thermal Mass	hőtároló tömeg
UDI	Useful Daylight Illuminance	hasznos nappali megvilágítás
UDV	Urban Design Variable	városi tervezési változó
WWR	Window to Wall Ratio	fal-ablak arány

1. Bevezetés és célkitűzések

1.1. A témakör jelentősége

Az energiaellátás bizonytalansága, az alacsony energiahatékonyság és a komfortteljesítmény, valamint az építőipar által okozott negatív környezeti és éghajlati hatások következtében a fenntartható épületek a kutatás egyik legjobban vizsgált területévé váltak. Mivel maga a tervezési technika felelős a megépítendő épület teljesítményéért, különös figyelmet fordítunk az épületenergetikai tervezés optimalizálására, mint az elmúlt két évtized döntő területére. Számos tanulmány a HVAC rendszer, az üzemeltetés és a vezérlés optimalizálására összpontosít, amelyet különféle passzív tervezési stratégiák további vizsgálata egészít ki, különös tekintettel a burok fő tervezési változóira, például a fal-ablak arányra, a tájolásra, az anyagokra és a szerkezetekre [1], valamint az árnyékolásra [2]. Épületfizikával kapcsolatos szempontok szerint az épület alakja is elengedhetetlenül fontos, mivel meghatározó hatással bír az energiateljesítményre. Az épületgeometriát a tervoptimalizálási keretrendszerbe integráló tudományos munkák többsége azonban csak térszervezést dolgoz ki energiaoptimalizálás nélkül, vagy több burkolat paramétert számol (pl. A falak és az ablakok termodinamikai és fotometriai tulajdonságai), párosítva az egyszerűsített térgeometriák hosszának, mélységének, magasságának vagy oldalarányának alapvető változóival. Számos áttekintő tanulmány rendszerezi az energiahatékony épülettervezési kutatást az optimalizálási algoritmusok, az építési területek, a tervezési változók, történeti fejlődése szempontjából, valamint az algoritmus-rendszer teljesítményének és a szoftver keretrendszerének elemzését. Jelenleg nincs áttekintő elemzés az épületgeometria mint tervezési változó rendszer besorolásáról, szerepéről és korszerű teljesítményéről az épületenergia-tervezés optimalizálásában. Megállapítható, hogy az épületgeometria egy ígéretes tervezési változók csoportját foglalja magában az optimalizálási folyamatban, azonban vannak hiányosságok a teljes épületgeometriai rendszerek átfogó, szisztematikus energiával és komforttal kapcsolatos generálásában, ezért további kutatásokra van szükség.

Értekezésemben az ily módon kimutatott problémákra első lépésként egy létező módszertan továbbfejlesztésére teszek javaslatot, mely abban nyilvánul meg, hogy az Energia Design vizsgálandó épület eseteinek számát több nagyságrenddel megnövelem és szimulációs folyamatokat kiváltom egy

gyorsabb, helyettesítő módszerrel. Így megteremtem a feltételeit többcélú optimalizációs algoritmusok alkalmazására és egy későbbi öntanuló folyamat elindítására, mely tökéletesíteni fogja remélhetőleg eddigi megfigyeléseinket.

A különböző építészeti szabályok és további szimulációs illetve kiértékelési módszerekhez, érzékenységvizsgálatokhoz kapcsolódó peremfeltételek meghatározása lehetővé teszi, hogy az adott feltételeknek megfelelő körülmények között megtaláljuk a garantáltan optimális épület esetet, eseteket.

1.2. Célkitűzés: Energia Design Szintézis épületeoptimalizálási módszer

A mai hagyományos épülettervezési módszer a heurisztikus tapasztalatokon alapuló folyamat miatt nem eléggé összpontosított az energiaoptimalizált teljesítményre. A hagyományos épülettervezésben az általános gondolkodásmód figyelmen kívül hagyja az épületgeometriát, mint az egyik legintegráltabb változót a tervezési szakaszban, ők is csak néhány forgatókönyvet vesznek figyelembe, a tapasztalatok alapján hoznak döntést. Az Energia Design (ED) módszer rendszerezettebb/szabályozottabb, és létrehozta a keretet a tervezési folyamathoz, több fogalmat felhasználva az energetikai teljesítményre, valamint az egyszerűsített számításokra és a szimuláción alapuló döntéshozatalra. Új módszer létrehozására azért volt szükség, mert a szabványok nem átfogóak és nem kielégítőek a komfortos, energiatakarékos épületek, így a környezettudatos és fenntartható jövő megteremtéséhez.

Az Energia Design módszer szolgál a kutatás kiindulópontjaként, létrehozva egy új építészeti épülettervezési módszert, amely algoritmikus lépésláncból áll, mint tervezési döntés. Komplex, hő- és folyadékmechanikai épületszimulációk, valamint szélcsatornás kísérletek támogatják a lépéseket az energia-pozitív épületterv létrehozása érdekében. Az ezzel a módszerrel megvalósított épületek teljesítik a várt energiahatékonyságot, és több zöld díjjal jutalmazták őket (Holcim-díj, Aktív Ház-díj, Energy Globe Magyarország-díj). A módszer 2015-ben megkapta a rangos Gábor Dénes-díjat a tudományos mérnöki innovációért és annak gyakorlati megvalósításáért. Az Energia Design Szintézis (EDS) módszer az ED továbbfejlesztett változata, amely az átfogó megoldás biztosítására és a garantált optimális épület fejlesztésére törekszik. A létrehozott konfigurációs skála és a bevezetett moduláris rendszer egy valódi díjnyertes aktív házra épült. Ez egy tudatos döntés volt, mivel így lehetőség nyílt a későbbi validációs lépések biztosítására egy épületfigyelő rendszer mért adatainak segítségével. Ez a tény továbbá a 80% -os energiatakarékoság alapját képezi a passzív tervezési elemek felhasználásával [3], [4], [5]. Jelen disszertáció összesen 5010 szimulációs esetet mutat be, amelyeket kiértékeltem és átalakítottam az érzékenységvizsgálati folyamat megfelelő formájába.

Az EDS magában foglalja a hatékony szabályok létrehozását a tervezési cél megvalósítható és lehetséges eseteinek felderítésére a mintavétel mennyiségének minimalizálásával, és ezáltal a számítási idő költségének minimalizálásával. Az energia és a komfort teljesítményének előre meghatározott, több felhasználói preferenciája szerint ez a módszer azonosítja az optimális megoldást. Ezenkívül sorrendben meghatározza a különféle n-legjobb megoldásokat is. Egy konkrét épületprobléma (tervezési feladat) szemlélteti a módszert az alapvető funkcionalitás érvényesítése érdekében. A tervezési feladat (függvény) meghatározása után meg kell határozni a különféle paramétereket, például helyet (földrajz), éghajlatot, méreteket (nettó alapterület). Az alapterület nagyságát megállapították, hogy hasonló legyen egy meglévő, felújított családi aktív házhoz, amelyet ED módszerrel terveztek, és épületfelügyeleti rendszer (Building Monitoring System, BMS) figyelemmel kísér.

Már az Energia Design módszerrel tervezett épületek is nem csak az aktuális energetikai és környezetvédelmi előírásoknak felelnek meg, hanem általánosan kijelenthető, hogy képesek energia pozitív üzemeltetésre és kimagasló mértékű komfort érzet biztosítására, továbbá a felhasznált anyagok által az épület környezeti lábnyomának minimalizálása is cél. Minden ezzel a módszerrel tervezett épület térszervezése, formai és szerkezeti tulajdonságai elsődleges szerepet kap a tervezés folyamán. Ugyanakkor a környezeti változásokra gondolva is a gépészet a lehető legnagyobb arányban igyekszik megújuló energiaforrásokat használni.

Ebből következik, hogy az Energia Design Szintézis módszer az említett szempontokat figyelembe véve az Energia Design módszernél is jobb eredményeket lesz képes biztosítani.

A fenti célok, pontokba szedve és részletezve, az alábbiak:

A doktori disszertációmban fel kívánom tárnai az építészeti tervezési folyamat során az energetikai és komfort (és ökológiai) optimum garantálásának feltételeit. A szakirodalom tanulmányozása után ezeket a feltételeket a nagy léptékű adatbázis létrehozásával, érzékenységvizsgálat elvégzésével, az adatbázis méreteinek kiterjesztésével és generálásának gyorsításával látom biztosítottnak. Ezen adatbázis ilyen módon történő létrehozása elengedhetetlen a gépi tanuláshoz, és az érzékenységvizsgálat a hatásmechanizmusok részletes feltérképezéséhez. (A gépi tanulás és a további vizsgálatok, szabályok rendszerbe foglalásában, és egy iterációs folyamatba integrálásában látom jelenleg a legnagyobb potenciált egy ilyen több célú optimalizáció kivitelezéséhez.

Az Energia Design módszer nem tudja biztosítani a garantált optimális épület megtalálását, mert korlátozott idő és munka ráfordítás mellett nem lehetséges az összes potenciális épület eset vizsgálata. Így az Energia Design módszer tovább fejlesztéséhez egy szimulációs adatbázis megalkotását tűztem ki célul, annak érdekében, hogy bővítsem a rendelkezésre álló potenciálisan optimális esetek számát ezzel biztosítva az optimális megoldás beazonosítását. Egy nagyszabású adatbázis kifejlesztése folyamán lehetséges a szimulációk idő és erőforrás igényes folyamatának kiváltása predikciós technikával.

A szakirodalom alapos vizsgálata után megállapítható, hogy a mostani kutatásokban felfedezhető az átfogó, teljes optimalizáció hiánya. További áttekintő elemzés készítése is célként volt kitűzve az épületgeometria mint tervezési változó rendszer besorolásáról, szerepéről és korszerű teljesítményéről az épületenergia-tervezés optimalizálásában, mivel az épületgeometria egy ígéretes tervezési változók csoportját foglalja magában és a szakirodalom nem tulajdonítanak kellő szerepet ennek a tervezési aspektusnak, azaz további kutatásokra van szükség ezen a területen.

1. Annak érdekében, hogy az optimalizáció szempontjából garantáltan az összes potenciális épület geometria előállításra kerüljön, elengedhetetlen a megfelelő mennyiségű és minőségű szabályok megalkotása. Az épület geometriák előállítását biztosító algoritmus pontos és hatékony működéséhez, építészeti szabályrendszer megalkotására és alkalmazására van szükség, mely a kezelhetetlenül nagy számú geometriák keresési terét szűri és szűkíti. A szabályrendszer működéséhez és a geometriai variációk generálásához egy moduláris rendszer megalkotása és egy koordinátarendszer alkalmazása is elengedhetetlen.

2. Az épület modellek kellő számú geometriai variációja biztosíthatja a szükséges számú szimulációs modell elkészítését. A geometriai esetek előállítását egy backtracking elvű generáló algoritmus végezheti el a leghatékonyabban.
3. A keresési tér megfelelő megismeréséhez és a regressziós- helyettesítő modell tanító és ellenőrző adatbázisának előállításához, vagyis az összes fontos kimeneti paraméter értékének kiszámításához több ezer épület eset termikus és fény szimulációjának elvégzésére van szükség.
4. Érzékenységvizsgálat elvégzésére van szükség, ahhoz hogy a vizsgált keresési térben kiválasztásra kerüljenek a legfontosabb bemeneti paraméterek. Ilyen módon sikerült megerősíteni azt, hogy geometriai konfigurációk szerepe meghatározó a kimenetek szempontjából.
5. A szimulációkat helyettesítő modell megalkotásához, a bemenő (geometriát leíró) és kimeneti paraméterek (szimulációs eredmények) listáját úgy kell összeállítanom, hogy (az egyes geometriák azonosíthatóak legyenek) minden fontos geometriai leíró paramétert és fontos, azaz az optimalizációban előre láthatóan nagy befolyással bíró körülményt tartalmazzon

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1. Bevezetés – a jelenlegi helyzet – problémák és azok okai

Az építőipar, a világ legnagyobb energiafogyasztó ágazata a világ végső energiafogyasztásának több mint 40%-áért felelős [6]. Az épületek és az építőipar globális helyzetéről szóló 2019. évi jelentés arra figyelmeztet, hogy az építőipar nincs összhangban az Egyesült Nemzetek Szervezetének (ENSZ) fenntartható fejlődési céljaiban (SDG-k) foglalt elkerülhetetlen éghajlati célkitűzésekkel, miközben az épületállomány 2050-ig megduplázódik [7]. A világ teljes végső energiafelhasználásának mintegy 70%-át fosszilis tüzelőanyagokból fedezik. A végső energiafelhasználás kb. 44%-a és a CO₂-kibocsátás 40%-a az épületek építése és üzemeltetése során keletkezik [7],[8], és az irodai és lakóépületek üzemeltetési fogyasztásának kb. 50%-át fűtésre, hűtésre, szellőzésre és légkondicionálásra fordítják [6], [9]. Ráadásul ezek a statisztikák még mindig növekednek, és az előrejelzések szerint 2035-ig kb. 28%-kal fognak tovább növekedni, a növekvő népesség, háztartások és alapterület miatt. A Nemzetközi Energiaügynökség (International Energy Agency, IEA) World Energy Outlook 2019 című kiadványa szerint az épületek energiahatékonyságának javulása 2010 óta az átlagos ütem kevesebb mint 50%-ára lassult.

Az épített környezettel kapcsolatos környezeti és energetikai veszélyek jelentős részének megoldása érdekében az épületek energia- és klímazempontrú tervezésének folyamata kulcsfontosságú tényezőt jelent. Az ipari gyakorlatban uralkodó hagyományos épülettervezési módszer azonban csak egy tervet készít, elfogadott, tapasztalatokon alapuló építészeti fejlesztési eljárásra támaszkodva. Egy építészeti terv elkészítése után a technikai berendezést később úgy tervezik meg, hogy fedezze a komfortot, kompenzálva a tervezés energiavesztését, terhelését és szükségleteit. Az általános épületgépészeti folyamat során az építész terve időrendben 1. lépésként készül, majd a műszaki tudományterület további tervezői az építész terve szerint meghatározzák és méretezik az adott helyzetben lévő mechanikai és elektromos rendszereket. A tudományterületek és az építészet közötti interaktivitás a szükséges minimumra csökken, és a minimális iteratív tervbeállítások nem tudják biztosítani a forma, az

anyagok és a rendszerek optimális kialakítását [10]. Ez a megoldás jelentős korlátokkal rendelkezik az üzemeltetés energiahatékonyságában, mivel az építészeti terv térszervezése és néhány további passzív stratégia (az építész hozzáállásától és tudásától függően) többnyire tapasztalatokra és elméleti, általános ismeretekre támaszkodik. Ennek egyik oka az a tény, hogy az építészeket nemzetközi szinten szocializálták és képezték ki arra, hogy aktívak legyenek az építészeti tervezés művészeti oldalán, miközben nem oktatják őket komplex épületfizikai szimulációk, vagy akár bonyolult matematikai optimalizálási algoritmusok kezelésére. Mindazonáltal, figyelembe véve egy épületgépészeti csapat tagjait, az építész, az épületgépészeti rendszermérnökkel együtt az a két szakember, akik többnyire felelősek az energiahatékonyságért. Míg a gépészmérnököt a szükséges feladatok elvégzésére képzik ki ahhoz, hogy elsősorban a rendszerekért és azok működéséért feleljen, addig az építész gyakorolja (a szükséges épületfizikai ismeretekkel nem rendelkezik) a legnagyobb hatást az energiahatékonyságra és az egyéb fenntartható épületteljesítményre. A tervezőcsoport vezetőjeként az építész hozza létre a térszervezést (funkciók, elrendezés) és ennek eredményeként felelős az épület tömegéért, felépítéséért. Ezek a legfontosabb tervezési jellemzők, kifejezetten a megbízó számára, és jelentősen hozzájárulnak az energiahatékonysághoz is [11], [12]. A későbbi döntéseket az építész a további tervezési munka fázisában hozza meg, figyelembe véve a burkolatszerkezeteket, anyagokat. Amelyek szintén erősen meghatározó tényezők az energiatervezésnél. Ennélfogva elengedhetetlen, hogy az építész mérnökök mechanikai rendszerméretezése mellett az épületenergetikai és komfort tervezés optimalizálását főleg építészeknek kell elvégezni.

Eközben a nemzetközi építési jogszabályok nagy hangsúlyt fektetnek az energiatakarékosságra, a hatékonysági előírásokra és folyamatosan szigorodnak a követelmények. Kifejezetten növekszik a közel nulla energiafelhasználású épületek (nZEB-k[13],[2]) és a zöld minősítésű épületek (Leadership in Energy and Environmental Design ;LEED, Building Research Establishment Environmental Assessment Method; BREEAM, Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen;DGNB, WELL, Active House [14],[15],[16]) piaca. Továbbá, mivel a lakók idejük 80-90%-át a belső térben töltik, a beltéri környezetminőség (Indoor Environmental Quality, IEQ), amely a hő- és vizuális (nappali fény) komfortból áll, valamint a beltéri levegő minőségének (Indoor Air Quality, IAQ) az emberi egészségi állapotra gyakorolt hatása az irányelvek és szabványok előterébe került [17], [18]. **Bár a legtöbb jelenlegi szabályozás már a fűtési igény csökkentésére, a burkolat termodinamikai tulajdonságainak javítására, termikus komfortra vagy esetleg belső vizuális komfortra összpontosít, az épületfizikai szempontok komplex kezelése még mindig hiányzik.** Ennek oka nyilvánvaló: a helyiségek fűtésének-hűtésének és kondicionálásának közös rendszere, a hőtömeg, a klímaadaptációs szerkezetek és rendszerek, a részletes vizuális komfort, az aerodinamikai passzív szellőztetési teljesítmény, az életciklus-értékelés, az egészségre ható tényezők, valamint a szaglás és az akusztikai paraméterek figyelembevétele átfogó multidiszciplináris és több objektív problémát jelent, amely gyakran ellentmondásos tényezőkkel foglalkozik.

A fenntartható épületek tervezésénél a problémamegoldás folyamatát többféle cél, befolyásoló változó és korlátozó tényező határozza meg, és ezek a funkciók gyakran ellentmondásosak. E probléma kezelésére épülettervezési optimalizálási módszereket dolgoztak ki. Annak ellenére, hogy "a leghatékonyabb energiahatékonyabb megoldás az építés elhagyásában rejlik"[19], számos erőfeszítést történt az épület energia, komfort és környezettudatos tervezés optimalizálása területén a közös "parametrikus szimulációs módszer" használatával. Ez a módszer egyszerre csak egy tervezési változót próbál optimalizálni azáltal, hogy a változó megváltoztatásának hatásait teszteli, miközben az összes többi változót állandó értéken tartja. Ez az idő- és munkaigényes módszer a változók és kimenetek közötti nemlineáris

összefüggések miatt csak részben képes javítani. Az építészet területén a többcélú tervezési problémák kezelésére viszonylag új, ígéretes utat képviselnek a "szimuláció-alapú vagy numerikus optimalizálási" eljárások: a numerikus szimulációk és a matematikai optimalizálási algoritmusok automatizált összekapcsolása. Iteratív, "végtelen" számítási sorozatok alapján fokozatosan egyre pontosabb közelítési eredményeket érnek el a keresési térben a lehető legközelebbi (közel optimum), a célfüggvényt kielégítő megoldáshoz vagy ponthoz [20]. A épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizáció egy szintjének eléréséhez (azaz a kívánt teljesítmény eléréséhez) egy költség-, fitness- vagy célfüggvény minimális vagy maximális értékének megtalálása szükséges, bizonyos tervezési változók kiválasztásával és módosításával, különböző korlátozások mellett [20].

Az optimalizálási költségek viszonylag könnyen amortizálhatók a beruházási és üzemeltetési költségmegtakarítással, egyrészt a nagyméretű épületegyüttesek esetében, másrészt, ahogy a technikák a jövőben egyre felhasználóbarátabbá válnak, a kisléptékű tervezési optimalizálási feladatok is jövedelmezőbbé válnak. Becslések szerint [21] az épületburok és a HVAC-rendszer optimalizálása 20-60%-os energiamegtakarítási potenciállal rendelkezik, míg a mesterséges világítás fejlesztésével 20-70%-os energiaigény-megtakarítást prognosztizálnak, a hűtés és a melegvíz-termelés optimalizálásának egyenként azonos mértékű potenciáljával együtt. A rendszerek és az elektromos berendezések intelligens vezérlése további 10-20%-os hatékonyságjavulást eredményez [22]. Úgy tűnik, a szakirodalomban nem léteznek becslések az épületek optimalizált térszervezésének és alakformálásának energiamegtakarítási potenciáljáról. Emellett csak kevés tanulmány tárgyalja, hogy az építészek, hogyan veszik figyelembe a mérnöki optimalizálási eljárást, és hogyan építhető be a technika az általános tervező (építész) tervezési módszerébe[21].

Mivel maga a tervezési technika felelős elsősorban a megépítendő épület teljesítményéért, az elmúlt két évtized óta különös érdeklődés övezi a épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációt, mint kulcsfontosságú területet. Az első publikáció a 70-es évek elejéről származik[23], de a publikációk számának jelentős növekedése csak 2000 után alakult ki [20], [21], [24]. Az optimalizálási algoritmusok mélyreható elemzésének nagy része nem építészeti területeken kerültek alkalmazásra, hanem mint az informatika, a matematika és az operációs technológiák eszközeként kaptak szerepet. Az épülettervezés optimalizálására koncentráló korábbi munkák száma még mindig lényegesen kisebb, mint az épületüzemeltetés-irányítás optimalizálására vonatkozó tanulmányok száma [25]. A mindennapi ipari rutinban az energiahatékony épülettervezésben az optimalizálás még mindig csak marginálisan alkalmazható: a tanulmányok kb. 30%-a alkalmazta technikáját valós épületeken [21]. Továbbá a meglévő kutatások nagy része magának a technikának a fejlesztésére (pl. algoritmusok és számítási motorok kifejlesztése és összekapcsolása, helyettesítő modellek integrálása stb.), valamint a technika alkalmazására összpontosít egy gyakran túlságosan leegyszerűsített épületre a javasolt módszer működőképességének validálása érdekében.

Számos áttekintő tanulmány rendszerezi a épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációt érintő kutatásokat optimalizációs algoritmusok, az épülettartományok, a tervezési változók, a célfüggvény és a korlátozások történelmi fejlődése, valamint az algoritmus-rendszer teljesítményének és a szoftverkeretnek a csatolási kérdésekkel együtt történő elemzése szempontjából [20], [21], [24], [25]. Az épületgépészeti (Heating, Ventilation, and Air Conditioning, HVAC) és a megújuló energiarendszer tervezési változóira koncentráló optimalizálási kutatások mellett [26] számos tanulmány aktív (mechanikai) rendszerek és passzív (építészeti) stratégiák különböző tervezési változóit kombinálja[27], [5], [28]. Városi

kontextusban a homlokzati panelrendszer geometriájának (sűrűség és elrendezés) optimalizálását végzik a napenergia-felhasználás (Photovoltaic, PV-rendszer) és a vizuális komfort (területi napfény-autonómia, spatial Daylight Autonomy, sDA) maximalizálása érdekében egy változatos sűrűségű és magas épülettömegű városrészben[29]. A passzív rendszerek közül a tanulmányok kifejezetten az átlátszatlan és átlátszó burkolatszerkezetek és anyagok fő tervezési változóit módosítják, pl. a szigetelés és a falak vastagságát és termikus tulajdonságait, valamint a fal-ablak arányokat (window-wall ratio, WWR), a tájolást, az anyagokat, a szerkezeteket és az árnyékolást például[2], [30], [1], [31]. Az üzemeltetés és a szabályozás további gyakran vizsgált tervezési változók, például a fűtési és hűtési beállítási pontok[32] az energia- és globális költségek, valamint a termikus kellemetlenségek minimalizálása érdekében. A hőenergia és a kényelem célfüggvényeit gyakran kombinálják az életciklus-értékelés (life-cycle assessment, LCA) és az életciklusköltség-elemzés (életciklusköltség, life cycle cost, LCC), (életciklusköltség-elemzés, life cycle cost assessment LCCA) határaival vagy a beruházási költségzintekkel az ablaktípus, a természetes és mechanikus szellőzés és a rendszerbeállítási pontok változóinak változtatásával [33], [34]. Egy általánosan használt kompromisszumos célt a minimális beruházás és a maximális energianyereség/CO₂-csökkentés vagy a minimális primerenergia-fogyasztás (primer energy consumption, PEC) és LCC között határozzák meg, beleértve a burkolatszerkezetek és a fűtési és használati melegvíz (domestic hot water, DHW) rendszer típusainak, méreteinek, hőmérsékletének, valamint a szél- és fotovoltaiikus megújuló energiarendszereknek a tervezési változóit[35]. Egy összehangolt optimalizálási módszerrel a klímaberendezés (hűtők, légkezelő egységek AHU, hűtőtornyok, elosztórendszer) a villamos energia (PV-panelek, szélturbinák, társzgenerátorok) és az energiataroló (akkumulátor) rendszer kombinációi révén lehetett megtalálni az optimális energiafelhasználás mértékét az épületburkolat (WWR, tájolás, napelnyelő képesség, tető túlnyúlásának aránya) változó alternatívái között[36]. Az LCC-vel szembeni energiaigényt különböző fal- és ablaktípusok, WWR, árnyékolás, természetes szellőzési stratégiák és fűtési-hűtési üzemeltetési változatok alkalmazásával minimalizálták 25 különböző éghajlati forgatókönyvben[37]. Egy másik tanulmány nyolc légkezelő-rendszer (Air Handling Unit, AHU) működési forgatókönyvének optimális konfigurációját vizsgálta négy éghajlati zónahelyzet, három burkolati változat és kilenc foglaltsági ütemezés mellett az energiafelhasználás intenzitása (Energy Use Intensity, EUI), a termikus diszkomfort és az IAQ (CO₂-koncentráció) minimális költségfüggvényének elérése érdekében[38]. Az optimális nappali fény- és energiateljesítményt a WWR, az építőanyag, az üveganyag és az árnyékoló eszköz megfelelő paramétereinek elérésével alakítják ki[39]. További újabb tanulmányok új algoritmusokat használnak és azok összehasonlító elemzését végzik a épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezés optimalizáció kapcsán [26],[40], amelyek a tervezési változókat nagyobb hatókörrel egészítik ki; beleértve a belső használatot és hőnyereséget a foglaltság, a berendezések terhelése, a világítás intenzitása, a burkolat beszivárgása[41], a részletes HVAC rendszer működési beállítási pontjai[2], valamint a kifinomult árnyékolási geometria optimalizálási technikák [42],[43], valamint a bionikus megközelítések[44]. Passzív (ablakszellőztetés) és aktív (HVAC-rendszer) klímaberendezéssel felszerelve egy másik munkában egy irodahelyiség energiatakarékossági, beltéri komfort- és költségtényezőit optimalizálták számításhoz áramlástani (CFD) módszerrel[45]. A fent említett tanulmányokban a fő hangsúlyt az optimalizálási modell és/vagy az alkalmazott/kombinált algoritmusok bemutatására és validálására helyezik egy egyszerűsített esettanulmányon keresztül, konkrét esettanulmányok nagyon konkrét eredményeivel. A legtöbb esetben az eredményekből hiányzik az épületfizika szempontjából a nóvum. Bár egyre több tervezési változót használnak, - ezek azonban a műszaki rendszerekre, anyagokra és szerkezetekre korlátozódnak (pl. ablakméret és -helyzet konfigurációi, a burkolat anyagtulajdonságai, árnyékolási lehetőségek,

valamint néhány mechanikus szellőzési/légkondicionálási beállítás), míg a térszerkezési és épületforma-tulajdonságok változói hiányoznak.

A valós, legtöbb épülettervezési átfogó, teljes optimalizálás tárgyát a felújítási projektek képezik, részben a fejlett országok erősen előregedő épített környezete miatt, valamint azért, mert a felújítási feladatoknál a forma jellemzően rögzített, így nem szükséges a bonyolult formaváltoztató kérdésekkel foglalkozni[21].

Ugyanakkor az épületforma a épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizáció során lényeges, teljesítményt befolyásoló tervezési változó [11], [12], [28], [46], [47], [48], [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57]. Az energiahatékony épületgeometriáról és épületburkolat tervezéséről szóló átfogó áttekintés[24] mintegy 400 kapcsolódó publikáció elemzése után arra a következtetésre jutott, hogy az épületforma és a burkolat kialakítása jelentősen befolyásolja az energiateljesítményt. A korábbi tanulmányok jellemző hiányossága, hogy a legtöbbjük magára az optimalizálási technikára, valamint a számszerűsíthető változókra és célfüggvényekre összpontosít, anélkül, hogy a kapcsolódó épülettervezési szakterületek egyéb célkitűzéseit integrálnák. Az épületburkolat és az épület alakja potenciálisan változó csoportjai az energiatakarékosságnak a passzív és aktív stratégiákon keresztül történő energiatakarékosságnak általában[24]. A "Form follows energy" és a "Form follows performance" mottó hangsúlyozza, hogy az épület formája az energiahatékony meghatározó tényezője, és az elmúlt évtized óta "dogmává" vált. A megvalósítás azonban összetett kihívást jelent. Bár az épület formája jelentős hatással van az épület üzemeltetési fenntartási költségeire, amelyek több nagyságrenddel meghaladják a kezdeti beruházási költségeket, az építészek számára nem léteznek általános iránymutatások a forma és az energiahatékony összefüggéseiről [58]. C. R. Lemke könyvében [10] 64 különböző épületgeometriát vizsgált építészeti formanyelv és a szoláris nyereség szempontjából a maximalizált napenergia-termelő felület vs. a burkolaton keresztüli hővesztés minimalizálása (min-max antagonista probléma) viszonylatában. A formai hatékonyság új tényezőjét javasolták, hogy számszerűsíteni lehessen a napenergia koncentrációját egy adott éghajlatú épületfelület formáján. A szerző jelzi, hogy az építészetben és a várostervezésben csak kevés vizsgálatot végeztek a formai tervezéssel való kísérletezéssel kapcsolatban, pedig az optimalizált geometria révén a napenergia-nyereség több mint 100%-os növelése lehetséges. Egy vita [59] rámutat az épületgeometria korlátozott kihasználására az energiahatékony tervezés kutatásában. Hangsúlyozza, hogy míg egyes optimalizálási vizsgálatok túl messzire mennek a formai vizsgálatban azáltal, hogy nem praktikusán összetett formákat generálnak [46], más tanulmányok rendkívül egyszerű formák megközelítését alkalmazzák, alig érintve a lehetőségek mélységét [58]. Arra a következtetésre jut, hogy a geometria kihagyása az energiateljesítmény tárgyalásából és a formai tervezési szempontok energiakapcsolatának korlátozott megértése kulcsfontosságú kutatási hiányosságot jelentene.

Ami az épületgeometriát mint tervezési változót az épület optimalizációs folyamatokba integráló korábbi tudományos munkák spektrumát illeti, viszonylag sok publikáció ígéretes cíccímekkel szolgál, beleértve az alakoptimalizálást és hasonló célokat. A tanulmányok elemzése után azonban a legtöbb ilyen vizsgálatban a geometriai szempontok pontos szerepe, mértéke és hatása továbbra is tisztázatlan (lásd a [2.1.2.](#), [2.1.3.](#) fejezetet). A tanulmányok a geometriával kapcsolatos kérdéseket különböző jelentőségi szinten dolgozzák fel, miközben összetett kép alakul ki az alkalmazott célfüggvények, épülettípusok és -méretek, klímák, épületgeometriai tervezési változók, algoritmusok, módszerek, szimulációs és programozási technikák nagy változatosságával, az elért eredmények további tervezésben való egyértelmű alkalmazhatósága nélkül. Ezért a jelen értekezés céljaihoz tartozik, hogy rendszerezett és

világos áttekintést adjon a meglévő szakirodalomról az épületgeometriai tervezési változók, mint bonyolult és jelentősen meghatározó változó rendszer osztályozásáról, szerepéről és a legmodernebb teljesítményéről az épületek energiatervezésének optimalizálásában. A szerző ismeretei szerint jelenleg nem létezik áttekintő elemzés ezen a területen. A konkrét elemzés és vita fő mozgatórugója az, hogy a következő kérdésekre adott válaszok révén kibontakoztassa a korábbi munkák jelenlegi állását:

→ Milyen épületgeometriai tervezési változók léteznek az épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizáció jelenlegi kutatásában? 2.1.

→ Milyen szerepet játszanak a különböző épületgeometriai tervezési változók a épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizáció vizsgálatokban? 2.1.

→ Milyen típusú épületek teljesítményét javítják a épületgeometriai tervezési változók, és mekkora a javulás hatása? 2.1., 2.1.1., 2.1.3., 2.1.4.

→ Milyen gyakran alkalmazott szimulációs motorokat, optimalizációs algoritmusokat és szoftverkereteket (beleértve a különböző módszereket) alkalmaznak a épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációkban, beleértve a épületgeometriai tervezési változókat is? 2.2.3.

→ Milyen épülettér-szervezési és alakmeghatározási megoldások léteznek, és melyek az egyes eljárások előnyei és hátrányai? 2.1., 2.1.1., 2.1.2., 2.1.3., 2.1.4., 2.1.5.

→ Milyen lehetséges korlátok és/vagy hiányosságok mutathatók ki? 2.1.

→ Milyen lehetséges ígéretes lehetőségek rejlenek az épületforma optimalizálásában?

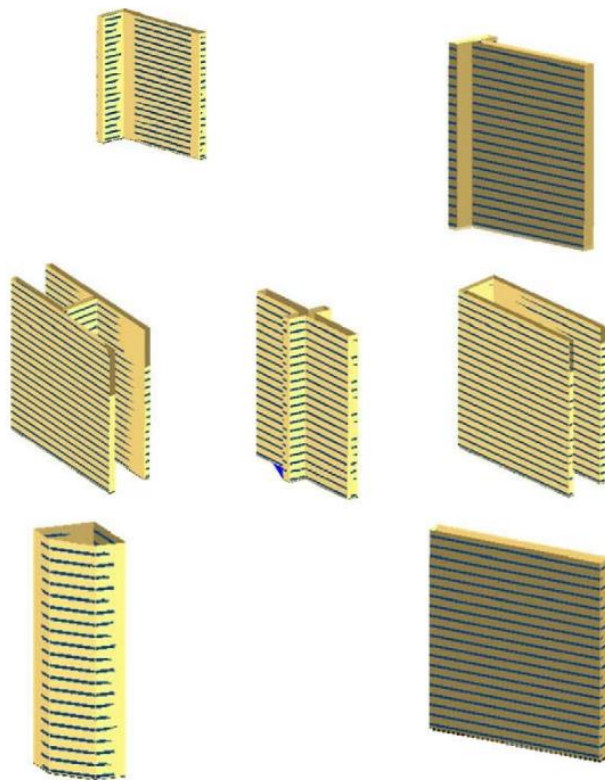
→ Lehetséges-e kapcsolatot teremteni a konkrét épületforma és annak matematikai tervezési változókat leíró geometriája között, és ha igen, hol tart a tényleges kutatásban az elért eredmény szint a forma reprodukálására az épületgeometriai tervezési változók alkalmazásával? 2.1.6., 2.2.6.

→ Hogyan lehet az elért eredményeket és ismereteket további tervezési projekteken alkalmazni? 2.2.6.

A rendelkezésre álló tanulmányok áttekintése érdekében kronologikus adatbázist hoztam létre: Az A. függelék tartalmazza a 2.1.1. fejezetben tárgyalt épületenergetikai, komfort- és környezettudatos tervezési tanulmányokat, amelyek fő célja a épületgeometriai tervezési változókkal kapcsolatos energiateljesítmény értékelése az épületgeometriák alakjának módosításával vagy generálásával (B. függelék, 2.1.2. fejezet). A C. függelék bemutatja az elemzett publikációkat, beleértve az épületgeometriával kapcsolatos épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációs tanulmányokat, korlátozott számú és szintű épületgeometriai tervezési változó-komplexitással (lásd a 2.1.3. fejezetet), a geometria módosításával a vizsgálati esetek létrehozása érdekében. A D. függelék a bonyolultabb épületgeometriai tervezési változót tartalmazó épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizáció vizsgálatokkal kapcsolatos korábbi munkákat mutatja be az alak módosításával (2.1.4. fejezet) vagy teljes épületgeometriák létrehozásával (E. függelék, 2.1.5. fejezet).

2.1.1. Épülettervezés kutatás, beleértve az épület alakjának módosítását eset változatok létrehozása érdekében (korlátozott geometriával kapcsolatos tervezési változókkal)

Korábbi munkák bemutatják, hogy az épületgeometriai intézkedések hogyan módosítják és javítják az energetikai hatékonyságot, és hogy az formatervezési változók hogyan függenek a különböző éghajlati viszonyoktól és a környező természeti vagy városi kontextustól. Ezek a vizsgálatok nem rendelkeznek matematikai optimalizálási módszerekkel, mindazonáltal gyakran biztosítják a geometriák automatizált generálását, kombinálva az épületfizikai szimulációkkal, így a épületgeometriai tervezési változók optimalizálásának fontos lépését képviselik.



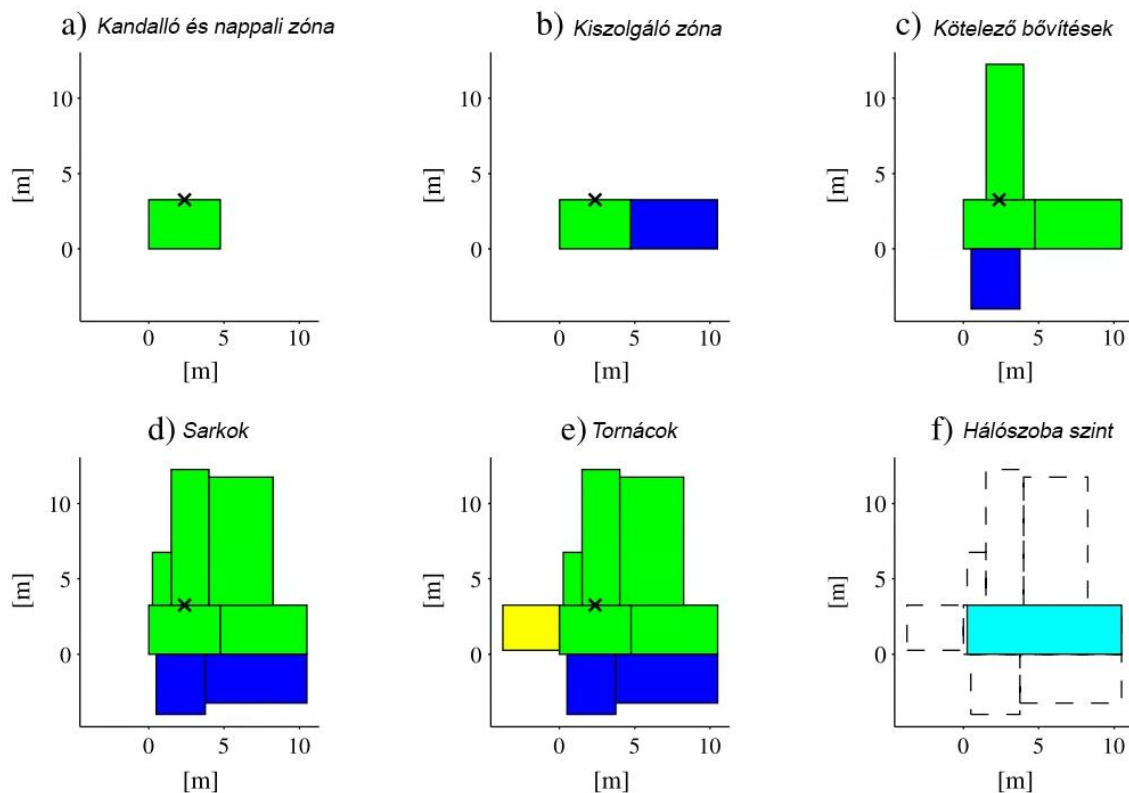
1. ábra: tipikus irodaházi tömegforma az összes alaprajzi forma esetében. Az ábrán látható: L-alak, T-alak, H-alak, kereszt alak, U-alak, vágott alak és téglalap alak [12].

Ezt igazolja az alábbi tanulmány, melyben egy egyszerűsített elemzési módszert (korrelációs egyenlet) dolgoztak ki [12] (1. ábra) - egész éves részletes szimulációk alapján - annak becslésére, hogy az épületgeometria hogyan befolyásolja a kuvaiti irodaházak energiahatékonyságát. A kapott eredmények kiemelik a geometria, a WWR és az üvegezés típusának erős hatását az épület energia fogyasztására. Egy másik tanulmány átfogó érzékenység vizsgálatot végez, amely az alapvető épületgeometria energetikai hatásait tárja fel, négy éghajlati régióban vizsgálva az oldalarányt, a tetőformát, az épület magasságát (egymásra helyezés), a WWR-t, a tájolást, az ereszt és az anyagok további termikus tulajdonságait [54]. Arra a következtetésre jutottak, hogy az oldalarány és az egymásra helyezés alapvetően befolyásolja a lakóépületek energiateljesítményét. A geometria fontosságát (optimalizált energetikai teljesítmény és az építészeti tervezés kreatív jellegét) egy további érdekes

tanulmány [47] is kiemeli azzal, hogy a teljes vizsgálatot két egymást követő fázisra bontja: először geometriaoptimalizálás, majd passzív és aktív rendszeroptimalizálás. [60] a városi tömbök formáját, méretét és kerület/terület arányát, valamint a lakótömbök közötti távolságot integrálja az exergia terhelést javító vizsgálatba, de hiányzik az épületgeometriai tervezési változók alakításának és kiválasztásának ésszerű leírása.

2.1.2. Épülettervezés kutatás, beleértve az épületformák generálását eseti változatok létrehozásához

Egy átalakított formanyelvi rendszer [61] "ha"-akkor szabályokkal generatív tervezési rendszert biztosít, amely a szobák, sarkok és tornácok egymás mellé rendezésével épületgeometriákat állít elő (2. ábra).



2. ábra: A tervezőrendszer programja által létrehozott terv generálása [61].

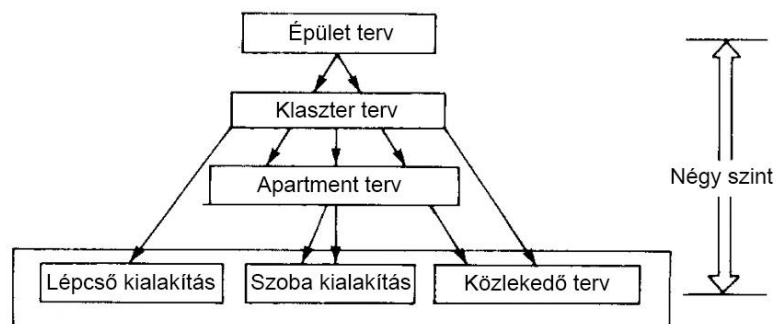
A módszer bemutatását követően a javasolt alkalmazásban a releváns szabályokat figyelmen kívül hagyták (egyszerűsítések), bemutatva a változatos családi házformákat és alaki együtthatókat (felszíni burkolat és beltéri térfogat aránya A/V), nagymértékben eltérő alapterületekkel. A tanulmány nem egy szabályos építészeti feladat megoldását tűzte ki célul, amely a legtöbb esetben szigorúan előre meghatározott nettó alapterület-méretet alkalmaznak, amelyet a megrendelő és/vagy az előírások határoznak meg. Emellett a módszer korlátozottan kezeli az alakzatokat.

Egy további munkában 96 000 családi házat generáltak [62], hogy elemezzék a hat tömörség és ablakalapú változó és a burkolat hőátbocsátási tényező közötti energetikai kapcsolatot nyolc európai éghajlaton. A szerzők arra a következtetésekre jutottak, hogy az U -értékek (hőátbocsátási tényező) csökkentése csökkenti a geometria és a WWR hatását a hidegebb éghajlati övezetekben, és ezzel szemben a melegebb éghajlatokon a túlmelegedés megfordítja ezt a tendenciát. Bár a tanulmány számos scenáriót figyelembe vesz, a szerzők nem végeztek optimalizálást, és a geometria hatásait nem vizsgálták teljes mértékben: az alakzatokat és az U -

értékeket véletlenszerűen generálták nagy számban, inkább azért, hogy általános tendenciákat észleljenek, mintsem hogy megértsék az energia vonatkozású összefüggéseket az egyes geometriák esetében. Ráadásul a burkolat hőtechnikai tulajdonságainak javítása további beruházási költségeket és negatív környezeti hatásokat jelent ahelyett, hogy felismernénk a geometria fontosságát, amely elsősorban elkerülhetetlen az épület létrehozásához. Első lépésként a forma optimalizálásával jelentős energia- és komfortjavulás érhető el, ami jelentősen megkönnyíti a burkolat hőtechnikai tulajdonságainak, a mechanikai rendszereknek, az üzemeltetés automatizálásának stb. későbbi fejlesztését. Egy másik kutatás a város környéki épületmorfológia hatásait vizsgálja egy 12 emeletes épület hűtési energia igényére és természetes szellőzési potenciáljára, forró-sivatagi éghajlaton [63]. A városi struktúra generálására egy "épület moduláris cellák" ("Building Modular Cell", BMC) technikát vezetnek be, amely egy 5x5-ös rácsra alapszik, öt különböző városi sűrűségű (Urban Density, UD) épületkategóriával, három épületmagassági osztályt határoz meg és öt városi mintázati tartományt vesz figyelembe, (az épülettömbök közötti utcaterület), valamint egy formageneráló algoritmuson (beleértve az építészetileg alkalmas formaválasztást) alapszik. Megállapításra került, hogy a normál UD (50-60%-os területi lefedettség) alacsony szomszédos épületeket igényel, a magas UD pedig alacsony hűtési energia igényhez szükséges. Az L-alak előnyben részesül, és az alaprajzban a keleti oldal méreteinek módosítása lehetővé teszi a hűtés csökkentését. A sűrű szomszédsághoz keskeny utcák alkalmazásával ajánlott, az épületmagasság és az utcaszélesség aránya (H/W) 12 vagy annál nagyobb legyen, míg a legjobb természetes szellőzési potenciál érdekében a H/W 6-8 értéket kell figyelembe venni.

2.1.3. Épülettervezés optimalizációs kutatás az alapvető épületforma-módosítások felhasználásával eseti változatok létrehozásához

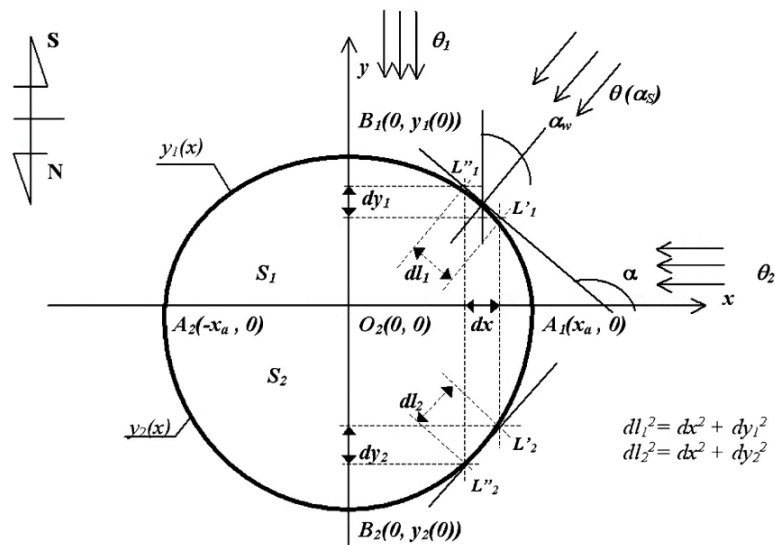
A tanulmányok többsége évtizedek óta az építészeti terek és -geometriák automatizált generálására koncentráltak, anélkül, hogy figyelembe vették volna az épületfizikai teljesítményt (3.ábra) [64],[65],[66],[67], vagy a matematikai optimalizálást, addig a legutóbbi épülettervezési optimalizációs kutatási munkáról rendelkezésre álló irodalom az épületforma energiával kapcsolatos tervezési változóit is már figyelembe veszi.



3. ábra: A tervezési folyamat hierarchikus struktúrája [64].

A fő épületburkolat tervezési változó jellemzői (pl. szerkezet és anyag hőtani tulajdonságai, ablak-falfelület aránya, tájolás) mellett a téglalap alakú irodaházak oldalaránya, a 2 tengely aránya [68] is megjelenik, mint formával kapcsolatos tervezési változó az LCA és az életciklusra vetített környezeti hatás (life cycle energy impact, LCEI) minimalizálására irányuló optimalizálási eljárásban. A költségcsökkentés szempontjából az első oldalárányi scenáriót részesítették előnyben, de a téglalap alakú, dél felé hosszú oldallal rendelkező forma jobban teljesített az energiahatékonyság szempontjából. A épületgeometriai tervezési változók hatásai

azonban csak egy egyszerű egyszintes kocka alakú tömb alaprajzának egy értékére korlátozódnak.

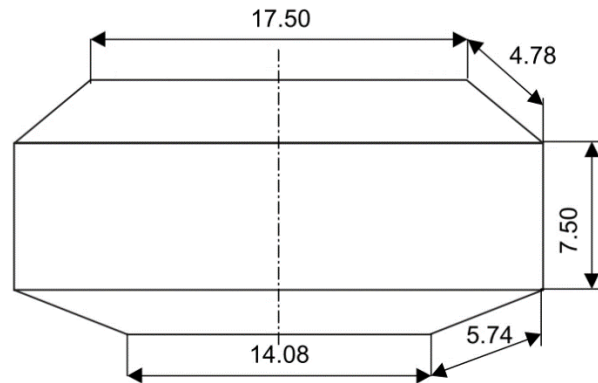


4. ábra: Az ovális alakú épület és annak módosításai [69].

Egy másik, ovális alakú irodaházra vonatkozó tanulmány [69] célja a minimális építési költségek és a minimális fűtési energia igény elérése volt a kör és ovális alak közötti elrendezés manipulálásával (4. ábra). Itt a hőveszteségek és -nyereségek csak kb. 10%-kal csökkentek, miközben az alakváltoztatás mértéke minimális volt, így még a tervezés korai szakaszában ez a módszer alkalmazása nem indokolt. G. M. Sisk és társszerzői [70] a gyakorló tervezők együttműködését integrálták egy egyszerű irodaház optimalizálásába, amelynek peremfeltételei a téglalap alak, az emeletek száma és az elrendezés méretei (fal-emelet arány, térmélység), az átriumok elhelyezkedése voltak, hogy nagy szabad tereket hozzanak létre, minimalizálják a költségeket és maximalizálják terek napfény és természetes szellőzés ellátottságának mértékét. Az építészeket és a statikusokat felkérték, hogy hozzanak döntéseket a célfüggvények súlyozásában, míg a változók korlátozott használata, valamint az energetikai szimulációk hiánya további fejlesztést tesznek indokolttá. P. Geyer kutatása [71] lehetővé teszi a tervezők számára, hogy interakcióba lépjenek egy ipari csarnok automatizált optimalizálási folyamatával, az építészeti terv különböző optimalizálási modellekre való lebontása által. A gazdasági, környezeti és felhasználói preferencia célokat egy csarnok teherhordó szerkezetének (négy acél és fa vázszerkezet) kombinációinak létrehozása során határozták meg. A teherhordó szerkezet részletes optimalizálása innovatív eredményeket szolgáltatott, annak ellenére, hogy a térgeometria itt szinte érintetlen maradt. R. Choudhary és társai [72] egy kis műhely- és irodaépület hierarchikus optimalizálását javasolja, optimális falméreteket, ablak-falfelület arányt (window to wall ratio WWR), fűtési-hűtési beállítási pontokat és átlagos légsebességet keresve a hőkomfort és az energia igény optimális összeteljesítményének kidolgozása érdekében. **Az említett tanulmányok legfeljebb egy vagy két, könnyen számszerűsíthető épületgeometriai tervezési változót vesznek figyelembe, többnyire egyszerű és/vagy kis léptékű épületek példák esetében.**

A további legújabb tanulmányok között az aktív rendszer, néhány esetben a természetes szellőzés, továbbá az épületburkolat szerkezete és az anyagok hőtechnikai tulajdonságai, a WWR, az ablakok helyzete, az árnyékolás és a tájolás változói kombinálódnak a tipikus épületgeometriai tervezési változókkal, mint az oldalarányokkal, emeletek számával, tetőhajlásszöggel, a tér méreteivel és területével [73],[74],[75],[76],[77] vagy az egyszerű

doboz alakú épülettömeeggel vagy egy helyiség egyik falának hosszával és magasságával [78], [79], [80], [81], [82], [83], mivel ezek könnyen számszerűsíthető bemeneti változók az algoritmusok számára. W. Yu szerint [76] akár 50%-os energiamegtakarítás érhető el egy többcsaládos házban, míg Y. Zou szerint [83] 14,2-24,6%-kal javíthatóak a hő- és vizuális komfortra, valamint az energiafogyasztásra vonatkozó célkitűzések.



5. ábra: Lakóházak optimális alaprajzi formája [80].

H. Jejrzejuk és W. Marks kutatásában [80] optimális formát dolgoztak ki egy lakóépület számára olyan módon, hogy a téglalap alakot helyettesítették egy téglalappal és két trapéz formával (5. ábra), míg A.T. Nguyen és S. Reiter [78] egy hosszúkas, téglalap alakú, kelet-nyugati tengelyű formát javasol trópusi monszun éghajlaton, amikor természetes szellőzést (Natural Ventilation, NV) vagy légkondicionálót (Air Conditioning, AC) működtetnek. A szubtrópusi területeken a négyzet alakú forma előnyben részesítendő, ha természetes szellőzéssel szellőztetnek. L.G. Caldas és társkutatói [84] négy épületzóna külső falait a fő tájolások szerint, azaz szélesség és magasság szerint manipulálták a ferde tető variációival együtt, hogy optimális kompromisszumot alakítsanak ki a fűtési és a világítási energia igény között. A legjobb épületgeometriákat és WWR-változatokat a fűtési és a legjobb megoldásokat a világítási energia igényre vonatkozóan egy olyan folyamatban nyerték el, ahol a véletlenszerű geometria generálás (genetikus algoritmus, GA) következtében nem fedezhetőek fel összefüggések és energetikával kapcsolatos logikák, mivel a tanulmány elsősorban az algoritmusra mint technikára összpontosít. Továbbá az eredményekből az épületfizikával kapcsolatos információk újdonságtartalma hiányzik. Egy másik projekt numerikus áramlási szimulációkkal (Computational Fluid Dynamics, CFD) számolva egy doboz alakú tér hosszát, szélességét és magasságát, ablakainak méretét és elhelyezkedését, a tér szellőzési képességét optimalizálja [85], hogy a megadott léghőmérséklet és levegő sebesség célokhoz minél közelebbi megoldásokat érjenek el. Egy grafikus felhasználói felületen (Graphical User Interface, GUI) keresztül a felhasználó képes beavatkozni a folyamatba, és a teljes tervezési teren belül kiválasztott példányok hő- és áramlási teljesítményét tanulmányozni, valamint a különböző megoldásokban szereplő kompromisszumokat felülvizsgálni. A felhasználó kiválasztja a kívánt pontot, és az algoritmus megkeresi a optimumhoz legközelebbi értéket. Azonban ez a kutatás csak kis geometriai változásokat vesz figyelembe, míg a tér formája gyakorlatilag kezeletlen marad. R. De Janeiro [86] egy interaktív optimalizáló eszközt (Aid to the Multiple criteria Conception of the building Envelope, AMCE) mutatott be, amely figyelembe veszi az épület területét, magasságát, szintjeinek számát, tetőformáját és oldalarányát beleértve a vázlattelevi folyamatot, az ügyfél, a tervezőcsapat és a hatóságok érdekeit. A tanulmány a módszer és a szoftver bemutatására korlátozódik, alkalmazás nélkül. [87] egycélú optimalizálást (Single-Objective Optimization, SOO) végez hat LCA környezeti mutatóra, működési és tényleges hatásokra, valamint többcélú optimalizálást végez (Multi-Objective Optimization, MOO) az összes LCA mutatóra egyszerre, vagy a működési és

a tényleges hatásokat együttesen figyelembe véve. A SOO egy viszonylag kompakt formát eredményezett teljesen üvegezett homlokzatokkal; az operatív hatás optimalizálás egy nagy déli homlokzati formát (napenergia-nyereség javítása) és nagyon intenzív szigetelést (veszteségcsökkentés) eredményezett. Mind a SOO-ban, mind a MOO-ban változatlan maradt a közel kocka alakú forma, a déli homlokzat, a WWR-t a szoláris nyereségre optimalizált kettős üvegezés, a többi homlokzat pedig az alacsony transzmissziós veszteségek (hármás üvegezés) érdekében maradt változatlan. A MOO-val a Pareto-optimális modellekben 60-80%-os környezeti megtakarítást értek el. Mindazonáltal a térbeli paraméterek itt az oldalarányra és az emeletek számára korlátozódnak, mivel nagyobb hangsúlyt fektettek az HVAC-rendszer működésével kapcsolatos változók és a felhasznált anyagok LCA tényezőinek kompromisszumára.

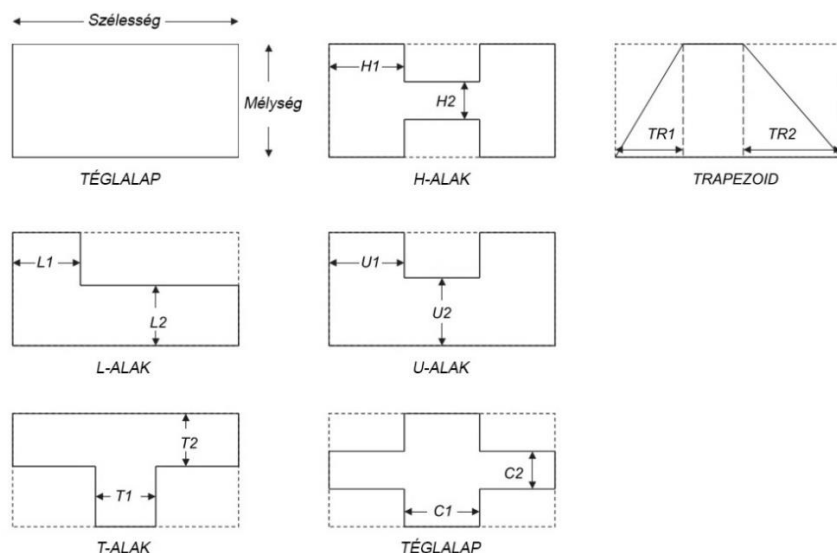
F. Ascione [88] egy átfogó optimalizálási keretrendszert javasol "Harlekin" néven, az 1-8 optimális méretarányok megtalálása révén, három váltakozó helyszínen (éghajlat) és különböző épületmagasságokban (5-, 10- és 15-szintes). Az 1-es kompakt méretarányt részesítették előnyben. Y. Fang [58] kísérletet tesz a hasznos nappali megvilágítás (UDI) és az energiafelhasználás intenzitás (EUI) célkitűzéseinek optimalizálására egy téglalap alakú, klasszikus nyeregtetővel rendelkező épületben, és néhány ajánlást ad az épületgeometriai tervezési változók alkalmazásával kapcsolatban, mint az épület mélysége (amelyet nagyban befolyásol az éghajlat) és a tetőgerinc elhelyezkedése három különböző éghajlati övezetben. Az eredmények alapján az induktív épületfizikai meglátások nem nyújtanak új jelentőséget. S. Yigit kutatásában [89] egy gradiens boosting machine learning (GBM) alapú hibrid GA optimalizálási rendszer kereste az optimális lakóépület blokk megoldásokat alacsony beruházási költséggel és magas energiahatékonysággal az emeletszám, a terület, a méretarány, a tájolás és a burkolat hőtechnikai tulajdonságai és a WWR változóinak kombinálásával Törökország három legzsúfoltabb városát figyelembe véve. Az átfogó tanulmány 0,67-1,67 közötti optimális oldalarányt azonosított, de a fő hangsúly inkább a módszer validálásán volt, mint a geometriával kapcsolatos optimalizálásán. Egy másik kutatás geometriával kapcsolatos teljesítmény alapú optimalizálást végzett egy automatikus felismerési és konverziós módszerrel, tervezői preferenciákon alapuló optimalizációs algoritmussal, hogy segítse a tervezőket a döntéshozatali folyamatban [90]. Az algoritmus által javasolt optimális épületmodell-változatok közül a tervezőnek ki kell választania a preferáltat. Az algoritmus a további módosításokhoz kiinduló esetként egy konkrét tervet igényel, és ily módon - mint a fejezetben ismertetett összes tanulmány - az eredmények egy korlátozott számú bemeneti geometria meghatározott keretrendszeréhez kapcsolódnak.

A várostervezésben a magas lakóépületek elhelyezkedése és magassága jelentős hatással van a belső (épületek) és külső (városi terek) komfortindexekre. A nappali fény tényező (daylight factor, DF), az égboltra való kilátás arányát, az ablakok napsütéses órák arányát, a helyszíni napsütéses órák és az egyetemes termikus klímaindex mutatóit egy MOO tanulmányban [91] vizsgálták az épülettömbök elrendezésének módosítása kapcsán.

2.1.4. Épülettervezés optimalizációs kutatás a fejlett épületforma-módosítás alkalmazásával esetváltozatok létrehozására

A geometria módosítására nagyobb hangsúlyt fektetnek a további épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációs kutatási tevékenységek. Y. K. Yi és A.M. Malkavi [46] egy egyedülálló módszert mutat be az épület alakjának módosítására a geometria sarokpontjainak manipulálásával egy "agent-child" koordinátarendszerben. Az épülethatároló szerkezetekben történő energiaáramlás minimalizálásának célfüggvényével egy kocka alakú épülettestet vettek alapul és korlátozott számú absztrakt formákkal módosították, kísérletet téve az így kapott forma optimalizációjára, ablakok és bármilyen további épületszerkezet vagy

rendszer alkalmazása nélkül. Az energiafogyasztás csökkentésének kimutatását az optimális absztrakt geometriák megtalálása érdekében végezték el, miközben nem praktikus, formai eredményeket hoztak létre (bonyolult felületek), és figyelmen kívül hagyták, hogy ezek a formák magasabb építési és anyagköltségeket igényelnek, ami magasabb LCA-hatással párosul. Egy ötszög alakú irodai elrendezést optimalizáltak az LCC és az LCEI minimalizálására a WWR, a szerkezetek anyagai, az árnyékolás, valamint az elrendezés széleinek hossza és az összekapcsolási szög variálásával [53]. Az alacsony LCC-t a szabályos ötszöghöz közeli elrendezési formák, az alacsony LCEI-t pedig a nagyobb (szélesebb) déli homlokzati formák okozzák, ami azt mutatja, hogy a geometria valóban összefügg az energiahatékonyság és a beruházási költségek minimalizálása közötti paradox kapcsolatával. A tanulmány középpontjában azonban továbbra is csak a módszer bemutatása és egy egyszerű példa áll. A formanyelvet városi környezetben lévő teraszházak formális szerkezetgenerálására [92], valamint irodaházak lakóházzá alakítására használják az alaprajzok lefordított matematikai formanyelvi szabályok szerinti levezetésével [93]. Bár ez a két korábbi tanulmány lehetőséget kínál az energiaoptimalizáláshoz, ezek csak az elrendezési tervek létrehozására irányulnak. A [94]-ben a lapostetős egyszerű családi házak trapéz-, téglalap- és betűformákat (T, L, U, +, H) alkalmazó, változatos alakú alaprajzait vizsgálták több burkolatszerkezet hőtechnikai jellemzőivel, a HVAC-rendszer változóival és üzemeltetési beállításával kombinálva az energia- és LCC-értékek összehasonlítása érdekében. A tömegforma jelentősen befolyásolta az energia mutatókat, míg az összes változó-kombináció optimalizálása után a különböző formák LCC-re gyakorolt hatása felülíródott, így a tervezők nagyobb szabadságot kaptak a különböző formák kiválasztásában. Bár figyelemre méltó, hogy ez a tanulmány elsősorban az összes tervezési változót egyidejűleg vizsgálta, ennek ellenére nem vette figyelembe, hogy a tömegforma előzetes optimalizálása után a későbbi passzív és aktív fejlesztésekkel jelentős megtakarítások érhetők el. Ezt az egymást követő optimalizálási folyamatot (először a forma, majd a fennmaradó passzív és harmadszor az aktív változók) más szakirodalom is bizonyítja [47].



6. ábra: Az épület alakjának lehetőségei [94].

A [95]-ben ugyanazokat az épületformákat alkalmazták, a [94]-ben szereplővel megegyezően egy burkolat- és HVAC-rendszer optimalizálásában, ahol a különböző optimalizálási területek függvényében (burkolat és HVAC egyidejű vs. szekvenciális optimalizálás, energiaköltség vs. LCC) különböző formák alakultak ki a legjobban teljesítő változatokként (6. ábra). Sajnálatos módon az alakzatok és az eredmények közötti ok-okozati összefüggések magyarázat nélkül maradtak, és a hangsúlyt elsősorban a célfüggvényekre és a módszertanra helyezték. A.

Ciardiello [47] nyolc alakzatot javasol, egyenként négy tömeg arányt, az energiaigény, az energia- és beruházási költség, valamint a CO₂-kibocsátás optimális célfüggvényének eléréséhez WWR-változatokkal. Az optimális eset egy második optimalizálási szakasz bemeneteként szolgált, a burkolóanyag hőtechnikai tulajdonságainak és a „brise soleil”, a napterek, valamint az udvar/üvegház változóinak felhasználása során. Az 1. fázisban egy 6 emeletes, kereszt alakú épületet fejlesztettek ki 40%-os WWR-rel a déli és 45%-os WWR-rel a nyugati oldalon, amely a legrosszabb forgatókönyvhöz képest 60,6%-os éves teljes energiaigény-megtakarítást eredményezett. A 2. fázisban a burkolóanyagok, a napterek udvar-üvegház morfológiájának és az aktív rendszerek optimalizálása kisebb javulást eredményezett: a CO₂-kibocsátás és az energiaköltség 23%-kal, a primerenergia-felhasználás pedig 9%-kal csökkent. Ez ismét igazolja, hogy a geometria döntően hozzájárul az energiahatékonysághoz. Az alapeometriákat a Rómában jellemző épületformák egyszerű megfigyelései alapján választották ki, és az épületfizikai eredmények elemzése kevés újdonságot nyújt. Az algoritmus "fekete doboz" jellege miatt számos hipotézis született az ellenkező értelmű megoldások lehetséges okairól, pl. mediterrán éghajlaton a burkolóanyagok esetében magas napvisszaverődési értékek (Solar Reflectance, SR) és vékony szigetelőréteg várható, az algoritmus azonban a nyári túlmelegedési (hűtési) stratégiák helyett alacsony SR-értékű anyagokat és vastagabb szigetelést választott a téli napenergia-akkumuláció céljából. Ez a hipotézis összhangban van más szakirodalmi adatokkal [88]. T. Ulrich és társszerzői munkájában [96] egy üvegház szélessége, magassága és Bézier-görbével kialakított nyeregrető változói paraméteroptimalizálás tárgyát képezik az energiafogyasztás célfüggvényével. Ugyanebben a tanulmányban egy városháza ellipszoid alakját módosították az ellipszoid főtengelyeinek arányának megváltoztatásával, és az alapellipszoid felénél egy méretezési tényezőt módosítottak az épület mind az öt szintjén. Ez a munka a formai tervezési változók, az éves energiaszükségletre gyakorolt erős hatását mutatja, ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy a kölcsönös összefüggéseket nem írják le az optimalizálási folyamatok vagy az épületfizikai jelentőség megértéséhez.

Az épületekkel kapcsolatos tulajdonságok mellett a várostervezési paraméterek, mint a tömbgeometria morfológiája, a közterületek (zárt, víz- vagy zöldterületek), a használati módok keveredése stb. szintén hatással vannak az energiahatékonyságra [57]. A városi tervezési optimalizációban a kitűzött célok elsősorban az épületfelületek napenergia-hatékonyságára [97] és a gépészeti rendszer beruházási és üzemeltetési költségeinek, valamint az üzemeltetési szén-dioxid-kibocsátásnak a minimalizálására [57] összpontosítanak a tömbök geometriájának és elrendezésének módosításával. J. H. Kämpf [52] három különböző városi formamorfológiai változatot ellenőriz és érvényesít a hővesztésekkel ellensúlyozott besugárzás maximalizálása és az épített térfogat minimalizálása érdekében. A "teraszos udvarok" (udvarok) morfológiai változatai teljesítettek a legjobban az energianyereség és -vesztések tekintetében. Ezt az eredményt a legnagyobb kollektorfelületeknek köszönhetően érték el, miközben a térfogat kompakt maradt. Bár energiaoptimalizálás nélkül, egy másik tanulmány formanyelvi szabályokat javasol a városnegyed morfológiájának generálására vonatkozó szintaktikai szabályok kódolására, a megoldásokban GA optimalizációt alkalmazva [98]. C. Waibel [57] négy egyszerű irodaház sarokpontjának 3d-koordinátáinak optimalizálásáról számol be egy városnegyedben. A szélsőséges szén-dioxid kibocsátással rendelkező optimális tömbök geometriái szabályosak, míg a két szélsőséges esetek közötti intervallumban a geometriák szabálytalanabbá válnak (a napfény- és napfényhasznosítás egyensúlyban tartása a rendelkezésre álló alapterülettel és tájolással). Az egymást követő optimalizálás során először a geometria (energiaigény) optimalizálása történik, majd ezt követően folytatódik az gépészeti rendszer és a napenergia-hasznosítás optimalizálása. "Beágyazott" optimalizálás esetén: a geometria (energiaigény) optimalizálása az energetikai rendszer és a napenergia-potenciál optimalizálásával egyidejűleg történik. Az egymást követő optimális geometriák É-D-i

tájolásúak, míg a fészekbe ágyazott geometriák több izotróp testet tartalmaznak. A következtetések miatt az épületgeometria és az energetikai rendszerek kölcsönösen függenek egymástól, és egyszerre kell optimalizálni őket. Mindazonáltal csak alapvető blokkformákat vizsgáltak egy black-box jellegű optimalizálóban, továbbá megállapítható, hogy bizonyos aktív rendszerek befolyásolják az épület formáját, sűrűségét és tájolását. A fenti állítás nem minden esetben állja meg a helyét: a rendszerválasztáson alapuló épülettervezés olyan megoldásokhoz vezethet, amelyek pillanatnyilag megfelelőek lehetnek, de például egy technológiai váltás után biztosan elavulhatnak. Tekintettel az épület élettartamára (kb. 100 év) és a HVAC-rendszer élettartamára (rendszerrel függően kb. 15-25 év), az aktív rendszerek hatását a passzív építészeti tervezési változókra figyelembe kell venni tervezési döntések során. J.H. Kämpf és D. Robinson [97] városi épülettömb-konfigurációkat optimalizál három alkalmazásban: kocka alakú épületek egy településnegyedben; komplex épületformák egy meglévő ház mellett és egy téglalap alaprajzú épülettömeg (Fourier-sorozatokkal paraméterezve). Az érdekes és változatos alkalmazások meglehetősen szemléletesen bizonyítják a módszert.

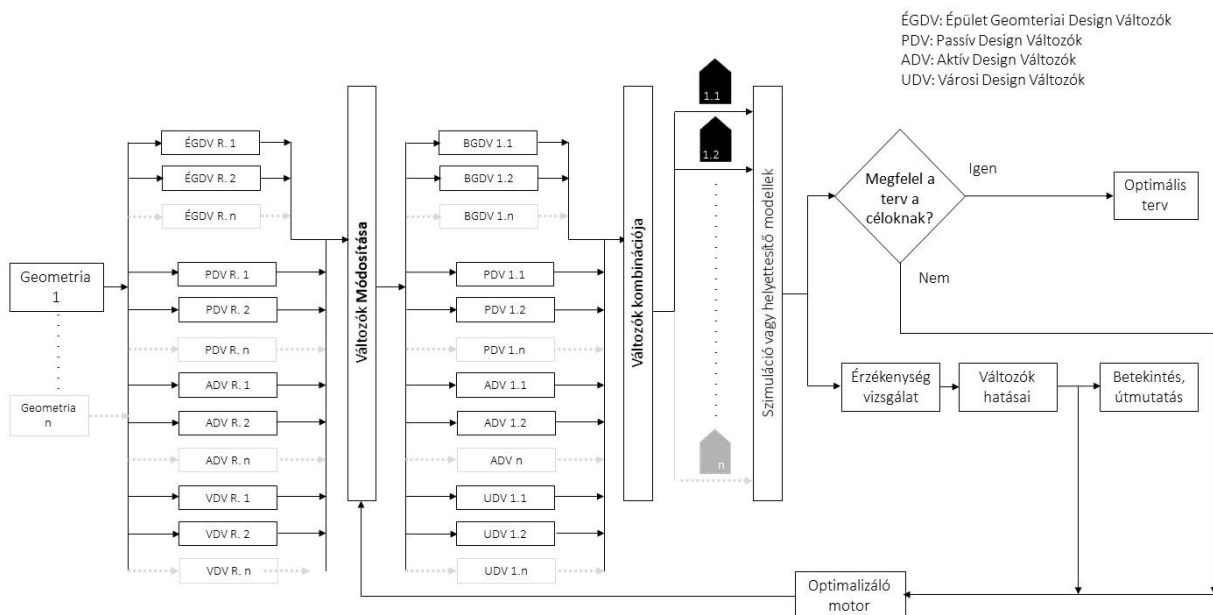
2.1.5. Épülettervezés optimalizációs kutatás, beleértve az épületformák generálását az eseti változatok létrehozásához.

Az optimalizált többszalagos házalaprajzok automatizált generálása a fűtési, hűtési és világítási költségek minimalizálása és a lakótér maximalizálása érdekében J. J. Michalek [99] keresi az egymással összefüggő téglalap alakú téregységek legjobb helyét és méretét. Egy két dimenziós alaprajzú topológiát készítettek a tanulmány szerzői, de az energetikai szempontok többé-kevésbé figyelmen kívül maradtak. Egy újonnan javasolt energiahatékony formakereső (Efficient Form-finder, EEF) optimalizálási keretrendszer [48] 1998-ban optimális megoldást hozott létre egy többszintes irodaház tervezése kapcsán. A fűtési-hűtési igény és a termikus diszkomfort csökkentése érdekében, különböző városi sűrűségtartományokat és emeletszámokat generáltak a cellák (téregységek) elrendezési szabályai szerint, az "épület moduláris cellák" (BMC) formakereső szkript alkalmazásával. A tájolást és a WWR-t formakombinációkkal párosították. A különböző városi sűrűségű környezetekben megoldásokat javasolnak a formára, a tájolásra és az udvarok kiosztására. Az eredmények azt mutatják, hogy a geometria jelentősen befolyásolja az energiahatékonyt (7,2-37,3 kWh/m²a megtakarítás) és a termikus diszkomfort csökkentését (12,2%). V. J. L. Gan és társai [49] magas lakóépületek elrendezésének optimalizálását végezték el a légkondicionálás és a világítás energiaigényének minimalizálása érdekében. T- és I-alakú épületeket generáltak a különböző tájolások, helyszíni korlátok, a lakások száma és típusa, a lakások folyosók mentén történő elrendezése és a megközelíthetőség (tűzvédelmi menekülési útvonal) függvényében. A lakások és épületszárnyak (magasépület elrendezése és így alakja) geometriájának optimalizálása, a tájolás és a természetes szellőzés révén 13-33%-os villamosenergia-megtakarítást értek el.

2.1.6. Következtetések

Általános szinten az összes épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációs folyamat, beleértve az alakváltoztatást is (2.1.4.-2.1.5.fejezet), jellemzően egy közös, alapvető módszertani elvre bontható (7. ábra): Az adott tervezési feladatnak megfelelően egy vagy több kezdeti épülettervet javasol az építész tervező általánosan. A terek kidolgozása korlátozott számú, többnyire túlságosan leegyszerűsített, alapvető épületgeometriai tervezési változók kiválasztásával történik, amelyek könnyen értékelhetők és alkalmazhatók egyszerűsített épületformákban (pl. oldalárány), bonyolult algoritmusok és számítási modellek

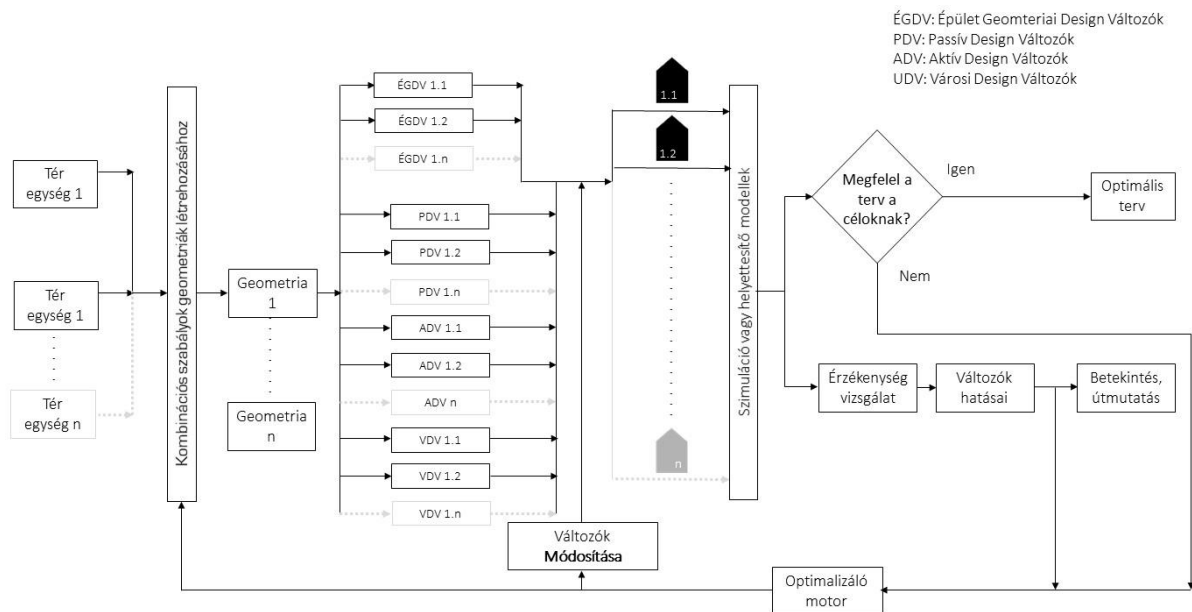
segítségével. Az alapvető alakzatok előre meghatározottak, statisztikák, szabályzatok, szabványok, irányelvek, valamint saját koncepciók, ökölszabályok vagy passzív tervezési elvek alapján. A formák nagy részét gyakran használják, de néha szokatlan geometriákat is alkalmaznak a mintakinálat bővítése érdekében. Ezeket az épületgeometriai tervezési változókat az épületburkolat tervezési változókkal, a passzív és aktív tervezési változókkal (passive design variable, PDV, active design variable, ADV), valamint a városi tervezési változókkal (Urban Design Variable, UDV) kombinálva jönnek létre a bemeneti adatok, ezután kutatás típusától függően e paraméterek módosítása is megtörténik. A módosítás után a módosított változók lehetővé teszik új formai változatokkal (és további passzív és HVAC rendszer kombinációkkal) rendelkező épület esetek előállítását. Ezután az épületfizikai és LCA-teljesítményértékeket termikus-, napfény- és egyes esetekben CFD-szimulációs motorok vagy helyettesítő előrejelző modellek (pl. Artificial Neural Network, ANN, regressziós modellek stb.) segítségével értékelik. A számítási eredmények bemeneti információként szolgálnak annak (számítógép általi) értékeléséhez, hogy az előre meghatározott célfüggvények megközelítése vagy teljesülése megtörtént-e. Ha igen, akkor létrejön az optimális kialakítás, ha nem (azaz az eredményértékek még mindig nem érik el elég közel az optimális célt), akkor egy optimalizáló motor (algoritmus) feladata az új tervváltozatok változóinak módosítása és kombinálása, amíg a célfüggvények nem teljesülnek. Emellett érzékenységi vizsgálatokat is végeznek különböző felbontási szinteken, részben az optimalizáló motor támogatása érdekében (visszajelzést adva a tervezési változóknak a célfüggvényre gyakorolt hatásáról), részben pedig azért, hogy betekintést nyerjenek, következtetéseket vonjanak le a tervezési útmutatókhoz/ajánlásokhoz.



7. ábra: Folyamatdiagram az épületgeometria-módosítási módszertan alapelvéről a
 épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációs folyamatok során

Ami a geometriagenerálást alkalmazó összes tanulmányt illeti (2.1.5.), azok is egy általánosan elterjedt módszertanon alapulnak, amit a 8. ábra folyamatábrája mutat be. Elvileg egy kényszer- vagy szabályrendszer segítségével először is egy épület (vagy városterv) különböző téregységeinek, szobáinak, lakásainak vagy szárnyainak kombinálása és elrendezése, és ennek eredményeképpen az épületformák sokféleségének létrehozása valósul meg. Ezt követően az épületgeometriákat PDV-kkel, ADV-kkel és bizonyos esetekben UDV-kkel kombinálják, teljes

épület eseteket hozva létre a későbbi épületfizikai és környezeti számításokhoz (szimulációs motor, metamodellek, helyettesítő előrejelzések). Ettől a szakasztól kezdve a lépések alapvetően azonosak a geometriamódosító módszerrel (7. ábra).



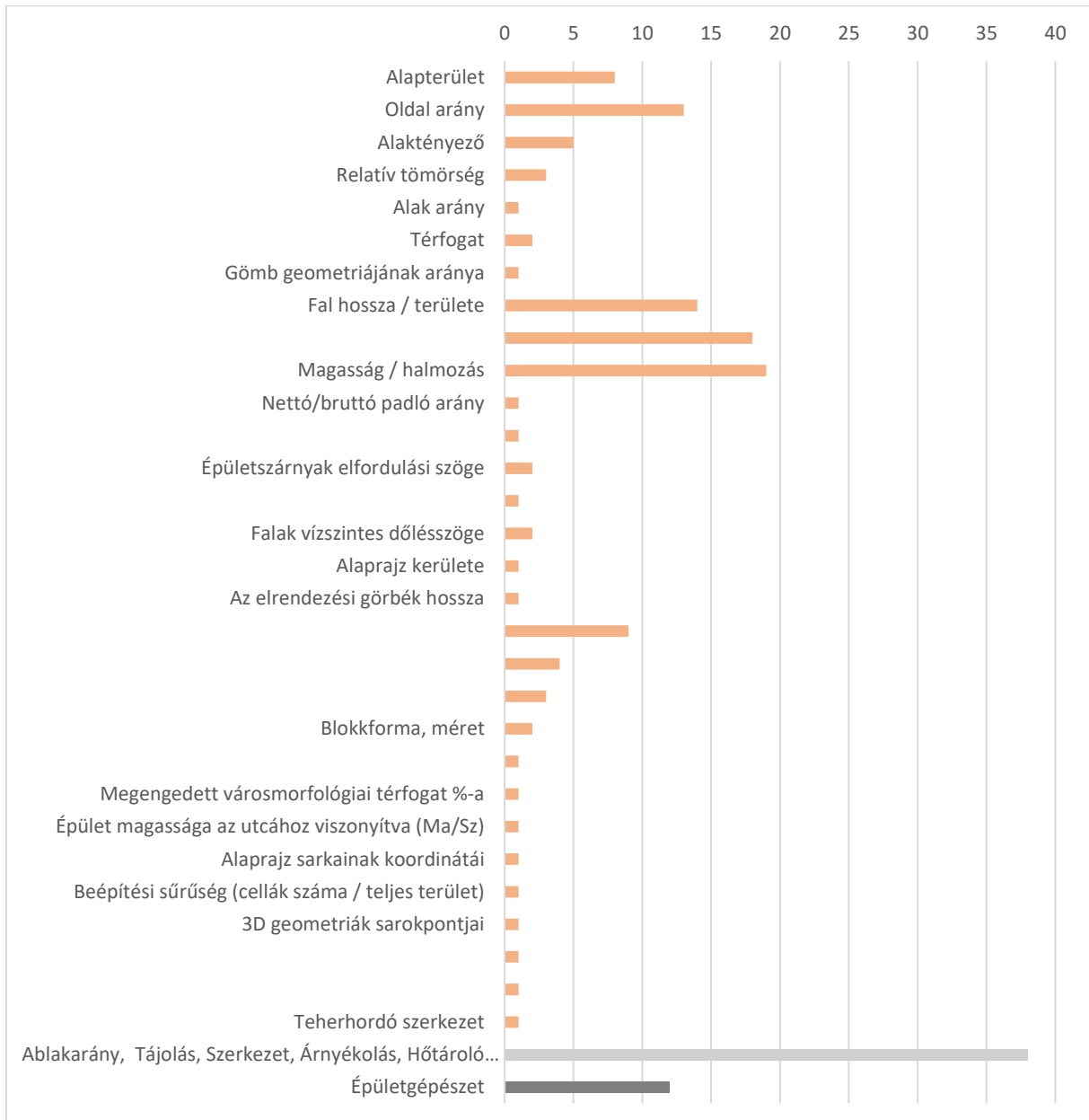
8. ábra: Az épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációs folyamatok során alkalmazott épületgeometria-generálási módszertan alapelveinek folyamatábrája

Összefoglalva, ezek a tanulmányok általában korlátozott számú, könnyen kiszámítható, egyszerűsített alakváltozót vesznek figyelembe, pl. az oldalarányt, az A/V-arányt vagy a relatív tömörséget, a méretet, a tetőhajlásszöget vagy a magasságot, anélkül, hogy a geometriát leíró tervezési változók teljes rendszerét figyelembe vennék, ami lehetővé tenné az energetikai, komfort és környezeti mutatókra gyakorolt hatásuk átfogó összehasonlítását és értékelését. Jellemző, hogy e cikkek többsége a javasolt módszert demonstrálja és egy egyszerű példán alkalmazza. Az alapvető, egyszerűsített formákat gyakran túlságosan leegyszerűsített szimulációs modellek segítségével határozzák meg, ami esetlegesen pontatlan eredményekhez vezet. **Egy másik jellemző jelenség az épületgeometriai tervezési változók egymás közti kapcsolatainak és ezen változók eredményekre gyakorolt hatásainak megfelelő leírásának hiánya**, míg ez nem igaz az épületburkolat tervezési változók és ADV-k esetében. A számított eredményekre vonatkozó épületfizikai következtetések többnyire nem tartalmaznak jelentős újdonságokat.

Sajnálatos módon a legtöbb továbbfejlesztett épületgeometriai tervezési változót alkalmazó tanulmányok csak az automatizált energia- és komfort-szimulációkat és az eredmények értékelését teszik lehetővé, optimalizálás nélkül (2.1.2.-2.1.3. fejezet). Bizonyos tanulmányokban a nem megfelelő következtetések azt hangsúlyozzák, hogy a termikus burkolat vagy a szolgáltató rendszerek "felülírják" az alak jelentőségét az energia- és komfortteljesítmény esetében, ami csak akkor igaz, ha az optimalizálási folyamat során egyszerre több passzív és aktív tervezési változó konfigurációját veszik figyelembe. Ez a megfontolás azonban figyelmen kívül hagyja azt a tényt, hogy ha az elméleti tervezési folyamat során először a tömegformát optimalizálják, a további passzív és valamennyi aktív változót javító későbbi tervezési lépésekben jelentős megtakarítások érhetők el. A formakialakítás módosításai az építés során a későbbi anyag- és HVAC-rendszer-specifikus beruházásokhoz

(LCCA) képest alacsonyabb kiadásokat igényelnek, ezért az épületgeometria nem független az energetikai tervezéstől, azaz egy alacsonyabb energiaigényű forma például nagyobb hőátbocsátással rendelkező burkolatszerkezeteket és kevesebb gépészeti rendszert tesz lehetővé.

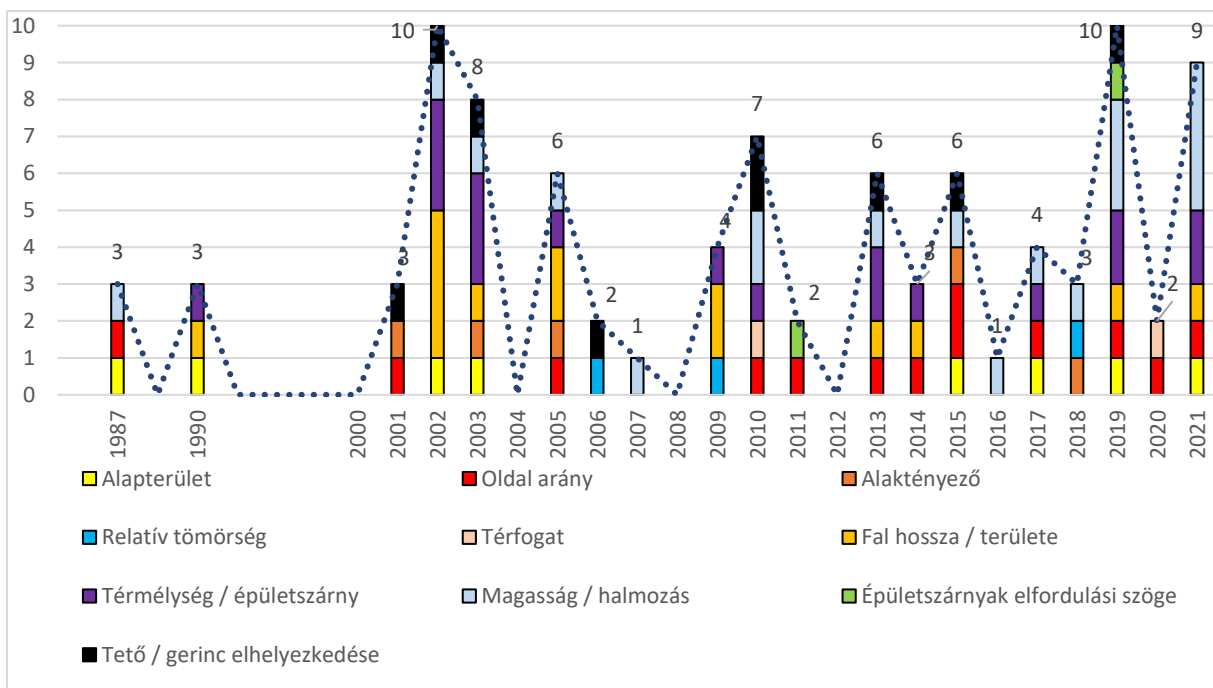
A 9. ábra rendszerezi az 1987 és 2021 között megjelent tanulmányokat a különböző épületgeometriai tervezési változókat alkalmazó kutatások mennyiségének kategorizálásával. A 30 épületgeometriai tervezési változót (narancssárga színű), és két további osztályt is értékelünk, amelyek az épületburkolat tervezési változók (világosszürke színű) és az aktív tervezési változók (sötétszürke színű) osztályait képviselik.



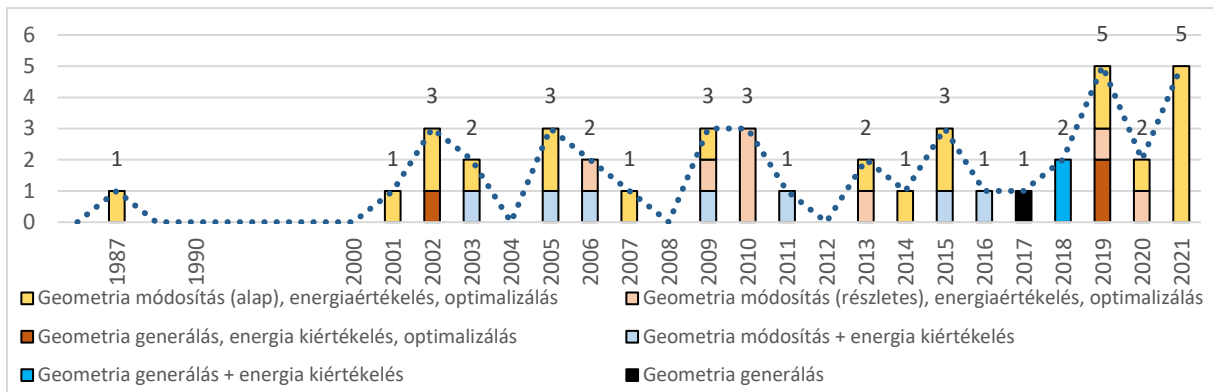
9. ábra: A épületgeometriai tervezési változókat alkalmazó publikációk száma (1987-2021) a épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációs kutatásokban

A leggyakrabban használt épületgeometriai tervezési változók - főként az utóbbi két évtizedben - a méretarány, a magasság, a tér- vagy szárnymélység, a fal- és padló méret, valamint a tető

paraméterei. Míg az alkalmazott épületgeometriai tervezési változók közül ezek a változók képesek a leghatékonyabban leírni az épület alakját, további változók (alaktényező és tömörség) állnak közvetlenebb kapcsolatban az energetikai mutatókkal. A épületgeometriai tervezési változókat szinte minden publikációban épületburkolat tervezési változókkal kombinálják, ezért nagy számban található az épületburkolat tervezési változók alkalmazása. A leggyakoribb és legfontosabb épületgeometriai tervezési változókat a 10. ábrán külön-külön, időrendi sorrendben értékeljük, hogy elemezzük az alakváltozók alkalmazási gyakoriságának tendenciáit az épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációkban. Az épületgeometriai tervezési változók alkalmazásának jellemző kombinációja a tető, a magasság, a mélység, a homlokzat és az oldalarány változókat tartalmazza. Az elmúlt évtized elejétől kezdve növekvő tendencia figyelhető meg az épületgeometriai tervezési változók alkalmazásában. Megközelítőleg 2010-től kezdve egyre nő az épületgeometriai szempontokat is figyelembe vevő vizsgálatok száma, valamint azoké a tanulmányoké, amelyek a épülettervezési optimalizációs folyamat során az energia-, komfort és környezeti teljesítmény visszajelzésektől közvetlenül függő épületformákat kezdenek generálni (11. ábra). A legtöbb épülettervezési optimalizációs vizsgálat az alak módosítását, mint technikát integrálja, míg 65,6%-a az alapvető épületgeometriai tervezési változók -kezelésére (sárga színű) módosítással tesz kísérletet, a épülettervezési optimalizációs vizsgálatok 25%-a pedig a épületgeometriai tervezési változók optimalizálásának fejlettebb szintjét (világospiros színű) módosítással éri el. Csak néhány munka, az épülettervezési optimalizációs tanulmányok 9,4%-a (barna színű, geometria generálás + energiaértékelés + optimalizálás) dolgozza ki a teljes, többé-kevésbé átfogó geometria generálást az optimalizálási folyamat során. Ez utóbbi csoport (összesen 3 tanulmány) képviseli a legfejlettebb épületgeometriai tervezési változó-alapú optimalizálást.



10. ábra: Az energiaterjesítményhez kapcsolódó gyakori és jelentős épületgeometriai tervezési változók időrendi sorrendben



11. ábra: Geometriamódosítással és geometriagenerálással végzett vizsgálatok energiaértékeléssel és optimalizálással és anélkül, időrendi sorrendben.

Az értékelte szakirodalom alapján a következő épület térszervezési és alakmeghatározási módszerek csoportjai határozhatóak meg: alkalmazása javasolt:

→ Geometria generálás energetikai értékelés nélkül:

- o Geometria generálás ágens alapú topológia kereső rendszerrel. Térszervezés generálás, mint topológia kereső eljárás. Gömb és kapszulabuborék ágensek generálása. Interakciós szabályok, mint a vonzás, taszítás, csere és tömörítés segítik a több ágensből álló rendszerek, mint elrendezési sémák generálását. A saját fejlesztésű program kapcsolódó helyiségeket (ágenseket) közelebb húz, és a nem összekapcsolt helyiségek eltolják egymást, ha túl közel vannak egymáshoz. Egy téglalap alakú cellákon alapuló 3D rácsrendszer a multiágens elrendezést térbeli modellé alakítja át.

→ Geometria módosítása energetikai értékeléssel (A függelék):

- o A különböző épületgeometriai tervezési változók megváltoztatása
- o Városi tömbök geometriájának és beállítási elrendezésének módosítása. 4 és 8 emeletes egyszerű prizmatikus épülettömb-morfológiai változatok.

→ Geometria generálás energetikai értékeléssel (A függelék):

- o Formanyelvi szabályok (parametrikus rendszerre alakítva). Változatok programozása: alakváltozatok (méretarány, tükrözés, fordítás, forgatás) egyenletekké és változókká való átalakítása. Minden helyiséget blokként modellezünk, változtatható oldalárányokkal, hosszúsággal, szélességgel, alakkal, mérettel és elhelyezkedéssel. A formák automatikus energetikai értékelése.

- o Nagyszámú épületgeometriai alternatíva generálása az "Evolutionary Program for Space Allocation Program" (EPSAP) segítségével, beleértve a GA-t is. Egy alaprajz ábrázolási sémát foglal magában, beleértve az emelet bruttó területét, a szerkezeti területet, a közlekedőterek területét és a nyílásokat, melyek véletlenszerűen generálódnak, majd az energetikai eredményeket kiszámítják.

- o A "Building ModularCells" (BMC) geometria-generálási technikát vezetnek be a tanulmány szerzői a városi morfológia generálásának céljából, egy különböző városi sűrűségű épületkategóriákat, épületmagassági osztályokat és városi mintákat (az épülettömbök közötti utcaterület) tartalmazó rácsraszter és egy formageneráló

algoritmus alapján, beleértve az építészeti alkalmas formák kiválasztását. A téregységek (moduláris cellák) a formagenerálási szabályok alapján kerülnek elrendezésre.

→ Geometriamódosítás energetikai kiértékeléssel és optimalizálással (B. függelék):

o A változatos épületgeometriai tervezési változók megváltoztatása.

→ Geometria módosítása energetikai kiértékeléssel és optimalizálással (C függelék):

o Különböző épületgeometriai tervezési változók cseréje.

o A két dimenziós elrendezés és a topológia automatikus generálása. Az egymással összefüggő téglalap alakú terek legjobb helyének és méretének megtalálása. (1) Két téregység pozícióinak felcserélése, (2) a pozíciók perturbálása, (3) egy téregység méretének csökkentése. Az átfedések korlátozása, a terek, utak és bejáratok kapcsolatainak és burkolatának szabályozása.

o Település léptékű épülettömbök morfológiai optimalizálása a napenergia-felhasználás szempontjából (fűtés, világítás is). Változatosan tájolt épületsorok és udvari tömbelrendezések vizsgálata.

o Hibrid evolúciós algoritmust alkalmaznak peremfeltételek korlátainak kezelésével, mint városi épületkonfiguráció optimalizálási módszert. Továbbá ezek a kutatások tartalmaznak városi tömbhálózati sűrűség (tömbök száma) és magasság optimalizálást, komplex bővítési épület- és tetőformák egy meglévő ház mellett); téglalap alakú, alaprajzú épületeket térfogatuk szerint, Fourier-sorozatokkal paraméterezve.

o Egyszerű irodai épülettömbök geometriájának (energiaigény) optimalizálása egy városnegyedben, a sarokpontok vízszintes és függőleges helyzetének optimalizálása.

o Közönséges vonalas (I), L- (L), udvari (O), C- (C), T- (T), H- (H), kereszt (X) és Y- alakú (Y) épületek geometriájának optimalizálása (LOD 100). Több geometria arányos (a tér mélysége/szárnyak) módosítása "génként" ugyanazon térfogat alatt.

→ Geometriagenerálás energetikai értékeléssel és optimalizálással (C. függelék):

o "Building Modular Cells" (BMC), egyedi fejlesztésű geometria-generálási technika, amely 4x4-es raszterrácson alapul az optimum keresésére öt darab magas irodaházban, öt városi sűrűségű (UD) területen. Téregységek kombinációs szabályok szerint elrendezve.

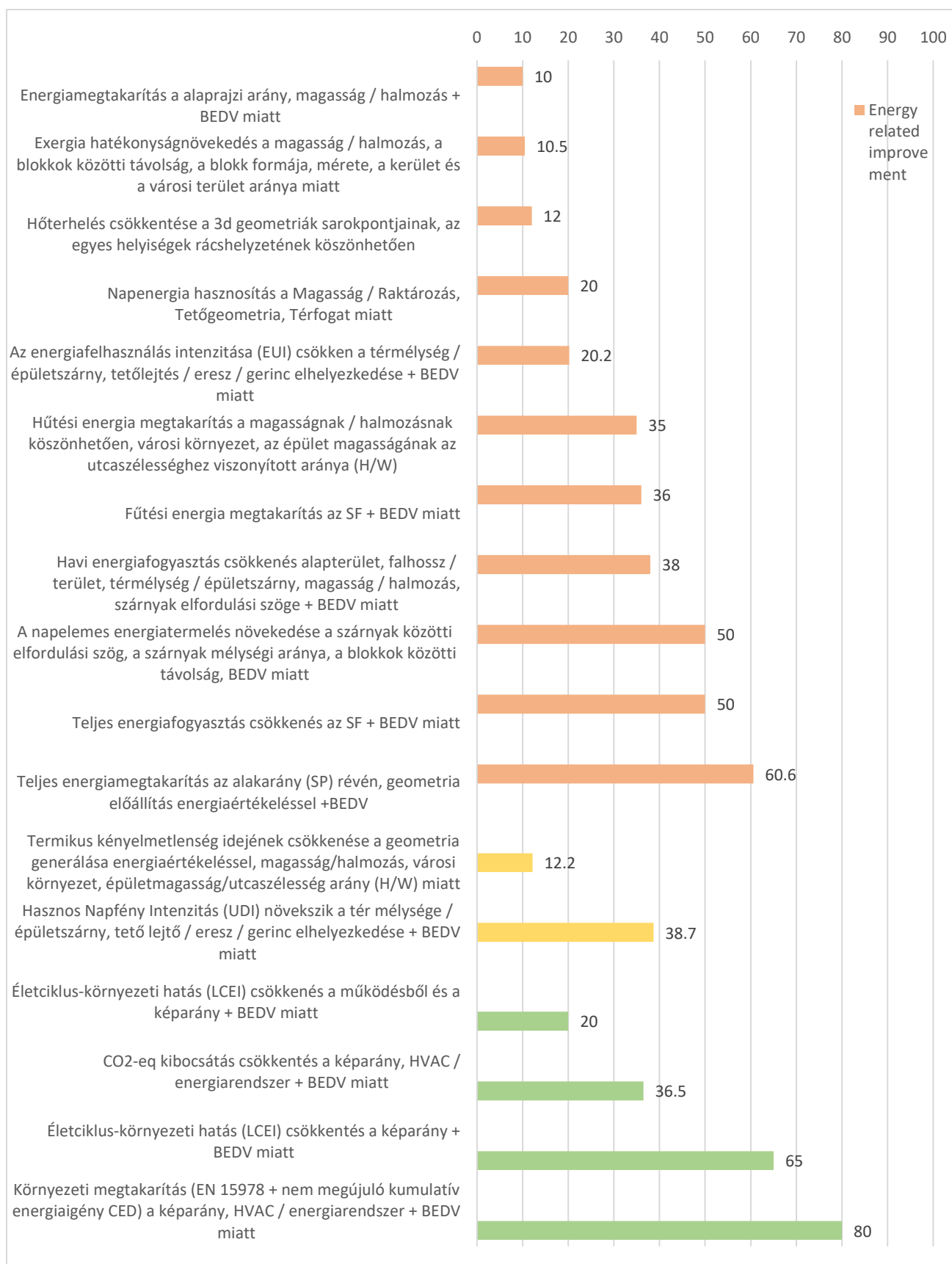
o GA két fázisban generálja az alaprajzokat: különböző szárnyak kombinációja (forgási szög) a forma kialakításához és a lakások elrendezése az épületszárnyakon belül.

A 12. ábra a különböző célfüggvények tekintetében az áttekintett munkák javulásának százalékos arányát mutatja. Érdekes megemlíteni, hogy a 45 értékelt épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációs tanulmány közül csak 17 tanulmány tartalmazott a célfüggvények számszerűsített hatásaira (javításaira) vonatkozó tartalmat. A legtöbb tanulmány az energetikával kapcsolatos fejlesztéseket értékeli, míg a komfort és környezetre vonatkozó fejlesztéseket ritkábban számszerűsítik az adott kutatás sikerének

mérőszámaként. Az épülettervezési optimalizációs erőfeszítések nagy része inkább a tervezési változóknak a célfüggvényre gyakorolt hatását vizsgálja, mint egyfajta érzékenység vizsgálatnál, vagy csak az optimalizálási vagy érzékenységvizsgálati keretrendszerük általános, nem pontos hatását vagy tendenciáit jelzik. A legnagyobb energetikai vonatkozású javulást (több mint 60%) az épületgeometria (alakarány) optimalizálása az épületburkolat tervezési változókkal (WWR, tájolás) kombinálva érte el, és a környezetre vonatkozó megtakarítások tekintetében is nagyfokú (80%-os) javulás volt lehetséges, amely a nem megújuló kumulatív energiaigényt tartalmazza az oldalarány, az épületburkolat tervezési változók és az aktív rendszer optimalizálásának köszönhetően. A komfort, mint optimalizálási cél alig van figyelembe véve, ami további kutatás szükségességét jelzi.

A rendelkezésre álló tanulmányok a legkülönbözőbb helyszíneken hajtották végre vizsgálataikat, így az éghajlati viszonyok nagy változatosságát is figyelembe vették. Bár az épületforma eltérő módon teljesít a változó éghajlati zónákban, a hideg és a meleg éghajlatú területek mindegyikén jelentős hatással van az épületenergetikai, komfort és környezeti vonatkozású eredményekre. Mivel a geometria általában minden éghajlati körülmény között kulcsszerepet játszik, a jelenlegi szakirodalom éttekintő vizsgálatában az éghajlati kritériumokat nem értékelem külön, hanem inkább a geometria és változóinak az optimalizálási folyamatban betöltött szerepére koncentrálok.

Fontos megemlíteni, hogy a számított eredmények mérésekkel, referenciaadatokkal, szakirodalommal stb. alátámasztott validálása csak öt alkalommal került elvégzésre az értékelt tanulmányokban.



12. ábra: Az energetikai, a komfort és a környezeti teljesítmény javulása [%] a épületgeometriai tervezési változók, a épületburkolat tervezési változók és a HVAC rendszer variációinak köszönhetően a vizsgált tanulmányokban

2.2. Algoritmusok a épületgeometriai tervezési változóknak, beleértve a épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációt is

A probléma típusa és a szükséges matematikai leírás alapvetően befolyásolja az optimalizációs algoritmus(ok) teljesítményét, ezért az elmúlt két évtizedben rengeteg módszert fejlesztettek ki az épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezés optimalizációs projekteknél. Egy teljes épület szimulációval kombinálva az algoritmusok nagy feldolgozási erőforrásokat (időt és hardvert) igényelnek, ezért a nagy keresési térből álló probléma egyszerűsítésére és az érzékenységi és bizonytalansági elemzés elvégzésére való törekvés először, majd az optimalizálási eljárásra való áttérés tendenciái előnyös megközelítésnek bizonyulnak [25].

A épülettervezési optimalizációban alkalmazott algoritmusok többsége három csoportba sorolható: evolúciós algoritmusok (EA), származékmentes algoritmusok és hibrid algoritmusok (az első kettő kombinációja) [21]. Az evolúciós algoritmusok (EA) az értékelt irodalom több mint 60%-ában (66%) vannak jelen (A-E függelék), döntően a genetikai algoritmusok (GA) és a hibrid GA-k használata dominál [20], [24], [32], [33], [36], [38], [39], [70], [46],[54],[95],[48] (13. ábra). A GA-t többnyire globális keresésre használják, és jól alkalmazható nemlineáris problémák optimumának megtalálására is abban az esetben, ha diszkontinuitásokat (diszkrét értékekkel) [24] és számos lokális minimumot is tartalmaz a probléma. Nagy mennyiségű mintát igényel, amelyeket később nem veszünk figyelembe, mivel ezek nem közel optimális vagy nem domináns megoldások. Nagy szimulációs teljesítményre van szükség a nagy esetszám miatt.

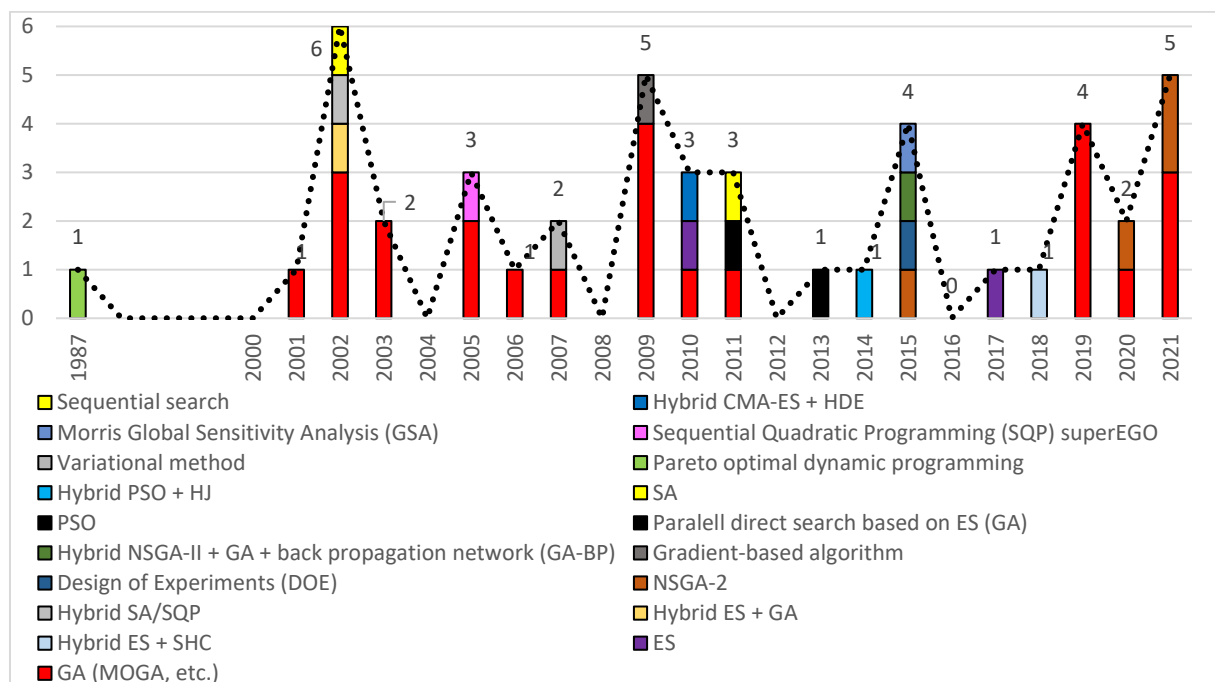
E probléma megoldására gyakran alkalmaznak egyszerűsítéseket (a populáció csökkentése) (de ezek nem optimális megoldásokhoz vezethetnek) vagy a multimodális függvények módosítását, a fitnessfüggvény átalakítását, hatékony szelektációs mechanizmusokat, rangsorolást, particionált GA-t és „niching”-et. A felosztott populációk és futások szerencsésen kezelhetőek általában, de ha a túl hasonló konvergenciáknak van egy nem illeszkedő szála, akkor az optimumot el lehet téveszteni. A GA keresési folyamat véletlenszerű jellege nem garantálja, hogy véges számú iteráció után megtaláljuk az optimális megoldást [20]. Továbbá a GA csak közel optimális megoldást ad, és sok esetben nem is mindig éri el az optimumot [100].

A véletlenszerű kezdeti populáció és a sztochasztikus operátorok nem tudnak jobb megoldást garantálni, mint az általános tervezési gyakorlatban. Bár a lokális optimalizáló általában hatékony, a diszkrét változókat nem tudja kezelni, ezért a jó egyéni megoldásokat a tapasztalatokon alapuló tervezési gyakorlatnak a kiindulási ponton kell feltételeznie, vagy a korábbi globális keresés lefuttatása ajánlott [25].

További korlátozás, hogy a végső megoldás még mindig nem biztos, hogy optimális, mivel a GA-k integrális tulajdonságai miatt nehéz bizonyítani az optimumot. A GA optimalizációs megközelítés fekete dobozként viselkedik, és a tervezők nem tudják nyomon követni a háttérben zajló folyamatokat [87].

A jelenlegi trendek a GA-ról a nem domináns rendeződésű genetikai algoritmusok II (NSGA-II) [20], [23], [21], [24], [11], [12], [25], [26], [33], [34],[35], vagy a többcélú genetikai algoritmusok (MOGA és MOGA-II) felé mozdulnak el, mert ezek jobban alkalmasak az épülettervezésben jellemző MO keresési problémák kezelésére [101], [17], [18], [19], [20], [23], [21]. A többi nem genetikai algoritmus többnyire az EA-tartomány részét képező

részecske raj optimalizálásból (Particle Swarm Optimization, PSO)[101] kis számban, valamint pusztán derivátummentes, direkt kereső algoritmusokból (pl. Hill Climbing Method, Hooke-Jeeves algoritmus, HJ) és hibrid kombinációkból áll. A közvetlen kereső algoritmusok heurisztikus szabályokkal keresik a megoldási teret, folytonos célfüggvényt igénylő derivátumszámítás nélküli célfüggvényt. Robusztusabbak a zajos függvényekkel szemben, és képesek jó megoldásokat szolgáltatni, amennyiben csak kis költségfüggvény-szakadásokat és kis lokális optimumokat kezelnek. A hibrid algoritmusok jobb optimalizálási teljesítményt érhetnek el az egyedi algoritmusokhoz képest, de az előnyök erősen függenek az adott probléma algoritmusainak, célfüggvényének, kényszereinek, vezérlési paramétereinek stb. kombinációjától [101],[21], így nehéz általánosan rendszerezni őket. A szokásos eljárás egy EA-t alkalmaz globális kereső algoritmusként egy közel optimális megoldás felderítésére, ezt követően ez szolgál kiindulópontként egy közvetlen kereső lokális optimalizáló számára. Ennek a kombinációnak a hatékonysága magas.



13. ábra: Az alkalmazott optimalizációs algoritmusok száma a épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációs tanulmányokban időrendi sorrendben

Sajnálatos módon az algoritmusokat többnyire anélkül alkalmazzák, hogy alaposan figyelembe vennék azok hatékonyságát és eredményességét. F. Kheiri [24] átfogó áttekintést nyújt a különböző optimalizációs algoritmusok teljesítményéről az épületenergetika területén. Nehéz általános ajánlásokat levezetni az egyes optimalizációs algoritmusok teljesítményére vonatkozóan, mivel az algoritmusok teljesítménye feladatonként eltérő, a probléma jellemzőitől függően. A változók számának vagy a célfüggvény durvaságának módosításával például egyes módszerek egymást felülmúló teljesítményt okozhatnak, és fordítva. F. Khieri nyolc kritériumot fogalmazott meg, amelyeket figyelembe kell venni egy optimalizálási módszer alkalmazásakor: Robusztusság az optimum megtalálásában hasonlóan a Binghui Si által megállapított szempontokhoz [101], további robusztusság az értékelésben is; hatékonyság, beleértve a számítási időt és a memóriát; pontosság; egy vagy több változót tartalmazó alacsony (egy vagy néhány változó) vagy magas dimenziójú (nagy számú változó) feladatok; a probléma egy vagy többcélű jellege; a probléma lokális vagy globális optimalizálási jellege; diszkrét vagy

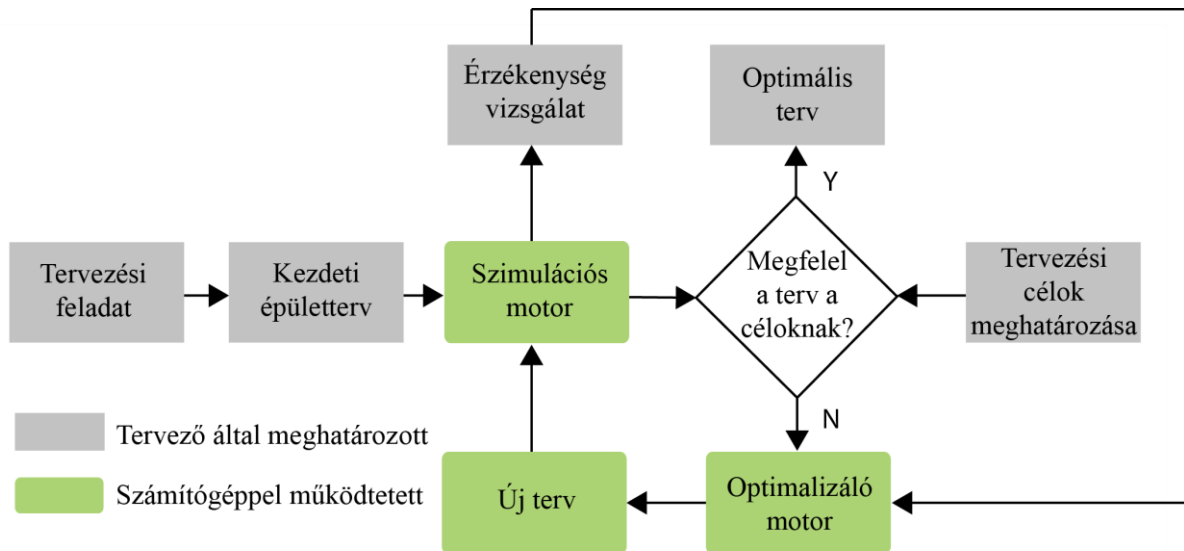
folytonos változók, mivel az építő paraméterek lehetnek diszkrét (pl. pl. emeletek, falak, árnyékolások stb. száma) és folytonos (pl. geometriai mérőszámok, mint a hossz, terület, térfogat stb.). A folytonos értékek diszkrétizálhatók például konkrét méretű lépésekben történő rendszerezéssel. Binghui Si és kutató társai munkájában [101] a MOGA-II, a HJ és a MOPSO összehasonlítására hat teljesítménymutatót határoztak meg egyenletek segítségével: stabilitás (ugyanazon teszt során ismételten következetesen megtalálja az optimális megoldást), robusztusság (megtalálja az optimális megoldást akkor is, ha a vezérlési beállításokat megváltoztatják), érvényesség (megtalálja a valódi optimális megoldást a célfüggvény kiértékelésének korlátozott mennyiségén belül), sebesség (konvergencia sebessége az optimális megoldáshoz), lefedettség (a teljes megvalósítható megoldási térben való keresés képessége), lokalitás (a közeli optimumkörüli finomhangolás képessége a valódi optimum eléréséhez). Egy közepes irodaház DOE-tesztjében az ablakok helyzetét, tájolását és az átlátszatlan burkolat hőtechnikai tulajdonságait optimalizálták, és kiderült, hogy a lokalitás tekintetében a MOGA-II és a MOPSO általában jobban teljesített [101]. Figyelem és megfelelő ismeretek szükségesek a megfelelő optimalizálási módszer gondos kiválasztásához a probléma jellege és a módszer jellemzői (a teljesítménymutatók előnyei és hátrányai) alapján, hogy ne kapjunk a globális optimum helyett a lokális optimumot.

Az algoritmusok teljesítménye a szimulációs programtól is függ. A szimulációkban a költségfüggvény egyenletessége számos hatékonyabb algoritmus alkalmazhatóságát teszi lehetővé [25]. Mivel az épületteljesítmény-szimulációban a tulajdonságok és jelenségek gyakran nem lineárisak és nem folytonosak [20], a rendelkezésre álló algoritmusok nem képesek valódi optimális megoldásokat garantálni, mivel a legtöbbjük egyenletes költségfüggvényt igényel. Ezért a kívánt algoritmusoknak nem kell derivátumokat számítaniuk, mint például a valószínűségi evolúciós és a determinisztikus közvetlen keresés esetében.

2.2.1 Az algoritmusok szerepe az építészeti tervezés optimalizálásában

Minden építészeti, építéssel kapcsolatos kutatás egyik fontos része kell, hogy legyen az, hogy a funkcióban meghatározatlanság van, hiszen olyan igényeket is kielégíti terv, melyre a megrendelő-felhasználó nem is gondolt. A meglepetés a kreativitás feltétele. A funkciók vagy a tervezési folyamat számszerűsítése az építészetet a mérnöki tudomány szintjére emelné, de az építészet több ennél. Kreatív rendszert kell létrehozunk; vannak olyan folyamatok, amelyek természetüknél fogva egyfajta kreativitással járnak, és algoritmusokkal is leírhatók. A biológiai evolúció hasonló tulajdonságokkal rendelkező folyamat genetikai szinten [65].

Általános szinten minden energiahatékony tervezési optimalizálási módszer ugyanazon az elven alapul: a konkrét tervezési feladatnak megfelelően egy kezdeti épülettervet javasol a tervező. Ezt követően az épülettervezés teljesítményértékeit egy energiaszimulációs motor számítja ki, hogy kiértékelje (a számítógép), hogy az előre meghatározott célfüggvények (a kívánt épületteljesítmény) teljesülnek-e. Ha igen, akkor az optimális terv jön létre, ha nem, akkor egy optimalizáló motor (algoritmus) feladata új tervváltozatok létrehozása, amelyeket a szimulációkban tesztelni kell, amíg a célfüggvények nem teljesülnek. (14. ábra)



14. ábra Az általános optimalizálási folyamat

A tömeg és a forma algoritmikus optimalizálásához az összes szükséges változót matematikailag fel kell írni, ami elég nagy kihívásnak tűnik: egy négyzetes kocka alakú testhez több mint 10 változóra van szükség, és egy bonyolultabb forma jelentősen növeli a változók számát. Ez tükröződik a fent bemutatott szakirodalmi áttekintésben: az épület formáját az optimalizálási tanulmányokban többnyire nagyon alapvető változókkal veszik figyelembe (pl. oldalarány, magasság egyszerű geometriai kísérletek esetén). Továbbá a valós épületoptimalizálási esetek közül a legtöbbet felújítási projektekkel foglalkoznak, a fejlett országok erősen öregedő épített környezete miatt, valamint azért, mert a felújítási feladatokban a geometria rögzített, így nem szükséges bonyolult formai változókkal foglalkozni [21].

A legtöbb esetben a célfüggvényekhez nem kapcsolódnak kényszerített feltételek, csak néhány tanulmány alkalmaz pl. kvadratikus büntetőfüggvényeket a komfort határértékek teljesülésének biztosítására. A diszkrét változók pl. a közvetlen keresési módszerekhez nem alkalmasak, míg ha folytonos változóként írjuk le őket pontossági megkötésekkel, akkor ez a probléma elkerülhető. A nem folytonos célfüggvények nem alkalmazhatóak a közvetlen kereséshez. Minél több tervezési változót választunk, az egyes változóknak annál kevesebb variációja (általában 2-10 darabot használnak) lehet, hogy az optimalizáló algoritmus számos szimuláción keresztül eredményesen konvergálhasson. Ez a változók és opciók közötti antagonisztikus egyensúly döntő fontosságú a feldolgozási idő szempontjából [25].

A szakirodalomban az opciók és peremfeltételek kiválasztása - gyakran érzékenységi és bizonytalansági vizsgálatok segítségével a megfelelő tervezési változók megtalálása érdekében - a valós korlátokhoz képest nagyobb változatosságot mutat. Nem elhanyagolva a lehetséges új, innovatív tervezést támogató kölcsönhatások feltárásának valószínűségét, úgy tűnik, hogy a megoldások nagy része nem felel meg az ipari tervezési gyakorlat igényeinek. Az építési előírások, a helyi helyspecifikus korlátok és az ügyfél igényei miatt a lehetőségek száma csökken. Ráadásul sok építész és mérnök képzett és tapasztalt szakértő az épülettervezésben, akik - optimalizációs eszközök nélkül is - képesek ésszerű megoldásokat nyújtani a különböző tervezési követelmények teljesítésére. Az ilyen szakértői tudás nagy lehetőségeket rejt magában az épületoptimalizálásban, például a keresési tér csökkentésében. A rendelkezésre álló tanulmányok többnyire szakirodalmi forrásokon alapulnak, és ezért nem képesek teljesen megfelelő szabályokat (vagy egyszerűen döntések indoklását) javasolni a tervezési variációk és a célfüggvény kiválasztására. Nyilvánvalónak tűnik, hogy a megfelelő célfüggvény és tervezési változók kiválasztása kulcsszerepet játszik az optimalizálási projektekben [25].

Függetlenül az optimalizálási technikák fejlődésétől, a kimenet és így a teljes optimalizálási folyamat sikere erősen függ a tervező / fejlesztő / kutató által meghatározott bemeneti paraméterektől, tervezési változóktól, feltételektől, célfüggvénytől stb., valamint a tervezési szakértők tudásától az optimalizálási paraméterek finomhangolásában [24].

Az építészeti tervezés olyan paramétereket foglal magában, amelyek nem könnyen számszerűsíthetők, ezért építészeti tervezés optimalizáció egy nehezen meghatározható probléma [24].

Azokban az esetekben, amikor fejlettebb algoritmusokat használtak az optimalizálással együtt, ezeket a rendszereket nem alkalmazták az épület formák előállításánál [102].

Ezek a tanulmányok néhány bizonyos paraméterre összpontosítottak, és nem foglalkoztak egy épület teljes tervezési folyamatával; eredményeik pedig még mindig bonyolultak és nem egyértelműek a tervezőcsapatok számára, amelyeket általában építészek és várostervezők vezetnek. E tanulmányok többsége előre meghatározott esettanulmányokat használt néhány egyedi megoldással, amelyek csak a bemutatott állapotra és tervezési problémára alkalmazhatók, vagy analitikus becslési módszereket dolgoztak ki az épület teljesítmény értékeinek előrejelzésére és értékelésére, amelyek nem valós korlátozásokon alapulnak, és a gyakorlatban nem alkalmazhatók a tervezők számára.

A rendelkezésre álló szakirodalomból még mindig hiányzik egy olyan átfogó optimalizálási keretrendszer, amely az összes befolyásoló paramétert, célkitűzést és kényszert figyelembe veszi a formakereső eljárás során. Ezen optimalizálási keretek eredményei többnyire nem geometriai változókra, vagy összetett, többretegű, nehezen megvalósítható formákat foglaltak magukba, vagy csak néhány esetre és/vagy kis épületekre korlátozódtak, amelyek nem alkalmasak a tervezők számára a formakeresési folyamat kivitelezésére [48].

2.2.2. Optimalizációs platformok (eszközök): white box, black box, grey box

Az építészek, mint az optimalizálási módszerek végfelhasználói, a legfontosabb kérdés számukra az, hogy milyen számítási környezetre (eszközre) van szükségük az optimalizálási technika alkalmazásához. E tekintetben léteznek

1. az energiaszimulációs programokat általános optimalizációs platformokba integráló módszerek,
2. az energiaszimulációs programokat speciális optimalizációs platformokba integráló módszerek és
3. egyedi technikák [21].

Az (a) pontban például a MATLAB és a Genopt (mindkettő leginkább használt [20]), a ModelCenter, a modeFRONTIER optimalizációs algoritmusokat alkalmaznak és az nagy teljesítményű feldolgozási kapacitással rendelkeznek, míg a szimulációs programok integrálása ezekbe a keretrendszerekbe kihívást jelent (számítógépes kódolás szükséges). A Building Controls Virtual Test Bed (BCVTB) lehetővé teszi az EnergyPlus, ESP-r, Radiance, Matlab és Modelica integrálását a programok közötti kommunikáció érdekében [103].

A b) pontban pl. a jEPlus + EA, MOBO, Grasshopper, ENERGOPT, GENE_ARCH, TRNOPT, BEopt és Op-E-Plus kevesebb optimalizációs algoritmust biztosít, míg a szimulációk integrálása szinte programozás nélkül lehetséges.

A (c) módszer technikailag a legnagyobb kihívást jelentő (pl. C++, Fortran, Visual Basic MS Excel), miközben az optimalizálási folyamat teljes ellenőrzése biztosított. A leggyakrabban használt optimalizálási platformok a Matlab, a Genopt és az egyedi technikák csoportja. Fontos megjegyezni, hogy ezek a platformok nem kompatibilisek az építészeti modellező platformokkal, ezért még nem mindig lehet őket zökkenőmentesen integrálni az építészeti munkafolyamatba.

A legjobb platformok és algoritmusok lehetővé teszik a keresési tér minimalizálását és/vagy a keresés helyes útra terelését [25]. A szimulációk és az optimalizáló motorok összekapcsolásának akadályai: hiányzó interfészek, kompromisszum a pontosság-egyszerűség, képesség-használhatóság, rugalmasság-vizualizáció, hatékonyság-időtartam között [20].

2.2.3. Épületek teljesítményértékelési modelljei:

Egy teljes épületszimulációban a költségfüggvény kiértékelése hosszabb feldolgozási időt igényel, mint a következő iterációs eset paramétereinek meghatározása [25]. Az épületfizikai teljesítmény értékelése részletes modellek, helyettesítő modellek és egyszerűsített analitikus modellek segítségével történik. Ez utóbbiak inkább elméleti és egyszerű problémákat szolgálnak ki, matematikailag fejlett, részletes módon írják le őket [69]. A egyszerűsített analitikus modellek használata a tervezési gyakorlatban nem praktikus, mivel gyakran nem rendelkeznek a kívánt pontossági szinttel [24]. A valódi optimum könnyen elérhető optimalizációs algoritmusokkal vagy az összes lehetséges megoldást kereső „brute force” módszerekkel. Tipikus alkalmazásuk az épületek működésének irányításában találhatók. Az eredmények később közvetlenül felhasználhatók részletesebb, egész épületet átfogó modell bemeneteként.

A helyettesítő vagy meta-modelleket vagy emulátorokat az üzemeltetési kutatásokban és az épületfizikai optimalizálási munkákban alkalmazzák. (13. ábra) A modell egy gépi tanulási folyamat révén helyettesíti a komplex épületszimulációkat, jelentős számítási futási időt és modellezési munkát megtakarítva. A részletes szimulációs modell felépítése és futtatása után az eredményekből statisztikai adatbázist dolgoznak ki a meta-modell betanításához és teszteléséhez. A kívánt eredménypontosság eléréséhez a fekete doboz helyettesítő modell többszöri futtatására van szükség. A „grey box” azaz szürke dobozos modellekben részben fekete dobozos, részben analitikus modelleket kombinálnak. Jellemző technikák például a mesterséges neurális hálózat (ANN) [36], [104], a genetikai programozás, a Bayes-hálózatok [105] vagy a támogató vektor gépek (SVM) vagy a „Kriging”. Emellett az EA képes ANN-t is tanítani (neuro-evolúció) [106]. Az ANN nemlineáris matematikai modell, amely a biológiai-ideg hálózatok működését és szerkezetét utánozza, beleértve a bemeneti, kimeneti és rejtett rétegeket [83]. A hagyományos szimuláción alapuló módszerek korlátozottak az időigényes számítási időtartam miatt [68], amelyet az ANN jelentősen felgyorsíthat. Egy tanulmány 2570-szeres közelítő gyorsulásról számol be [83]. Előnye, hogy ez a módszer képes komplex épülettervezési problémákat kezelni nagyszámú tervezési változóval, nagyszámú lokális optimummal és hatalmas keresési térrel. A metamodell gyorsabb optimalizálási eljárást jelenthet, mint más többcélú optimalizálási módszerek [107]. Másrészt viszont az a hátránya, hogy szakértői ismeretekre van szükség a mesterséges intelligenciával kapcsolatban.

A helyettesítő modellek felgyorsítják a konvergenciát a függvénykiértékelés csökkentésével és a zajos reakciók kiegyenlítésével (tipikus probléma a épületoptimalizálás esetében, BOP) [108], [109]. A MATLAB-ban a DAKOTA, a modeFrontier response surface módszerek, az adatillesztések, a multi-fidelity modellek, a redukált rendű modellek, az ANN és a Bayes-hálózatok rendelkezésre álló helyettesítő modellek [34]. A [110]-ben 450 TRNSYS szimulációs futtatásból álló eredmény-adatbázist hoztak létre 3 hetes munkával egy ANN betanításához, majd ezt követően egy GA-t kapcsolnak az energia- és komfortteljesítmények optimalizálásához. Az ANN nélkül ennek a tanulmány befejezéséhez 10 évre lenne szükség. A [111]-ben egy 5000 szimulációs futtatáson alapuló adatbázis alapján képezték ki egy Support Vector Machine (SVM) modellt, amely közel azonos eredményeket szolgáltatott, mint egy 30 zónás EnergyPlus szimulációs modell.

A pontosság és az érzékenység még mindig egy fontos kutatási szempont, különösen akkor, ha nagyszámú bemeneti változót használnak, a bemeneti változók diszkrét, továbbá ha a költségfüggvény nem folytonos. Nincs konszenzus az eredmények pontosságának validálási módjáról, ezért a korrelációs együtthatót R^2 -ként vezetik be. A bemeneti adatokat gyakran véletlenszerűen és empirikusan választják ki az elemzők [20].

A szimulációs modell kalibrálásában az optimalizálási módszerek ígéretes megoldásokat kínálnak az időigényes, részletes „white box” eljárások felgyorsítására [112], [113].

A részletes épületszimulációs fehér vagy fekete doboz modellek a legkorszerűbb, kifinomult, nagy felbontású értékelési módszereket képviselik, amely szinte az összes épületfizikai folyamatot és környezeti hatást értékeli. Az általánosan használt termikus és fényviszonyokat modellező szoftverek az EnergyPlus, TRNSYS, IDA ICE, DOE-2, APACHE, Ecotect, ASHREA Toolkit, BLAST, EXCALIBUR, Daysim, Radiaence stb. és áramlástan modellező szoftverek az ANSYS, OpenFoam stb. Nagy szakértelemre van szükség a "garbage in and garbage out" elkerülése érdekében (csak annyit kell modellezni, amennyi minimálisan szükséges egy olyan szimplifikált modell létrehozásához, amely még mindig tartalmazza az összes szükséges kulcsfontosságú épületfizikai paramétert és folyamatot, és így megfelelő teljesítményeredményeket ad). Ezek nem lineárisak, és a kódjuk olyan függvényeket tartalmaz, amelyek az eredményekben diszkontinuitásokat generálhatnak, míg a rendelkezésre álló algoritmusok nem képesek valódi optimális megoldásokat garantálni, mivel a legtöbbjük költségfüggvények egyenletességét követeli meg. A BuildOpt egy szimulációs program, egyenletes sima modellekkel dolgozik, és az IDA ICE képes differenciálalgebrai egyenletrendszert (DAE) létrehozni, és egyidejűleg megoldja a DAE-t, ami ígéretes a közvetlen keresési módszerekkel való összekapcsolás tekintetében. A jól kidolgozott szimulációs programok érvényességét amerikai előírások [114],[115] szerint vizsgálják. A nagyfelbontású szimulációs programok általánosan nemlineáris, diszkrét értékeket számolnak[20].

Egy további megközelítés dinamikus célfüggvényt kezel, miközben a célok az optimalizálási eljárás során változnak vagy új célok jelennek meg, például a célfüggvény durvasága nagyobb vagy kisebb felbontásban változhat [116].

További kutatásokra van szükség a BOP-ok (Building Optimisation Problem) általános korlátaival kapcsolatban: nagy számítási igény, nagyméretű BOP-ok, a problémák többcélúsága, a tervezési változók bizonytalansága, peremfeltételek.[20]

A BOP-ok alkalmazása valós tervezési feladatokban még korai stádiumban van.[20]

Az optimalizálási költségek viszonylag könnyen csökkenthetőek a beruházási és üzemeltetési költségmegtakarítás révén, egyrészt nagyméretű épületegyüttesek esetén, másrészt a felhasznált technikák jövőbeni felhasználóbarátabbá válásával a kisléptékű tervezési feladatok is egyre érdekesebbé válnak az optimalizálás szempontjából.

A szimulációs iterációk száma a megoldási tér dimenziójától és a választott algoritmustól függően néhány száz és több ezer között mozog.

2.2.4. Szintézis az építészeti optimalizációban

Az építészetben a szakirodalomban eddig néhány tanulmány foglalkozott az egyes célok optimalizálási módszereinek problémáival. Számszerű feladatok megoldására különféle optimalizáló eszközöket használnak. Például egy átfogó áttekintés a geometriában és az épületfelület tervezésében alkalmazott optimalizálási módszerekre összpontosít [117]. Az épületszimulációk keretein belül főként az energiaigény optimalizálására alkalmazott

érzékenység vizsgálatot különféle WWR, épületalak, tájolás [118], U-értékek [119], valamint a foglaltsági menetrendek segítségével vizsgálják [120]. A szellőztetett ablaknak a beltéri levegő minőségére és az energiafogyasztásra gyakorolt hatását is vizsgálják [121]. Megállapítható azonban, hogy ezek a módszerek algoritmikus generálást és optimalizálást csak az építészeti problémamegoldás egyes konkrét lépéseire alkalmaznak, míg az EDS módszer arra összpontosít, hogy a tervezett épület, mint komplex, átfogó rendszer optimális legyen.

A szintézis lépés alkalmazása az építészet területén újdonság. Az ötlet egy adott probléma algoritmikus megoldásának megkezdésére a vegyészmérnöki területen jól ismert, például [122] bemutatta a P-gráf módszertant a vegyipari mérnöki problémák sikeres ábrázolására, amely a matematikai programozási modellek alapjául szolgál. Ezt az algoritmikus módszert sikeresen adaptálták más területeken; a fenntarthatósági kérdések kezelésénél [123], a gyártási problémáknál [124], az energiatárolás és az elosztás problémájánál [125], autóbusz-közlekedés optimalizálására [126] ütemezési problémákra [127].

Jelen dolgozat az EDS módszertan első lépésére, nevezetesen a szintézis lépésre összpontosít, amikor az összes lehetséges megvalósítható épületszerkezet létrejön, miközben az összes többi esetet figyelmen kívül hagyják. Az EDS módszer ezen szakaszát algoritmikusan és matematikai szigorral hajtják végre. Az algoritmikus generálás támogatása érdekében néhány definíciót és egy tételt is bemutatunk technikai részletekkel együtt. Az eredmény további lépésekre való alkalmazhatósága elkerülhetetlenül fontolóra veszi az optimalizálást, amelyet a teljes EDS-módszer során figyelembe kell venni.

2.2.5. Többváltozós lineáris regresszió alkalmazhatósága az épületfizikai optimalizálásban

Számos tanulmány található, amely regressziós modellek segítségével elemzi az épületek tulajdonságait.

Nagy számú tanulmány arra összpontosít, hogy a természetes megvilágítás hogyan befolyásolja a fűtési és hűtési energiafelhasználást [128] vagy a mesterséges megvilágítási energiaigényre, vagy az épülettervezési paraméterek nappali megvilágításra gyakorolt hatására összpontosít [129].

Az épületek felújítási idejének becslése szintén nagy jelentőséggel bír, tekintettel a romló állapotú épületek számának növekedésére [130].

Három épület energiafogyasztásának előrejelzése [131] egy egyedi, több kimenetű (MO) szekvenciális tanulási modellt javasol, amely a fűtési és hűtési terhelést is előre jelzi,

N. Aghdaei és társai [132] egy többszörös lineáris regressziós modellt dolgoztak ki varianciaelemzési módszerrel (ANOVA) az éves fűtési és hűtési energiaigény becslésére három éghajlati régióban.

Egy másik tanulmány összesen 12 kulcsfontosságú épülettervezési változót azonosított paraméteres elemzéssel [133], és ezeket tekintették bemeneti adatoknak a regressziós modellekben. A regressziós modellek értékeléséhez három egyszerű multiplikatív kongruenciális generátoron alapuló pszeudo-véletlenszám-generátort alkalmaztak véletlenszerű minták létrehozására. Az összehasonlító elemzés azt mutatta, hogy a hibahatár

ezeknél az épületeknél 10%. Ezen eredmények alapján becslést lehet készíteni az energiamegtakarításra vonatkozóan.

Egy kutatás a zéró energiafelhasználású épületek beltéri komfortminőségére összpontosított, amelynek célja az IEQ várható változásának előrejelzése a különböző szabványok szerint [134].

Városias területeket [89] vizsgáló tanulmány, egy helyettesítő modell alapú integrált optimalizálási rendszer kifejlesztését tűzte ki céljául, hogy energetikai és termikus szempontokból optimális terveket kapjon lakóépületek számára Törökország legurbanizáltabb városaiban különböző szintű költségvetési korlátozások mellett.

Egy további tanulmány célja olyan eszközök létrehozása volt [104], amelyek a fűtési energiafelhasználás és a beltéri hőmérséklet közötti kapcsolat értékelésére szolgálnak a lakóépületek lakóinak különböző szintű viselkedése esetén.

Egy nemrégiben készült tanulmány szerint három lépésre van szükség ahhoz, hogy az építészek robusztus és pontos tervezési referenciákat kapjanak a tervezési feladatok elvégzése során [83]. Az első lépés az adatbázis létrehozása az épületobjektumok véletlenszerű generálásával és az épületszimulációk elvégzésével. A következő lépés a mesterséges neurális hálózati (ANN) modellek képzése az igényes épületszimuláció helyettesítőjeként, hogy az épület teljesítményét pontosan és a szimulációnál gyorsabban lehessen megjósolni. Az utolsó lépés egy többcélú optimalizálás alkalmazása a tényleges tervezési korlátok figyelembevételével.

Egy másik nemrégiben készült tanulmány áttekintést végez az épületek energetikai rendszereinek modellezésére kifejlesztett és elfogadott valamennyi jelentős modellezési módszerről [135].

2.3. A szakirodalmi feldolgozás áttekintő értékelése

Az elmúlt években jelentős előrelépés történt a modellezés automatizálása, a társ-szimuláció, az értékelés és az optimalizációs algoritmusok számítási motorokkal való összekapcsolása (interoperabilitás) terén. A hibrid algoritmusok, a meta-modellek, a párhuzamos és felhőalapú számítástechnika, az adaptív fitnessz, az épületmodell egyszerűsítése vagy az értékelési eszközök felhasználása hatékonyan csökkenti a számítási időt és gyorsítja a konvergenciát [24]. A szakirodalomból azonban kiderül, hogy az épülettervezési optimalizációs folyamatban a térszervezés és ennek hatására az formai tömegképzés még mindig gyerekcipőben jár. Egyrészt korlátozott számú tanulmány dolgozza ki az épületgeometria generálásának megközelítéseit, "zöld teljesítmény" célok nélkül. Másrészt a legfejlettebb épületgeometriai tervezési változó alapú kutatások, amelyek megkönnyítik az automatizált energia-, komfort központú értékelést, nem integrálnak semmilyen optimalizálást.

Az épületgeometriai tervezési változó alapú optimalizálást is tartalmazó korábbi épülettervezési optimalizációs munkák közül a tanulmányok kb. kétharmada egyszerű formákat alkalmaz korlátozott számú alakváltozóval, míg a szakirodalomnak csak a fennmaradó része foglalkozik többé-kevésbé kifinomult módszerekkel az épületgeometriák módosítására vagy létrehozására az optimalizálási folyamat során. Az elmúlt több mint két évtized tudományos munkásságának elemzése után a következő uralkodó tendenciákat és kihívásokat figyeltük meg:

→ Mivel a épülettervezési optimalizációs modellekben még mindig nem integrálják és elemzik átfogóan a teljes energetikai, komfort és környezetvédelmi kritériumokat, van egy olyan

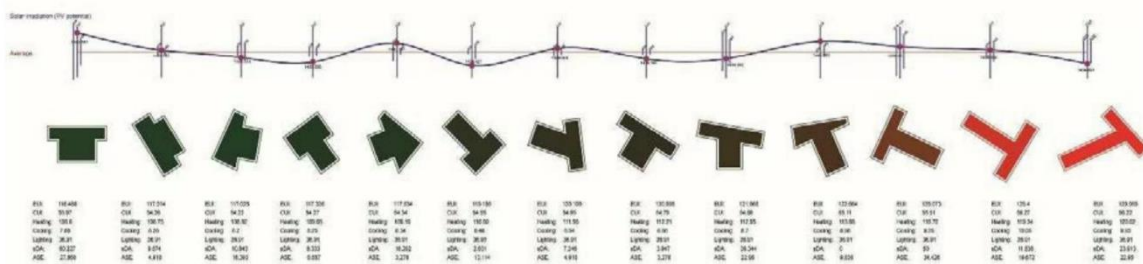
tendencia, hogy mindezen területek elvárásainak való megfelelést különféle mérnöki és matematikai módszerekkel érik el [34]. Mivel a számítási modellek és azok többcélra való felhasználása bonyolult, az épületgeometriai tervezési változók következképpen túlságosan leegyszerúsített szinten maradnak. A tipikusan választott formák egyszerűsített téglalap- és kocka alakú geometriák, korlátozott számú épületgeometriai tervezési változók, mint oldalarány, falméret, tér- vagy szárnymélység, magasság és tetőméretek.

→ Az alakoptimalizálás, beleértve az épülettervezési optimalizációs tanulmányokat is, kb. 65,6%-a módosít egy vagy több (azaz korlátozott számú) alapépület-geometriát, így kezelve az "épületformálás" technikáját. Az új alakváltozatokat a referenciamodell(ek) már meglévő geometriai tulajdonságai, például a méretek és arányok (7. ábra), valamint további passzív (pl. épületburkolat tervezési változók) és aktív (pl. HVAC) rendszerparaméterek módosításával hozzák létre.

→ Az alakoptimalizálás kb. 25%-a, beleértve a épülettervezési optimalizációs tanulmányokat is, az épületgeometriát fejlettebb módon módosítja.

→ Az átvizsgált munkák kb. 9,4%-a először új geometriák sorozatának létrehozására tesz erőfeszítéseket, majd a teljesítmények kiszámítása után az alakzatok újragenerálása és/vagy az alakzat (és egyéb passzív és aktív rendszer) tulajdonságainak módosítása lehetséges az optimális megoldás eléréséhez.

→ A épülettervezési optimalizációs kutatásban jelenleg leggyakrabban alkalmazott és legfontosabb alakváltozók a tér/épület mélysége, magassága, arányai, tető adatai. Mindezek a változók az alakzat méretbeli tulajdonságait írják le, de nem tartalmaznak információt a geometria konkrét formájáról, azaz a felületek, sarkok, élek vagy a téregységek egymáshoz, illetve a koordináta-rendszerhez viszonyított helyzetéről.



15. ábra: A T-alakú épületgeometriák energiaszimuláció eredményei alacsony EUI-val a bal oldalon [59].

→ Az erőfeszítések többnyire az algoritmusok és módszerek teljesítményére koncentrálnak, miközben hiányolják az egyik leghatékonyabb, építészeti tervezési tényező, a térszervezésen alapuló épületgeometria alakításának kihasználását az energiafogyasztás csökkentése érdekében [59], [101], (15. ábra).

→ A épülettervezési optimalizáció alkalmazása valós tervezési feladatokban még korai stádiumban van [20].

→ A legtöbb kutatás főként néhány bizonyos épületburkolat tervezési változóra és HVAC rendszerparaméterre összpontosít, ahelyett, hogy az épület teljes tervezési folyamatával,

konkrétan az geometriai optimalizálással foglalkozna. Ezért az épületgeometriai tervezési változók szerepe a épülettervezési optimalizációkban gyakran háttérbe szorul.

→ Az épületgeometriai tervezési változóknak az energetikai teljesítményre gyakorolt hatását külön kiemelik, amely jelentős - akár kb. 60%-os - energiamegtakarítást biztosít (a WWR-rel és az ORI-vel kombinálva) és további, akár kb. 80%-os LCA-megtakarítást (a burkolat és az aktív rendszer optimalizálásával együtt). A legtöbb esetben azonban az alakváltozókat épületburkolat tervezési változókkal és HVAC-rendszer változókkal kombinálják, ezért az épületgeometriai tervezési változó alapú optimalizálás közvetlen javítási potenciálja gyakran nehezen meghatározható.

→ Jellemző, hogy a kutatási eredmények még mindig bonyolultak és nem egyértelműek a tervezőcsapatok számára, amelyeket általában építészek és várostervezők vezetnek. E tanulmányok többsége analitikus előrejelzési rendszereket dolgozott ki az épületek teljesítményének előrejelzésére és értékelésére, amelyek nem valós korlátozásokon alapulnak, és a tervezők számára a gyakorlatban nem alkalmazhatóak. Az optimalizáló algoritmusok eredményei matematikailag megalapozottak (pl. Pareto-határ módszerek, összefüggés-arányok stb.), azonban nem könnyű őket a tényleges épülettervezési feladatok esetén értelmezni.

→ A megfelelő célfüggvény és tervezési változó kiválasztása kulcsszerepet játszik az optimalizálási projekteknél [25]. Függetlenül az optimalizálási technikák fejlődésétől, a teljes optimalizálási folyamat kimenete és sikere erősen függ a tervező/fejlesztő/kutató által meghatározott bemeneti paraméterektől, tervezési változóktól, korlátozásoktól, célfüggvénytől stb., valamint a tervezési szakértők tudásától az optimalizálási paraméterek finomhangolásában [24]. Az opciók, korlátok és tervezési változók kiválasztása azonban a szakirodalomban - gyakran érzékenységi és bizonytalansági elemzések segítségével - a valós határokhoz képest nagyobb változatosságot mutat. Nem elhanyagolva a lehetséges új, innovatív tervezést támogató kölcsönhatások feltárásának valószínűségét, úgy tűnik, hogy a megoldások nagy része nem felel meg teljesen az ipari tervezési gyakorlat igényeinek. Számos lehetőség az építési előírások, a helyspecifikus korlátok és az ügyfél igényei miatt szűkülhet. A rendelkezésre álló tanulmányok többnyire csak szakirodalmi forrásokon alapulnak, és ezért nem képesek teljesen megfelelő szabályokat javasolni a tervezési változók és a célfüggvény kiválasztására.

→ Fontos megjegyezni, hogy egy valós építészeti tervezési probléma matematikai tartományba való lefordítása számos korlátozást tartalmaz, és az általánosan használt optimalizációs algoritmusok alkalmazása épülettervezési problémákra csak fejlett kombinatorikus megoldásokat adhat, de nem képes garantálni az optimális megoldást. A épülettervezési optimalizációban leggyakrabban alkalmazott evolúciós technika sztochasztikus viselkedése, a konfigurációk sokasága és az épületekkel kapcsolatos számos tervezési probléma miatt meglehetősen nehéz biztonsággal következtetni ezen algoritmusok teljesítményére [24], [25].

→ Az építészeti tervezés olyan paramétereket tartalmaz, amelyek nem könnyen számszerűsíthetők, ezért rosszul definiált problémáról van szó. [24] A tömeg és a forma algoritmikus optimalizálásához az összes szükséges változót matematikailag le kell írni, ami meglehetősen nagy kihívásnak tűnik: egy négyzetes kocka alakú testhez több mint 10 változóra van szükség, egy bonyolultabb forma pedig jelentősen növeli a változók számát [21]. Ez tükröződik a korábbi szakirodalmi elemzésben (2.1.1-2.1.5. fejezet): az épület formáját többé-kevésbé elhanyagolják, azaz csak kezdetlegesen veszik figyelembe.

→ Nem létezik szabvány az optimalizálási eredmények megbízhatóságának vagy robusztusságának bizonyítására. Például „brute force” (nyers erő) módszerrel végzett kimerítő keresést alkalmaznak az optimális megoldások érvényességének ellenőrzésére (Genopt[111]), vagy részletes EnergyPlus modelleket hasonlítanak össze helyettesítő modellekkel [112].

Összefoglalva, a rendelkezésre álló szakirodalomból még mindig hiányzik egy olyan teljes értékű optimalizálási keretrendszer, amely képes figyelembe venni az összes befolyásoló paramétert, célkitűzést és korlátozást a formakeresési eljárás során. Ezen optimalizálási rendszerek eredményei többnyire korlátozott, nem geometriai változókat, összetett, többretegű, túlságosan leegyszerűsített vagy nem konstruálható formákat tartalmaznak, vagy csak néhány esetre és/vagy kis épületre korlátozódtak, amelyek nem tudják lefedni a tervezők számára az formakeresési folyamatot. [48] Mivel az épülettervezési optimalizációs szakirodalomban az épületgeometriai tervezési változók sokféleségét és komplexitását illetően igen korlátozott eredmények születtek, e paraméterek robusztus számszerűsítése további vizsgálatokat igényel.

Emellett az áttekintő elemzés alapján megjósolható, hogy a néhány első tanulmányban szereplő épületgeometria-alkotási erőfeszítések ígéretes potenciált jelentenek a jövőbeli kutatások számára. Szigorú és megfelelő szabályok kidolgozása, lehetővé teheti a csak a szükséges esetek jobb, átfogó modellezését, és így a teljes keresési tér "letapogatható", azaz garantálható az optimális megoldás. Ez a választott optimalizálási módszer szempontjából is fontos, hiszen pl. a felsorolásos, kimerítő nyers erő technika a keresési tér minden lehetséges pontját kezeli - ez potenciális ellentéte a többnyire elterjedt GA technológiáknak, amelyek véletlenszerűen mozognak a keresési térben és csak az optimum közelében találnak megoldásokat. Ráadásul sok tapasztalt építész és mérnök és tervező szakember van az épülettervezés területén, akik - optimalizálási eszközök nélkül is képesek ésszerű megoldásokat szállítani a különböző tervezési követelményeknek megfelelően. Az ilyen szakértői tudás nagy lehetőségeket rejt magában a jövőbeli épületoptimalizálásban, például a keresési tér szűkítésében (tervezési szabály meghatározása) vagy a megfelelő peremfeltételek, célok, korlátok, változók stb. kiválasztásában.

További kutatásokra van szükség az épületgeometriai tervezési változók energetikailag és komfort optimalizált épületekre gyakorolt hatásának megfelelő számszerűsítése terén. A jövőbeni térszervezésre vonatkozó erőfeszítések új irányzatot találhatnak a teljes épületgeometriai rendszerek átfogó és szisztematikus generálásában. Ennek egyik fő jellemzője az formát leíró épületgeometriai tervezési változók kifejlesztése, amelyek nemcsak az épületgeometria fizikai tulajdonságait (főként méreteit, arányait) határozzák meg, hanem a geometria formájáról is információt szolgáltatnak a téregységek elhelyezkedési paraméterei vagy a geometria különböző részeinek (sarkok, élek stb.) koordinátái formájában. Ez kapcsolatot teremtene az épület alakja és a geometriákat leíró tervezési változók között, hogy az épület teljes geometriáját reprodukálni lehessen. Az épületgeometria átfogó integrálása az épülettervezési optimalizációs kutatásba kulcsfontosságú szerepet játszik a tervezés kreatív, intuitív részének tudományos értelmezésében.

A tanulmányok arra a következtetésre jutottak, hogy vannak még leküzdendő kihívások. A többcélú és multidiszciplináris tervezési optimalizálás nem eléggé kiaknázott egy átfogó, teljes épülettervezésben [71]. A legtöbb optimalizálási vizsgálat csak az energiahatékonyságra (vagy pl. a térszervezésre) összpontosít, anélkül, hogy figyelembe venné a még mindig nem jól vizsgált, elkerülhetetlenül szükséges komfort-energia arányt. Más kutatások csak néhány tervezési tényezőt kombinálnak egyetlen esettanulmányon keresztül a komfort és az energetikai

értékeléshez [34]. Szinte minden passzív és aktív épületelemet és rendszert külön-külön alkalmaznak, azonban ezeket a tervezési paraméterek hatásait ritkán veszik figyelembe együttesen, egy rendszeren belül. [36].

A szimulációk esetében a más szoftverekkel való átjárhatóság érdekében javasolt a változtatható értékelési pontosság.

Az optimalizálás nem zárhatja ki az épülettervezés nehezen számszerűsíthető, alapvető kreatív és szubjektív tulajdonságait, inkább a legmodernebb, kifinomult számításokat nyújtja a számszerűsíthető épülettervezési lehetőségekről, amelyek nagy segítséget nyújtanak ahhoz, hogy a meglévő, már rendelkezésre álló technológiák és anyagok közül robusztus megoldások szülessenek [136].

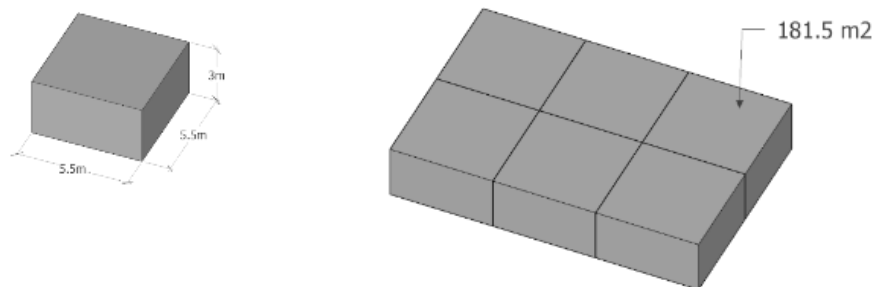
3. Energiatervezési szintézis: az épületkonfigurációk algoritmikus előállítás

3.1. Bevezetés

A passzív tervezési stratégia - beleértve az épület formáját vagy geometriáját és szerkezetét - az egyik legmeghatározóbb tényező az energiával kapcsolatos épületfejlesztés tekintetében. Az legtöbb építészeti probléma moduláris megoldást igényel az összes potenciálisan megvalósítható épületkonfiguráció létrehozásához. Ennek a követelménynek az eléréséhez egy építészeti szabályrendszer szükségességét határoztam meg. Ez a fejezet a szabályok és a geometriák generálásának kapcsolatára összpontosít, hogy a garantált számú geometriai konfigurációt elérjük. Ez az eredmény lehetővé teszi a javasolt módszer integrálását egy átfogó rendszerbe, mint szintézislépés.

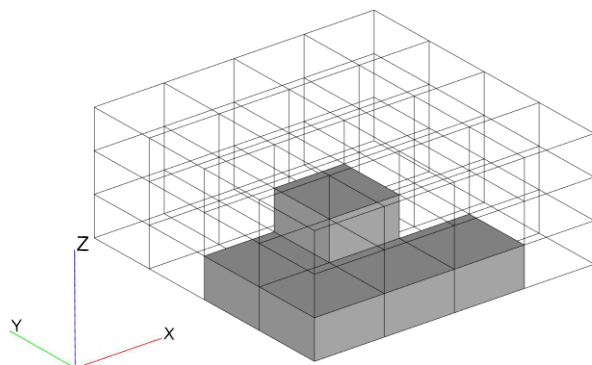
3.2. Alapvető megjegyzések

Az aktuális probléma építészeti szempontból az összes olyan családi ház kialakításának megtervezése, amelyet figyelembe kell venni egy családi ház tervezésénél. Ebben a különleges tervezési esetben vegyük figyelembe az 5,5 m x 5,5 m x 3 m méretű egységeket vagy építőelemeket általános építőelemként; és hozzunk létre összesen 6 ezekkel a méretekkel rendelkező tömböt, amelyek a családi ház teljes kubatúrájaként szolgálnak. Más szavakkal, 6 tömböt kell elhelyezni egymás mellett az ezt követően meghatározott építészeti szabályok szerint. Minden olyan 181,5 m² alapterületű családi ház geometriát keresünk, amely megfelel az előre meghatározott építészeti szabályoknak (16. ábra.



16. ábra: Alapvető téregység (balra) és 6 egység (blokkok) kombinációja egy teljes családi ház összeállításához

A különböző épületgeometriák egyszerű leírása és megkülönböztetése érdekében vegyünk egy merőleges koordinátarendszert X, Y, Z tengelyekkel. Vizsgáljunk meg egy megfelelő méretű mezőt is a koordinátarendszer pozitív ortánsán belül, azaz szélesség \times mélység \times magasság szerint. Ebben a sajátos családi ház-generációs esetben, ahol 6 építőelemet vizsgálunk, a jelenlegi probléma szempontjából határozzuk meg a doboz méretét a $6 \times 6 \times 6$ -nak. A későbbiekben ennek a mezőnek a mérete $5 \times 5 \times 3$ -ra csökken, a később említett építészeti tervezési szabályok alapján. Más szavakkal, ennek a mezőnek az egyik csúcsa a koordinátarendszer eredete, a másik csúcsa $(5,5,3)$. Most osszuk szét ezt a mezőt 75 cellára úgy, hogy a rácsponatok közötti térrész cellákat alkosson a generációs folyamat során. Bármely cellát egy triplettel (x, y, z) kell azonosítani, amely triplet most nem a tér egy pontjának koordinátáit képviseli, hanem magukat a cellákat azonosítja. Ebben a konkrét esetben 75 megkülönböztetett hármas létezik, vagyis az algoritmikus generálás során használandó hármasok vagy cellák halmaza a következő: $\{(1,1,1), (2,1,1), \dots, (5,5,3)\}$. Most helyezzük a blokkokat ezekbe a cellákba. Érdeemes megemlíteni, hogy mivel a blokkok egy koordináta-rendszer celláiban helyezkednek el, elmondható, hogy a blokkoknak van talajjal határos felülete, tetővel ellátott része és falai is vannak, azaz a blokkoknak vannak határoló felületei, amelyek támogatják a megértés egyszerűségét és így közvetlen az építészeti szabályok használhatósága nyilvánvalóvá válik. Ha egynél több blokkot helyezünk el a doboz rendelkezésre álló celláin belül, akkor egy köteg képződik. Az egyedi építészeti családi házépítési geometriák problémájához vegyünk figyelembe egy 6 blokkból álló köteget, mivel összesen 6 blokk szolgál a családi ház teljes kubatúrájaként. Például a következő leírás: $\{(1,1,1), (1,2,1), (2,1,1), (2,2,1), (2,2,2), (3,1,1)\}$ megfelel az 17. ábrán ábrázolt épületgeometriának. Mivel a leírás lexikográfiai sorrendben adható meg, a különféle szerkezetek könnyen azonosíthatóak.



17. ábra: Az $\{(1,1,1), (1,2,1), (2,1,1), (2,2,1), (2,2,2), (3,1,1)\}$.

3.3 Építészeti tervezési szabályok

A gyakorlatban egyetlen önkényesen meghatározott köteg sem tekinthető önmagában családi háznak. Bármely kötegnek meg kell felelnie bizonyos jellemzőknek ahhoz, hogy megfelelően ábrázolja a családi házat. Nyilvánvalóan vannak olyan tervezési elvek, amelyeket az építész tervezők követnek a családi ház tervezése és megtervezése során. Ezek az építészeti tervezési szabályok azonban sokfélék és gyakran túl összetettek ahhoz, hogy megfeleljenek a jelenlegi családi ház geometriai tervezés absztrakciós szintjének. Ezért rendkívül fontos ezeket a szabályokat a jelenlegi forгатókönyv követelményeihez igazítani. A következő szabályrendszert határoztam meg azoknak a szükséges és elegendő építészeti tulajdonságoknak a kifejezésére, amelyeknek egy családi ház struktúrájának (kötegnek) meg kell felelnie [137].

- 1) Minden blokkot a cellákba kell helyezni.
- 2) A köteg blokkjait legalább 1 felülettel kell összekötni, vagyis a kötegnek kompaktnak kell lennie.
- 3) Földszinten minimum 2 és maximum 4 blokk helyezhető el egy egyenes vonalban.
- 4) A tételen belül csak 1 blokk lehet, amely sem nem áll a földön, sem pedig a talajjal határos felülete nem csatlakozik más blokkokhoz; konzolos erkély esete.
- 5) A köteg legfeljebb 3 blokk magas lehet.
- 6) A földszint feletti szinteken nem lehet 2 blokk egymáson, szabad falakkal, vagyis a blokkok falainak legalább egyikét össze kell kötni egy másik blokkal (nem engedélyezett „torony”).
- 7) A 2 blokknál magasabb kötegek felülnézeti kiterjedése legfeljebb 3 blokk méretű lehet az X és Y irányban.

A további építészeti megfontolások szerint csak azokat a tételeket tekintik potenciálisan megvalósítható családi házépítési konfigurációknak, amelyek megfelelnek a fenti szabályoknak, miközben más struktúrákat (kötegeket) nem szabad figyelembe venni. Más szavakkal, a keresési teret a fent említett szabályrendszer korlátozza, hogy az összes lehetséges megoldást figyelembe véve teljes mértékben szabályozzák az optimalizálási folyamatot, és ezáltal biztosítsák az optimális koncepció figyelembe vételét is. Most először generáljuk az összes köteget a keresési térben. Amikor egy tétel teljesen elkészült, ellenőrizni kell, hogy a köteg megfelel-e a fent említett építészeti szabályoknak. Ha valamelyik szabályt megsértik, nem vehet részt a további lépések szereplőjeként. Azokat az épületgeometriákat, amelyek nincsenek kizárva, vagyis megfelelnek a szabályoknak, a továbbiakban épületkonfigurációknak nevezzük.

3.4. Generáló módszer

Az adott építészeti probléma meghatározza az összes potenciálisan megvalósítható épületkonfiguráció, azaz 6 blokkból álló kötegek előállítását, amelyek megfelelnek az építészeti szabályoknak. Az 5. szabály a fent említett eredeti 6x6x6 méretű doboz méretét legfeljebb 3 cellára korlátozza, figyelembe véve a z tengelyt; míg a 3. és 4. szabály az x és y tengely figyelembevételével a doboz méretét 5 cellára korlátozza; így a doboz teljes mérete 5x5x3, beleértve 75 cellát. Ez a mező lesz a keresési hely, ahol 6 blokkból álló kötegeket kerestem, amelyek megfelelnek a fenti szabályoknak. Érdeemes megemlíteni, hogy ezen a mezőn belül $(75|6) = 201359550$ különböző módon lehet elhelyezni a 6 blokkot.

A generációs módszer első szakaszaként, a mezőben található 6 blokk összes lehetséges elhelyezési kombinációja létrejön. Az egyes cellákhoz sorszámot (SN) rendeltem a következő képlettel:

$$SN = 1 + (x-1) + (y-1) \cdot 5 + (z-1) \cdot 25 \quad \text{Eq (1)}$$

Például: a koordináta-rendszer pozitív ortánsán belüli négyzet első celláját a tripllett (1, 1, 1), a 25. cellát a tripllett (5, 5, 1), az utolsót, azaz a 75. sejtet a tripllett azonosítja (5, 5, 3). A sorszámok alkalmazása megkönnyíti a generálási folyamatot, mivel a doboz cellái most már egyszerűen azonosíthatóak és rendezhetőek, és elmondható, hogy a celláknak vannak előd és utód cellái. A klasszikus "backtracking" (visszakövetési) algoritmus minden számítási problémára megtalál minden megoldást, amely fokozatosan épít részleges jelölteket a megoldásokra, lásd például Russell és [138]. A jelöltek egy fa struktúrában vannak ábrázolva, ahol a szülő egyetlen hosszabbítási lépéssel különbözik a gyermektől. Ez a fajta backtracking a jelen esetben a generálási eljárás irányadó szabályaként szolgál a következő módon, lásd a 17. ábrát. Kezdeti állapotként, az első blokk az első cellában, a második blokk a második cellában legyen, és így tovább, és a hatodik blokk a hatodik cellában van. Más szavakkal, a hat blokkot a következőképpen adjuk meg: {(1, 1, 1), (2, 1, 1), (3, 1, 1), (4, 1, 1), (5, 1, 1), (1, 2, 1)}. Az eljárás végső állapota a következő: {(5, 4, 3), (1, 5, 3), (2, 5, 3), (3, 5, 3), (4, 5, 3), (5, 5, 3)}. A kezdő és a végső állapot között a következő lépéseket hajtjuk végre. A legmagasabb sorszámú cellában lévő blokk eggyel továbblép a következő cellába. Ha ez nem lehetséges, akkor az előd legmagasabb sorszámú blokkja eggyel előrébb mozog, és az összes utód követi mozgását. Ha az első blokk egy olyan cellában van, ahonnan már nem lehet tovább lépni, akkor az algoritmus leáll.

```

procedureSteps()
begin
  Size = BoxHeight*BoxSize*BoxSize
  for (i1=1; i1<=Size-5; i1++) {
    for (i2 = i1+1; i2 <=Size-4; i2++) {
      for (i3=i2+1; i3 <=Size-3; i3++) {
        for (i4=i3+1; i4 <=Size-2; i4++) {
          for (i5=i4+1; i5 <=Size-1; i5++) {
            for (i6=i5+1; i6 <=Size; i6++) {
              architecturalcompliancecheck
            }
          }
        }
      }
    }
  }
end

```

18. ábra: Generációs eljárás.

Technikailag minden blokkot indexeltem. A ciklusokon belül a blokkokat a koordinátarendszer 1 és 75 közötti celláiba kell helyezni, amint azt korábban említettem, vagyis a blokkok x, y és z koordinátáit ellenőrizni kell. Ha mind a 6 blokkot elhelyeztem, akkor a köteg képződik. Javasolt követni a generált kötegek számát, mivel az összes köteg száma előre kiszámítható. Más szavakkal, a 18. ábrán bemutatott eljárás egyszerű helykitöltést jelent.

Egy blokk megfelelő cellába helyezéséhez vagy egy adott blokk elhelyezkedésének ellenőrzéséhez meg kell ismerni a megfelelő koordinátákat. A koordinátákat a mezőben lévő cellák számából lehet kiszámítani. Vizsgáljuk meg a térkitöltési helyzetet. Technikailag először a z koordinátát állapítjuk meg, majd y és végül x koordinátát. Más szavakkal, a blokk koordinátáit egyetlen emeleten vagy szinten szabályoztam, $5 \times 5 = 25$ térben. A z koordináta csak abban az esetben növekszik, ha a cella száma 25-tel osztható. Tehát, ha a cellák indexe 0-tól kezdődik, akkor a 0 és 24 közötti cellák a földszinten vannak, a 25 és 49 közötti cellák az első emeleten, az 50 és 74 közötti cellák a legfelső emeleten vannak. Ily módon a szint számára a blokk helyzetét azonosító cella indexéből is következtetni lehet. Ha a z koordináta be van állítva, akkor az y és x koordináták is be vannak állítva, vagyis a blokk helyzete meghatározható a szinten belül. Itt először az y koordinátát növeljük csak azután, hogy az adott szint összes x pozícióját felvettük. Végül az x koordinátának le kell fednie az összes elérhető pozíciót. Ez a 19. ábrán látható, ahol n a cella száma, és x, y és z a blokk koordinátái. (Ez az első egyenlet technikai leírása; Eq (1) -nek.)

$z = (n / (5*5)) + 1;$ $y = (n - (z-1)*(5*5)) / 5 + 1;$ $x = n - ((z-1)*(5*5) + (y-1)*5) + 1;$

19. ábra: Az adott cella koordinátái.

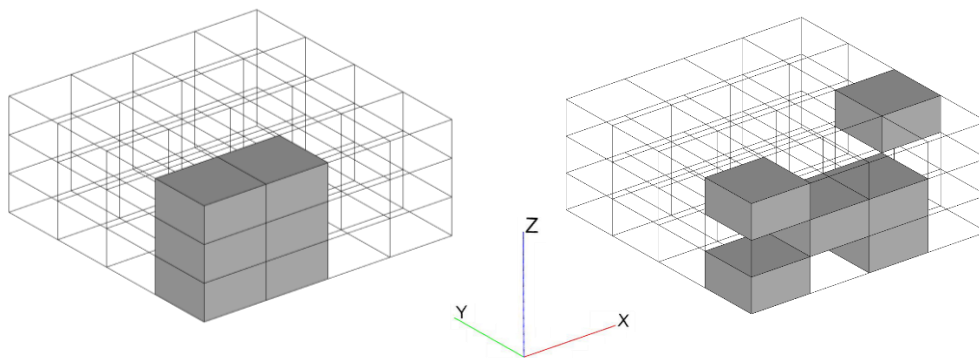
3.5. A követelményeknek való megfelelés

Fontos megjegyezni, hogy a fenti eljárás a 6 blokkból álló összes köteget generálja a keresési térben. Fontos, hogy az eljárás a teljes keresési teret figyelembe vegye, ezért hatékony módon csak az ebben a térben generált kötegeket veszi figyelembe, és így a további 6 blokkból álló kötegeket nem szabad tovább vizsgálni. A generálás során, amikor új köteg áll rendelkezésre, ellenőrizni kell, hogy teljesülnek-e az építészeti szabályok, vagy megsérti-e a köteg valamelyik szabályt. Ha egyik szabályt sem sérül, akkor egy lehetséges konfiguráció található. Másrészt, ha ezen kötegek egyike megfelel az építészeti szabályoknak, akkor azt a további vizsgálatok során megvalósítható konfigurációnak kell tekinteni. Az összes szabály ellenőrzéséhez a következőket kell végrehajtani.

Az 1. szabály megfelel annak az alapvető követelménynek, hogy a blokkokat megfelelően kell elhelyezni a fent említett koordináta-rendszer celláiban, a blokkoknak ki kell tölteniük a cellák terét, a blokkokat semmilyen más módon nem szabad elhelyezni, például csúsztatott módon. Mivel a jelenlegi építészeti tervezési feladat általános építőelemeknek tekinti az 5,5m x 5,5m x 3m méretű építőelemeket, a koordináta-rendszer egységei a következők: az x tengely egysége 5,5m, az y tengely egységnyi értéke 5,5 m, a z tengely egysége pedig 3 m. A fenti részletes generáló módszert úgy alakítottam ki, hogy megfeleljen ennek a szabálynak a specifikációinak, ezért az összes előállított köteg már megfelel ennek a szabálynak. A 2. szabály megfelel annak az alapvető építészeti követelménynek, miszerint a kötegeknek, - mint a ház általános építőelemeinek - össze kell kapcsolódniuk, vagyis a konfigurációknak kompakt kötegekben kell lenniük, lásd a 20. ábrát. Ugyanakkor azt is meg kell jegyezni, hogy az összekapcsolhatóság fogalma további tisztázást igényel, mivel a blokkok térbeli kapcsolata sokféleképpen értelmezhető. Például a blokkokat összekapcsolhatjuk csúcsaikkal vagy az élükkel is, de ezeket a kapcsolatokat szintén kizárjuk a jelenlegi vizsgálatok során. A továbbiakban egy köteget akkor tekintünk összekapcsoltnak, ha az alapul szolgáló incidencia (illeszkedési, kapcsolati) grafikon összekapcsolódik. Az incidencia grafikon a következő módon készíthető. Az egyes blokkokhoz a grafikon csúcsa van hozzárendelve, nevezetesen a csomópont a blokk súlypontjához van rendelve. Két csúcs akkor és csak akkor kapcsolódik a gráf éléhez, ha a megfelelő blokkjaik felülete egymással össze van kötve, vagyis a két vizsgált

blokk a földdel határos felületükön és a felső vízszintes felületükön keresztül kapcsolódik, vagy az egyik faluk közös.

Technikailag egy köteg kialakításakor meg kell vizsgálni, hogy a köteg blokkjai egymás mellett, alatt vagy felett helyezkednek-e el. Ha egy blokkot vagy blokkkészletet el kell választani a többitől, akkor ez a szabály sérül. Ennek egyszerű ellenőrzéséhez létre kell hozni egy listát, és háromdimenziós bejárást kell végrehajtani. Vegyünk egy kezdő blokkot, és állítsuk a megfelelő blokk címkéjét 1-re. Most állítsuk a lista többi blokkjának címkéit 1-re, ha a másik blokkot a kezdő blokkból lehet elérni. A szomszédosság vizsgálatának segítségével lehet eldönteni azt, hogy a többi blokk elérhető-e vagy sem. Ha a blokk z koordinátája rögzített, az azt jelenti, hogy az ugyanazon a szinten lévő többi blokkot meg kell vizsgálni. Ebben az esetben a blokk x és y koordinátáit össze kell hasonlítani a többi blokk koordinátaival, és a szomszédok címkéjét 1-re kell állítani. Ha a blokk x és y koordinátái rögzülnek, akkor az alatta és fölötté lévő blokkok koordinátáit kell összehasonlítani. Nyilvánvaló, hogy ha a figyelembe vett blokkok között távolság van, akkor a blokkok nem szomszédosak. Másrészt, ha a lista nem üres, akkor van egy összekapcsolt fal, ráadásul a csatlakoztatott falak száma is ismert. Más szavakkal, az i-edik blokk szomszédos blokkjai szintén ismertek ennek a folyamatnak a segítségével. Ha a címkék összege nem egyenlő 6-tal a listában, ez azt jelenti, hogy egy vagy több blokkot nem lehet elérni a kiindulási pontként figyelembe vett blokkból; más szóval a köteg nincs összekapcsolva, nem folytonos.

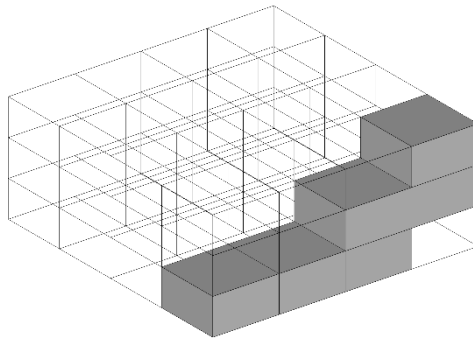


20. ábra: Kompakt köteg (jobbra) és egy nem tömör köteg (balra).

A 3. szabály megfelel az alapvető építészeti követelménynek, miszerint egyes tömböket a földre kell helyezni, vagyis az épület nem lebeghet a levegőben. Technikailag ezt egy olyan folyamat vezérli, amely a köteg minden blokkját az X és Y tengelyre tolja vagy mozgatja, nevezetesen a blokkok x és y koordinátaiból a legkisebb x-1 és y-1 koordinátákat vonják ki. Így a köteg formája és a blokkok egymáshoz való viszonya megmarad, csak a blokkok indexei változnak. Ezenkívül minden blokknál ellenőrizni kell, hogy a földszinten vannak-e vagy sem. Ha a talaj szintjén van, akkor az X tengelyt figyelembe véve a \min_x , \min_y , \max_x , \max_y értékeket ennek megfelelően kell beállítani.

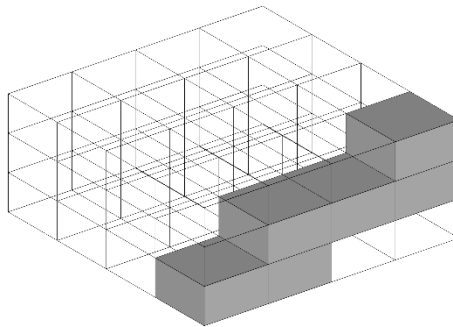
Ha a $\max(x) - \min(x)$ nagyobb, mint 3, akkor a köteg hosszabb, mint 4 blokk. Ugyanezt a folyamatot kell végrehajtani, figyelembe véve az Y tengelyt. Ellenőrizni kell a köteg leghosszabb részét, függetlenül attól, hogy az X tengely mentén helyezkedik-e el vagy sem, nevezetesen azt, hogy az egyenlőtlenség $(\max_y - \min_y) > (\max_x - \min_x)$ érvényes-e. Hasonló folyamatokat kell végrehajtani a többi szint ellenőrzésénél is. Ezen értékek segítségével a 7. szabály is betartható, ahol a 7. szabály megfelel az alapvető építészeti követelménynek, miszerint egy családi ház felülről nézve nem haladhatja meg a 3 egységnyi blokk kiterjedést, ha több mint egy emelet magas, mégpedig földszint + 1. emelet, vagy földszint plusz két emelet

magas geometriáról van szó. Az 21. ábra egy példa a 6 blokkból álló kötegre, amely megsérti a 7. szabályt.



21. ábra: A 7. szabályt megsértő 6 blokkból álló köteg

A 4. szabály megfelel azon alapvető építészeti követelménynek, amely szerint egy konzolos erkély elfogadható egy családi ház részeként, például földszinti nyitott területtel autók számára. Ugyanakkor ez az épületrész nem válhat a ház domináns részévé, nevezetesen mérete csak egy blokk méretére korlátozódik. Lásd például a 22. ábrát. Ennek a feltételnek a teljesülés megvizsgálható az összes olyan blokk ellenőrzésével, amelyek nem a földszinten vannak, azaz amelyek z koordinátájának értéke nem 1. Ha egy ilyen blokk alatt nincsenek további blokkok, akkor az erkély indexe 1-vel növekszik. Minden köteg megsérti a szabályt, ha ez az index nagyobb, mint 1 a folyamat végén. Ezen túlmenően, ha az erkélyblokk fölött van egy blokk, az ilyen tulajdonsággal rendelkező köteget ki kell zárni a további vizsgálatokból. Így a tetővel rendelkező blokkok száma is kiszámítható, nevezetesen a talajon lévő tömbök és az erkélytömbök száma megegyezik a tetővel rendelkező blokkok számával.

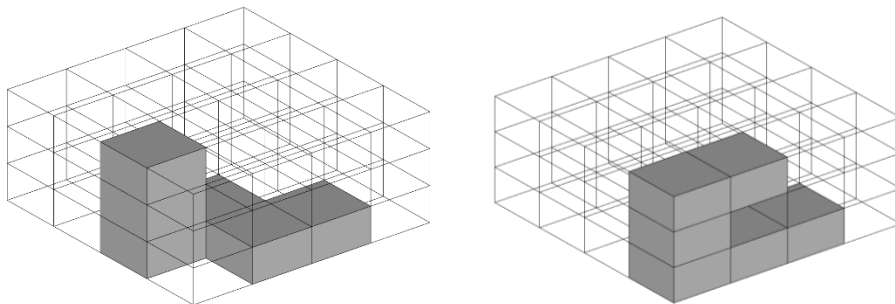


22. ábra. 6 blokkból álló köteg megsérti a 4. szabályt, azaz a konzolos erkély mérete meghaladja a határt.

Az 5. szabály megfelel annak az alapvető építészeti követelménynek, hogy legfeljebb 3 blokk helyezhető el egymás tetejére, ennél magasabb épület nem tekinthető egyedül álló családi háznak. Ezt nyilvánvalóan a keresési tér szabályozza, vagyis a figyelembe vett doboz vagy tér magassága 3 blokk magas.

A 6. szabály megfelel annak az elemi építészeti követelménynek, hogy nem lehet külön 2 szintes (= egymásra rakott) önálló modul vagy blokk, ahol a modul minden oldala szabad, és az ilyen blokkoknak csak az alsó és felső vízszintes oldala kapcsolódik a többi blokkhoz; más szóval tornyok nem megengedettek. A következő folyamat felel meg ennek a szabálynak. Először meg kell számolni a köteg második és harmadik szintjének blokkjait. Abban az esetben,

ha a második és a harmadik szinten csak 1 blokk van, akkor nyilvánvalóan egy toronyról van szó. Ha csak egy blokk van a harmadik szinten és két blokk a második szinten, és a szabad falak száma 20, akkor a szabályt megsértik. Az alapelv a következő: abban az esetben, ha csak egy blokk van a harmadik szinten és két blokk a második szinten, akkor a földszinten 3 blokk van, mivel összesen hat blokk van a tételen belül. Ennek a három tömbnek 8 szabad fala van, vagyis ezek a falak nem összekapcsolt falak. Ha a szakaszon belül van torony, akkor a fennmaradó három tömb szabad falainak száma 12, nevezetesen 4 szabad fal a harmadik szinten és 2x4 szabadfal a második szinten, és ezért ezt a tételt nyilván ki kell zárni a további vizsgálatok közül. Ha nincs torony, akkor ez utóbbi szám csak 10, azaz 4 szabad fal a harmadik szinten, valamint 2x3 szabad fal a második szinten. Nem szükséges ellenőrizni az összes többi köteget, ugyanis mindegyik eleget tesz a szabálynak, ha a többi folyamatot végrehajtják. Például abban az esetben, ha két blokk van a földszinten és három blokk az első szinten, és egy blokk a harmadik szinten, ez az eset elfogadható, akkor, ha a köteg a 4. szabályban megfogalmazott kívánalmaknak eleget tesz, és az erkély megfelelő helyzetben van. A 6. szabályt sértő példát és egy elfogadott konfigurációt mutat be a 23. ábra.

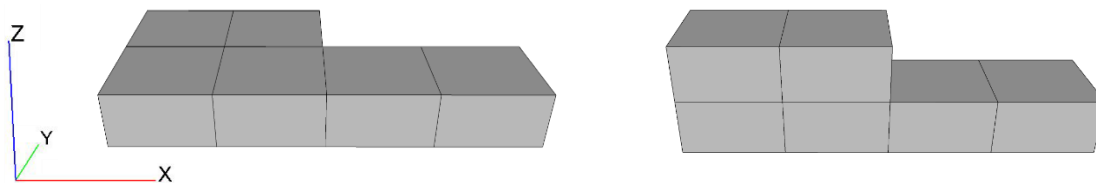


23. ábra: 6 blokkból álló köteg, amely megsérti a 6. szabályt és az elfogadott konfiguráció

A fent említett szabályok sok más, elemi építészeti követelményt is tartalmaznak. Vegyük például figyelembe azt a követelményt, hogy a köteg legalább 2 tömbjének a földszinten kell állnia. Ha egy tétel megfelel a fenti 7-es szabálynak, akkor ez a követelmény is teljesül. A 4. és az 5. szabályból következik, hogy csak egyetlen konzolos erkély lehet, és egy köteg nem lehet magasabb 3 háztömbnél, és hogy minimum 2 tömbnek kell a földszinten állnia.

3.6. A kötegek azonosítása

Könnyű kimutatni, hogy nagyszámú potenciálisan megvalósítható épületkonfiguráció létezik, amelyeket építészeti szempontból azonosnak kell tekinteni. Ezért az alábbiakban az identitás vagy a kongruencia problémáját vizsgáljuk. A leggyakoribb esetben két tétel tekinthető azonosnak, amikor az egyik pozícióváltás, forgatás és tükrözés segítségével válhat a másikká. Ez azonban nem elfogadható e sajátos építészeti probléma esetén, mivel egy emeletes köteget egyszerű kétszintes köteggé átalakítani; csak az X tengely körüli forgatás is elég ehhez, lásd a 24. ábrát.



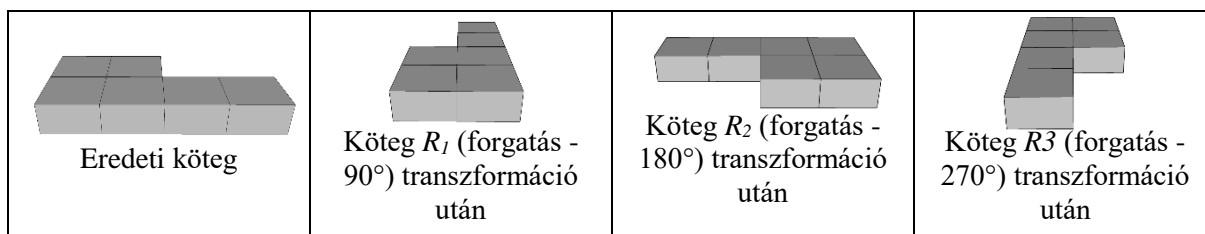
24. ábra: Az X tengely körüli forgatást egyszintes és egy kétszintes köteg esetén alkalmazzuk.

A továbbiakban két köteg vagy családi ház-konfiguráció tekinthető azonosnak vagy egybevágónak, ha egymásba fordulhatnak a Z tengellyel párhuzamos vonal körüli forgatással, vagy egy XZ YZ-síkokkal párhuzamos síkon keresztüli tükrözéssel, vagy eltolódhatnak az X vagy Y tengelyekkel párhuzamosan. Minden köteget megegyezőnek tekintünk, ha az alábbiak bármelyik leírt transzformáció vagy az említett transzformációk sorozatának alkalmazásával egymásnak megfeleltethetők. Például vegyük szemügyre a 25., 26. és 27. ábrákat. A köteg akkor tekinthető kiinduló helyzetben, amikor bármelyik blokkja megérinti az XZ síkot, bármelyik blokkja megérinti az YZ síkot, és az összes blokkja a koordináta-rendszer pozitív ortánsán belül van.

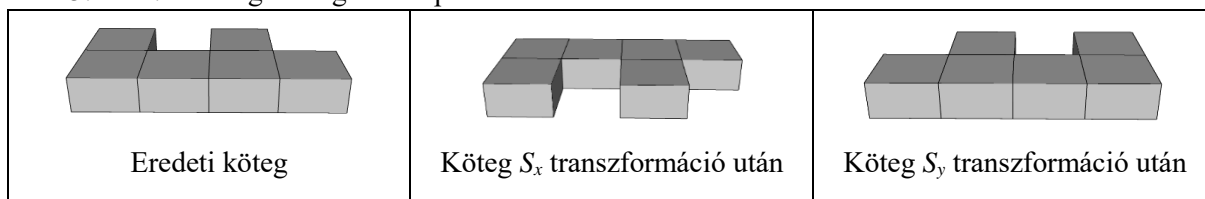
1. Legyen e egy egyenes, amely párhuzamos a Z tengellyel, és metszik a $(2,5, 2,5, 0)$ pontot. Jelöljük R_1 -el azt a transzformációt, amely a köteget e -vonal körül -90° -kal forgatja, R_2 -vel azt a transzformációt, amely a köteget e -vonal körül -180° -kal elforgatja, és hasonlóképpen R_3 -val azt a transzformációt, amely a köteget az e egyenes körül forgatja -270° -kal. Ez az átalakítás nagyon hasonlít az épület fő tájolásához, nevezetesen amikor az épület fő homlokzatát különböző irányokba fordítják. Érdeemes megemlíteni, hogy a tájolás, valamint a falablakok aránya és más főbb építészeti szempontok az EDS módszertan következő lépéseinek részét képezik.

2. Legyen egy S sík párhuzamos az XZ síkkal, amely metszik a $(2,5, 0, 0)$ pontot. Jelöljük S_x -szel az S sík transzformációs tükröződését. Hasonlóképpen jelöljük S_y -vel a transzformációs reflexiót a síkra, amely párhuzamos YZ síkkal, metszve a $(2,5, 0, 0)$ pontot. Más szavakkal, az előbbi transzformáció az épületgeometria eleje és hátulja közötti cserét jelenti, míg az utóbbi transzformáció a köteg két oldala közötti cserét jelenti.

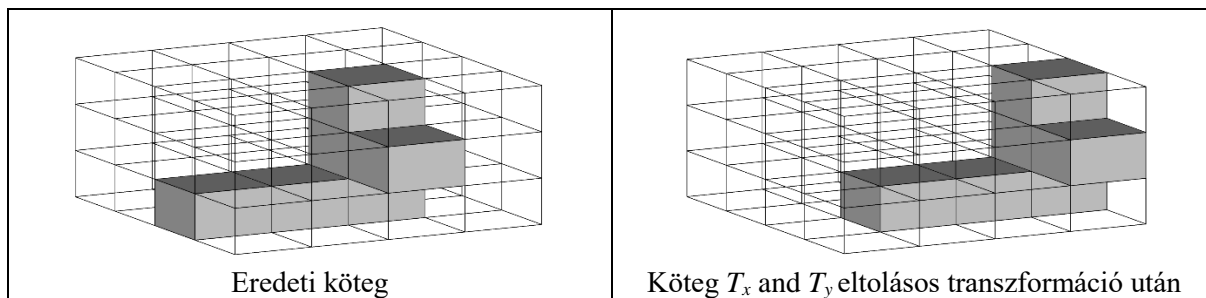
3. Jelöljük T_x -szel az origó irányába történő és az X tengellyel párhuzamos transzformációs eltolódást, és hasonlóan T_y -nal Y tengellyel párhuzamos transzformációt az origó irányába.



25. ábra: A kötegek forgatása – példa.



26. ábra: A kötegek forgatása - példa



27. ábra: A kötegek váltása - példa

Az algoritmikus megállapítás alátámasztására, hogy két köteg azonos-e vagy sem, valamint a további szempontok alátámasztására a következő tétel kerül bevezetésre. Tétel: Minden egyforma köteg elkészíthető egy kezdeti kötegből, egyetlen lépéssel járó transzformációval vagy kétlépcsős átalakítások sorozatával, 1., 2. vagy 3. típusú.

Bizonyítás. Először hajtsuk végre az összes többi transzformációt, végül a T_x és T_y transzformációt a szükségességi foknak megfelelően végezzük el. Először a transzformációk explicit formáját adjuk meg.

$$R_1: (x, y, z) \rightarrow (y, 6 - x, z) \quad \text{Eq(1)}$$

$$R_2: (x, y, z) \rightarrow (6 - x, 6 - y, z) \quad \text{Eq(2)}$$

$$R_3: (x, y, z) \rightarrow (6 - y, x, z) \quad \text{Eq(3)}$$

$$S_X: (x, y, z) \rightarrow (x, 6 - y, z) \quad \text{Eq(4)}$$

$$S_Y: (x, y, z) \rightarrow (6 - x, y, z) \quad \text{Eq(5)}$$

A következő azonosságok adhatók meg:

$$R_i \circ R_j = R_n \text{ ahol } n = (i + j) \bmod 4 \text{ ha } n = 0 \text{ akkor az eredmény} = I \quad \text{Identity (1)}$$

$$S_X \circ S_X = I \quad \text{Identity (2)}$$

$$S_Y \circ S_Y = I \quad \text{Identity (3)}$$

$$S_X \circ S_Y = S_Y \circ S_X = R_2 \quad \text{Identity (4)}$$

$$R_2 \circ S_X = S_Y \quad \text{Identity (5)}$$

$$S_X \circ R_1 \circ S_X = R_3 \quad \text{Identity (6)}$$

$$S_X \circ R_2 \circ S_X = R_2 \quad \text{Identity (7)}$$

$$S_X \circ R_3 \circ S_X = R_1 \quad \text{Identity (8)}$$

$$S_X \circ R_1 = R_3 \circ S_X \quad \text{Identity (9)}$$

$$S_X \circ R_2 = R_2 \circ S_X \quad \text{Identity (10)}$$

$$S_X \circ R_3 = R_1 \circ S_X \quad \text{Identity (11)}$$

Tegyük fel, hogy létezik egy R típusú és S típusú átalakítás sorozata, amelyet egy kezdeti helyzetben lévő kötegen hajtanak végre, és az átalakítások és a végső eltolódások után egy másik köteggé válik, vagyis a két köteg megegyezik. Az 1., 2., 3. és 4. azonosság ismételt alkalmazásával transzformációk sora állítható össze. Ez a transzformációs sorozat egyenértékű

az eredeti transzformációs sorozattal, azzal a feltétellel, hogy az R és az S típusú transzformációk felváltva helyezkednek el, vagyis nincs két azonos R típusú és két azonos S típusú transzformáció egymás mellett. Az 5. identitás alkalmazásával minden S_Y transzformációt az $R_2 \circ S_X$ transzformáció vált fel. Ezután ismét alkalmazzuk az 1. azonosítót. Az eredmény egy ekvivalens transzformáció sorozat, ahol az R és az S_X típusú transzformációk felváltva helyezkednek el. A 6,7 és 8 azonosságok alkalmazása után az eredményül kapott transzformációs sorok lerövidülnek egy vagy két lépés hosszúra, vagy az eredményül kapott sorok $R_i \circ S_X \circ R_j$ formájúak lesznek. Ha ez utóbbi típusúról van szó, akkor a 9., 10. és 11. azonosítót kell alkalmazni, és ezt követően az 1. azonosítót újra alkalmazni kell. Így a végső sorozat az eredeti transzformációk sorozatával egyenértékű sorozat, és egy vagy két lépéssel rendelkezik. Így ez a tétel bizonyítást nyert.

Technikailag a fent említett tétel könnyen megvalósítható a fent említett és a következő folyamatok felhasználásával. Az YZ síkkal párhuzamos síkot tükröző folyamat egyszerűen átalakítja a köteg blokkjainak x koordinátáit. Ugyanis a köteg x koordinátáját 6-x-re kell állítani, míg a blokk összes többi koordinátája megmarad. Hasonlóképpen, az XZ síkkal párhuzamos síkot tükröző folyamat egyszerűen átalakítja a kötegek y koordinátáit, ezeket 6-y értékre kell állítani, miközben a blokk összes többi koordinátája megmarad. A kötegek 90°-os elforgatása az óramutató járásával ellentétes irányba a köteg x és y koordinátáinak megváltoztatásával, míg a kötegek 90°-os elforgatása az óramutató járásával megegyező irányba úgy valósítható meg, hogy az új koordinátákat $x = 6-y$ és $y = 6-x$ értékre állítják. Javasolom ezeket az átalakításokat a korábban említett mozgatási folyamattal együtt használni, mivel például az utolsó folyamat egy köteget eredményezhet, amely a jobb felső irányba tolódik el. A tételek hasonló 90°-os elforgatása az óramutató járásával megegyező irányban úgy valósítható meg, hogy az új koordinátákat $x = y$ és $y = 6-x$ értékre állítják, ami a bal felső irányba tolja el a köteget.

Ezenkívül technikailag a kötegek azonosítása a következő eljárással vizsgálható. Minden ismert konfiguráció hozzáadódik egy listához. A konfigurációk blokkjait buborékok szerint rendezik x, y és z koordinátájuk szerint. Ezt a páronkénti összehasonlítások megkövetelik. Nyilvánvaló, hogy az újonnan létrehozott köteg blokkjai is buborékok szerint vannak rendezve. Ezután összehasonlítjuk a lista minden elemét, nevezetesen az új köteg minden blokkját a lista következő konfigurációjának blokkjaival. Ha teljes az egyezés, akkor az új köteg duplikátumnak tekintendő, és ki kell zárni. Ellenkező esetben ez egy új konfiguráció, és figyelembe kell venni.

3.7. Eredmények és következtetések

A megadott építészeti probléma meghatározza az összes potenciálisan megvalósítható épületkonfiguráció létrehozását. Megállapítható, hogy a garantált számú geometriai konfiguráció sikeresen elkészült, kielégítve az adott építészeti szabályrendszert. Ez a kutatás lehetővé teszi a javasolt generatív lépés integrálását egy átfogó módszertani rendszerbe, ahol a passzív; a konfigurációkhoz kapcsolódó épületgépészeti stratégiák értékelhetők. Ez segítő kezdet ad az építésznek ahhoz, hogy teljes mértékben ellenőrizze az energiával és az optimális lakóépületek kialakításával kapcsolatos törekvéseit. A következő lépések egyike előre láthatóan a generatív módszer bővítése különféle építészeti szempontokkal az energia- és komfortoptimális épületek tervezésének biztosítása érdekében. A bemutatott módszerrel a 201359550 kötegek száma összesen 167 konfigurációt generált.

4. Szimulációs adatbázis-fejlesztés, amely támogatja az épületek optimalizálását

4.1. Bevezetés

Az adatbázis létrehozása elengedhetetlen a bemeneti és kimeneti paraméterek összekapcsolásához és így a paraméterek összefüggéseinek és azok határértékeinek felderítéséhez. Döntő fontosságú az érzékenység vizsgálat vagy a neurálishálózat kidolgozása szempontjából is. Ezek az adatkapcsolatok a bemenetek és a kimeneti paraméterek között egy szabályrendszeren keresztül szolgálnak az új tervezési módszer alapjaként és próbapadjaként. A jelenlegi kutatás ebben a fejezetben egy példaértékű adatbázist vezet be, korlátozott számú szimulációval és bemenettel, az automatizálás hiánya miatt. Ezzel szemben ez a manuális módszer ígéretes eredményeket tudott felmutatni az érzékenység vizsgálat során. Az első lépések egyike a bemeneti adatok típusának vagy viselkedésének azonosítása volt, megvizsgálva, hogy diszkrét vagy folytonos tulajdonságokat mutatnak-e. A hagyományos (Morris mintavételi módszer) érzékenység-elemzéshez diszkrét bemeneti értékekre van szükség. A folyamatos értékek realizálásakor konverzió szükséges. pl. a tájolás folyamatos paraméter, ezért déli, északi, nyugati, keleti egyenlítőket alkalmaztam. Egy másik cél az automatizálás és az érzékenység vizsgálat egyes lépéseinek megállapítása és meghatározása, hogy ezen eljárások számára a megfelelő formában, megfelelő felbontással készítsünk adatbázist.

4.2. Geometriai konfigurációk tulajdonságai

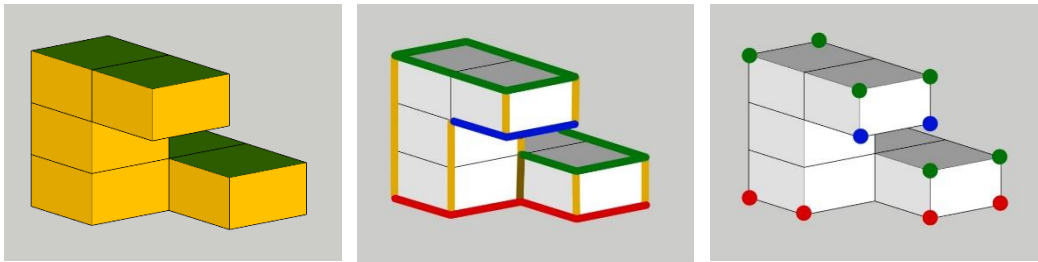
Minden megvalósítható geometriai konfigurációt elő kellett állítani, amelyek potenciálisan megfelelnek egy családi ház követelményeinek. Csak azokat a geometriákat állítottam elő, amelyek megfelelnek a szabályoknak, és más geometriákat nem szabad figyelembe venni. Adatbázis-létrehozási szempontból a modularitás és a szigorú szabályok biztosították, hogy a szabályok vagy azok hatásai ne fedjék egymást, inkább kiegészítsék egymást. Később az épületmodellek generálása érdekében ki kell választani a megfelelő épületgeometriai változókat melyek alkalmassá teszik ezeket a modelleket a szimulációs feldolgozásra

A 167 építészeti szempontból potenciális épületgeometria energetikai tulajdonságai különféle módon fejezhető ki; az átviteli hőveszteség felülete és a fűtött padlótér aránya: A_{env}/S_{tot} . Ezt a következő egyenlet fejezi ki:

$$A_{env} / S_{tot} = (A_{env-air} + A_{env-ground} \cdot 0,73) / S_{tot}$$

Ahol az $A_{env-air}$ a tető és a homlokzati szerkezetek felületét m^2 -ben jelenti, az $A_{env-ground}$ padló felületet jelöli; a talajjal szomszédos felületet m^2 -ben, a S_{tot} pedig a teljes nettó alapterületet m^2 -ben. A 0,71 tényező egy dinamikus termikus szimuláció alapú érték, amely a geometriai konfigurációk különböző felületeinek - fal szerkezetek és talajjal érintkező szerkezetek - hőátbocsátási veszteségének egymáshoz viszonyított arányát fejezi ki átlagosan. Minél kisebb az A_{env} / S_{tot} érték, annál nagyobb az épületgeometria energiahatékonysága. A 167 épületgeometria elemzésével 17 azonos A_{env} / S_{tot} értékekkel rendelkező geometriai csoportot lehetett azonosítani, mivel számos geometriai variációnak hasonló az épület szerkezetéből eredendő hővesztesége. A koordinátákat építészeti szempontból nehéz dekódolni, és sok hasonló, ismétlődő adatot tartalmaznak. E geometriák numerikus megkülönböztetésére,

koordinátarendszer segítségével, éleket és csúcsoakat is megkülönböztettünk, mivel a felületek számai nem elégségesek a konfigurációk megkülönböztetésére és így könnyebb ellenőrizni a különböző hatásmechanizmus-vizsgálatok eredményeit. (28. ábra).

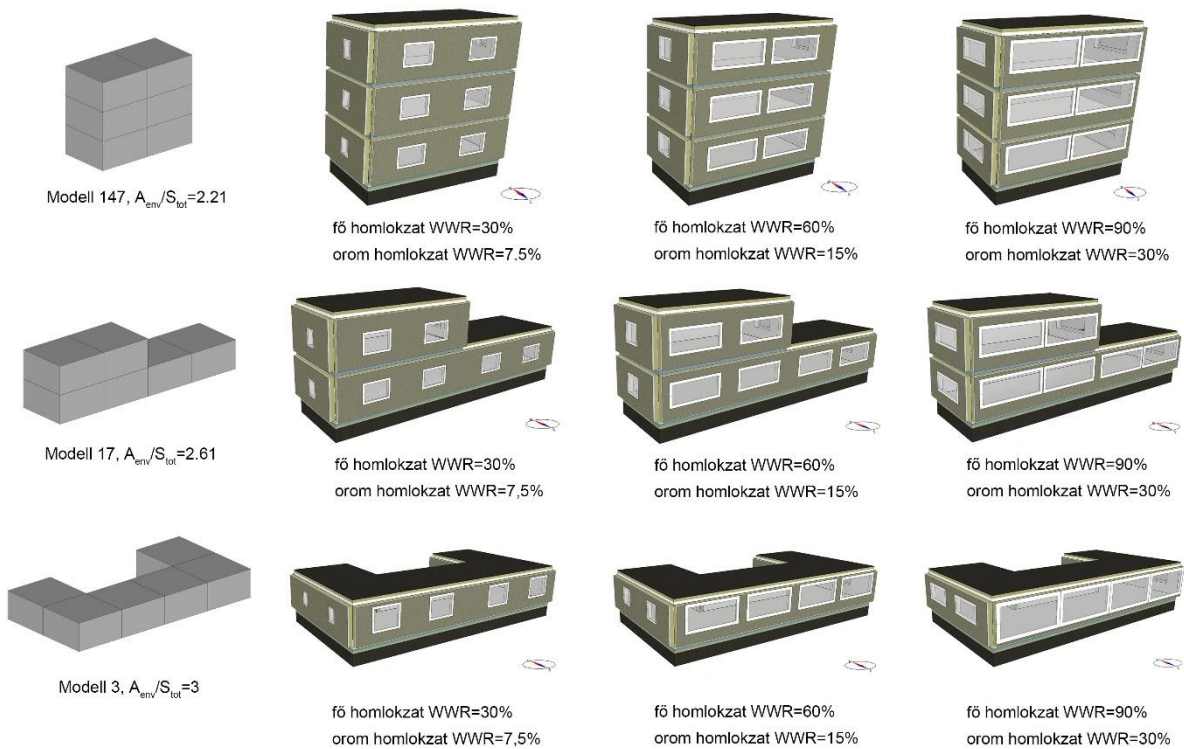


28. ábra: Egy példaértékű geometriai konfiguráció, amely a kiegészítő független tervezési változókat szemlélteti.

4.3. Épületmodell-generálás

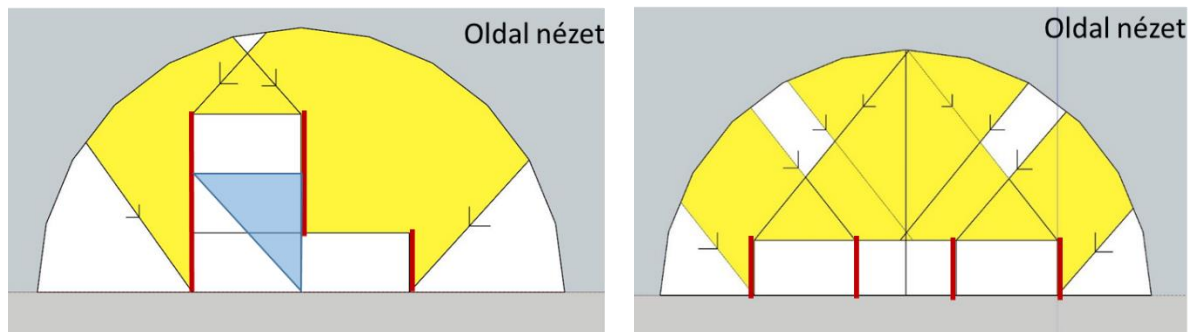
A kiválasztott 167 geometria felhasználásával két épületburkolati szerkezet-alternatívát, három padló-ablak aránytér arányt (FWR) és fal-ablak arányt (WWR), valamint öt tájolási irányt (kelet és nyugat között) alkalmaztunk, létrehozva összesen 5010 épületmodell eset. Végül az épületmodellek paramétereit egy dinamikus beltéri komfort és energiaszimuláció veszi figyelembe a fűtési, hűtési és világítási energiaigény, valamint a hő- és vizuális komfort minőségének számszerűsítéséhez. A felhasználó által definiált preferenciák alapján vagy a részeredmények és a teljes eredmény „abszolút” viszonya alapján a súlyozott részeredmények összege szolgál alapul a modellek végső sorrendjének megalkotásához. Ezenkívül az optimális modell(ek) is kimutatható(k), a felhasználó preferenciáitól függő optimális komfort-energia arányt teljesítve.

Két különböző épületburok-szerkezetet vettem figyelembe. Az első változat szabályos szerkezetekkel rendelkezik, amelyek megfelelnek a magyar épületenergetikai törvény (7/2006 V.24. TNM) aktuális követelményeinek, vagyis 30 cm vastag külső téglafalból, 8,57 cm külső hőszigetelésből ($U_{\text{wall}} = 0,24 \text{ W/m}^2\text{K}$), 16 cm-es betonpadló 10 cm-es szigeteléssel és 15 cm kavics ($U_{\text{floor}} = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$) és 20 cm-es betontető (födém), 20 cm-es szigeteléssel ($U_{\text{roof}} = 0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$). A háromrétegű üvegezés U -értéke $1 \text{ W/m}^2\text{K}$. A második szerkezeti változat (STRUCT 2) fejlett hőtulajdonságokkal rendelkező szerkezeteket tartalmaz, amelyek 60 cm vastag külső téglafalból, 30 cm külső hőszigetelésből állnak ($U_{\text{wall}} = 0,11 \text{ W/m}^2\text{K}$), 16 cm betonpadlóból 18 cm szigeteléssel és 15 cm kavicsból (Padló = $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$) és 20 cm beton tetőből (födém) 25 cm szigeteléssel ($U_{\text{roof}} = 0,14 \text{ W/m}^2\text{K}$). A háromrétegű üvegezés U -értéke $0,7 \text{ W/m}^2\text{K}$. Az ablakkeret frakciója 0,3. Három különféle üvegméretet integráltam a főhomlokzatba, amely az egyes modellek legnagyobb homlokzati felületét képviselte, valamint az orom homlokzatokba. A modellek fennmaradó homlokzata(i) áttörés, nyílás nélkül maradtak, képviselve az épületek zárt, bejárati oldalát. Ugyanazon tulajdonságú üvegezést kell használni a különböző üvegméret hatáshasonlításához. A főhomlokzatok 30% ($20,62 \text{ m}^2$), 60% ($41,25 \text{ m}^2$) és 90% ($61,82 \text{ m}^2$) WWR-t tartalmaznak, így a különböző geometriák hatása jobban láthatóvá válik. 90%-os ablakarányú homlokzat nyílászáró szerkezetének méretét a legalacsonyabb Aenv / Stot arányú geometria határozta meg, mivel ez rendelkezett a legkisebb főhomlokzati felülettel. Míg a 30% WWR-t tekintik a legalacsonyabb lehetséges WWR-nek egy megfelelő nyílászárókkal rendelkező lakóházban, addig a 60% WWR a maximális és a minimális nyílászáró arány közötti középérték. Az alárendelt homlokzatok 7,5%, 15% és 30%-os WWR-t kaptak, ami teljes nyílászáró felületek nagyságában megnyilvánuló különbségekhez vezetett (29. ábra, eltérő nagyságú a főhomlokzatok felülete két konfigurációt összehasonlítva).



29. ábra: Épületmodellek, amelyek három különböző WWR-t tartalmaznak (2., 3. és 4. modell sor felülről).

A modelleket a kiválasztott három épületgeometriából fejlesztettem ki (29. ábra, 1. modellsor felülről). Öt tájolási irányt vettem figyelembe a vizsgálat során, beleértve a legtöbb napsugárzást uralkodó keleti, délkeleti, déli, délnyugati és nyugati irányban. A modellek fő homlokzatait öt különböző irányba fordítottam. A főhomlokzat azonosítását az azonos irányba eső felületeket ért átlagos napsugárzás mértéke határozta meg. Minden homlokzati méretet fel kellett jegyezni és össze kellett hasonlítani, hogy alapvető információkat szerezzek a főhomlokzat megállapításához. Természetesen az épületmodellek ellentétes oldalán elhelyezkedő párhuzamos homlokzatok azonos méretű felületekkel rendelkeznek, így a főhomlokzat megállapításában nem a homlokzati felület nagysága dönt, hanem a szoláris sugárzás eloszlása és átlagos mértéke, ami a déli tájolási irányba forgatott konfiguráció vizsgálandó felületeit éri. Bizonyos esetekben ez a módszer nem állapítható meg szemrevételezés során (30. ábra), ezért szükség van egy szimulációs összehasonlításra.



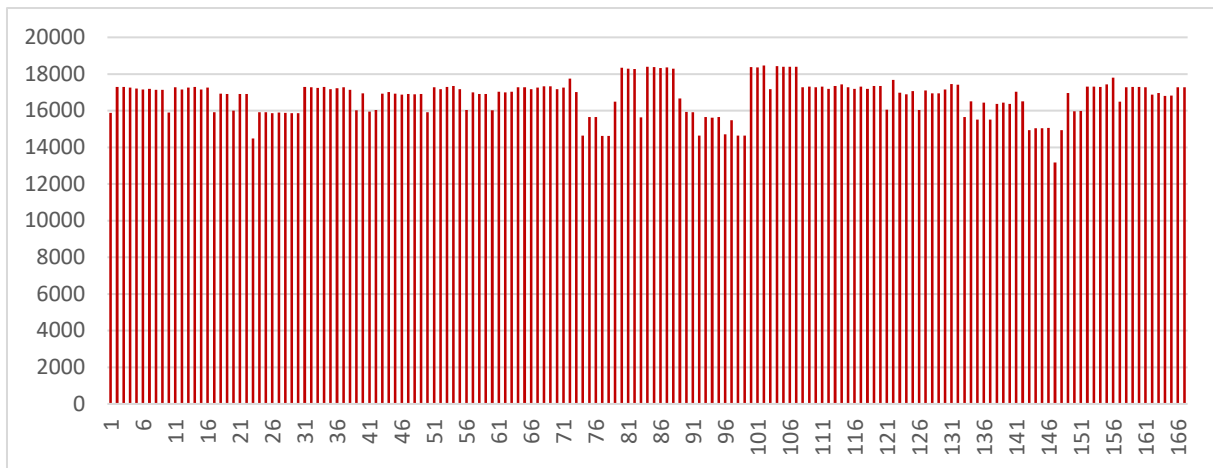
30. ábra: A vertikális szoláris sugárzás alapú elemzés (M107) (balra), Bizonyos konfigurációknál – szemre nem megállapítható (M32) (jobbra)

A belső falak és válaszfalak nem lettek felhasználva, csak a födémek választják el a szinteket. Ezt az egyszerűsítés tudatosan lett alkalmazva a többszintes beltéri helyiségek elkerülése érdekében. A változatos lejtős tetőket, galériákat, lépcsőket nem modelleztem meg, mert az első kutatási lépésben nem nyomon követhető és túlbonyolított folyamatok kezelését jelentette volna, melyek alkalmazása olyan kérdéseket vetettek fel, amelyeket a további kutatások során kell majd figyelembe venni.

4.4. Szimulációs módszer

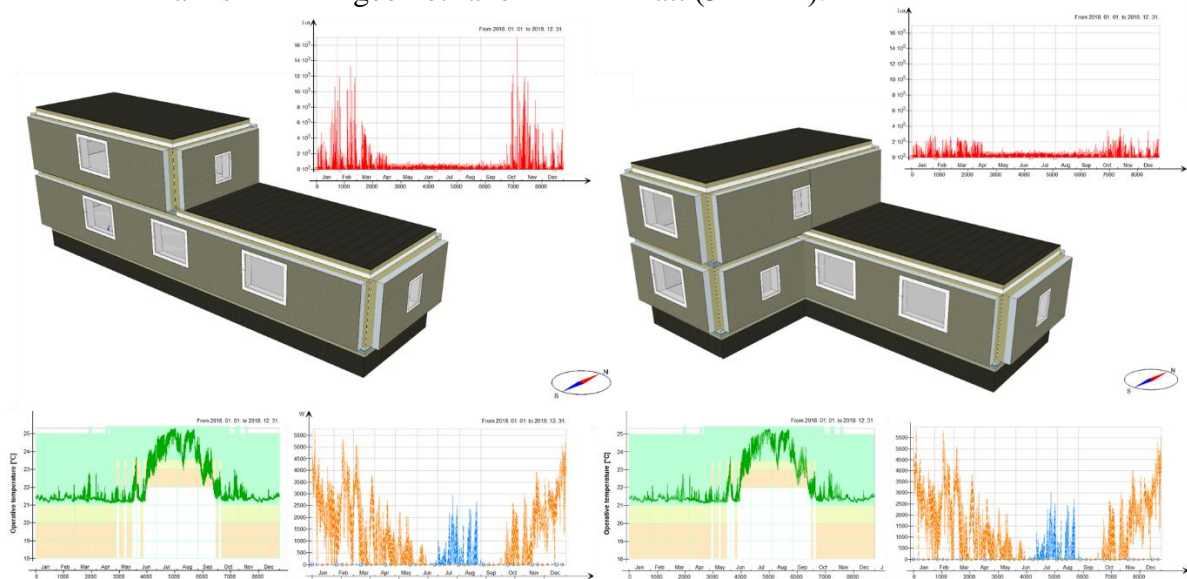
Az alábbi dinamikus hőszimulációs számítások alapján lehetőség van részletes, komplex elemzés elvégzésére éves, óránkénti felbontásban az épületek időfüggő vizuális komfort, hőkomfort és energetikai viselkedéséről, figyelembe véve a helyi éghajlati viszonyokat. A különböző modell változatok teljesítményeit a számítási eredmények segítségével elemeztük, hogy bizonyítsuk a komfort és az energia különbségek érvényességét, és ezek a modellek alapot szolgáltatassanak a súlyozott értékeléshez. A számítási motort az IDA ICE 4.8 beltéri klíma és az energiadinamikus termikus szimulációs szoftver alkalmazása biztosítja. Az IDA ICE képes a magas színvonalú vizuális megjelenítésre és az utólagos eredmény értékek feldolgozására, figyelembe véve a különféle szabványokat, de jelenleg vannak olyan funkciók (korlátlan parametrizálás és eredményformátum-feldolgozás), amelyek fejlesztés alatt állnak. ASHRAE IWEC2 klíma adatbázist használta a szimulációs szoftver. A mesterséges megvilágítást, a berendezéseket és a lakók viselkedését a tipikus családi házak szokásos használatának megfelelően modelleztem. A belső tér hőleadó rendszere és a hőtermelő központi rendszer, megfelelő a fűtési és hűtési teljesítmény az átlagos energetikai és komfort igények szerint lettek méretezve, valamint a légkezelő egység (AHU) biztosítja az átlagos légcserét (ACH) sebességet. A 5010 épület esete energetikai- és komfort értékelését ugyanazokkal a peremfeltételekkel, éghajlati és helyzeti adatokkal, szerkezetekkel, gépészeti beállításokkal kell elvégezni. A szimulációk célja a hűtési és fűtési és a mesterséges megvilágítás energiaigényének részletes összehasonlító elemzése, valamint a hő- és vizuális komfort értékek kimutatása. Az azonos számítási peremfeltételek és beállítások miatt az energetikai- és komfort eredmények eltéréseit; a különböző épületalak, szerkezetek, ablak-padló arány (WFR), ablak-fal arány (WWR) és tájolás hatásai alapján várhatóak.

Az ablakok 167 konfigurációra történő alkalmazása előtt szimulációkra van szükség a geometria-konfigurációk közötti energetikai különbségek megállapítása és a geometriával kapcsolatos további változók, pl.: csúcsok, élek hatásának mértékének ellenőrzése érdekében (31. ábra).



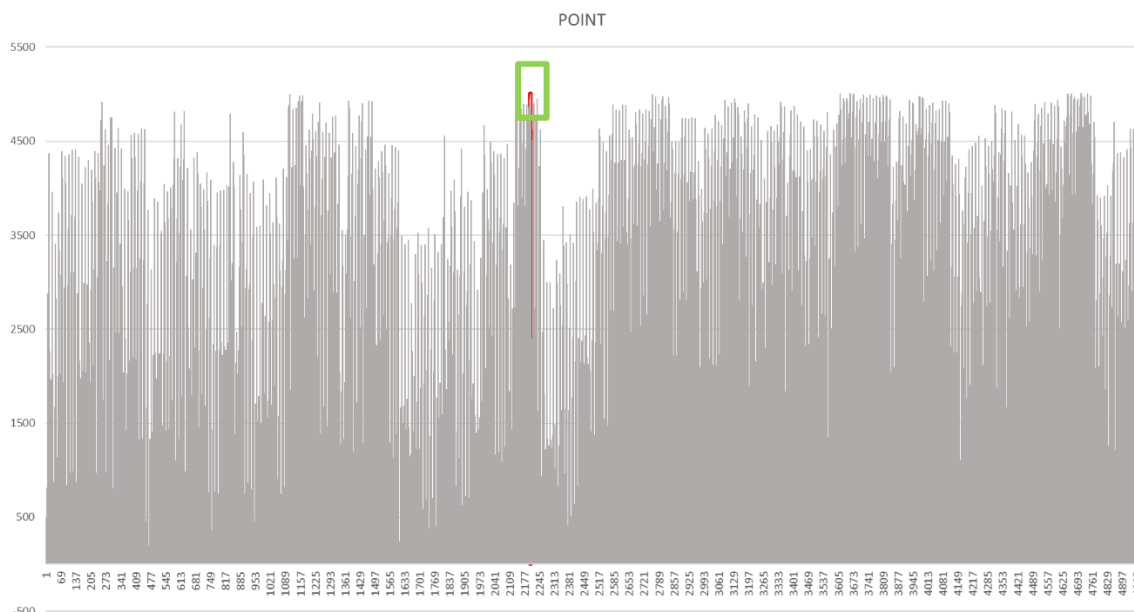
31. ábra: Geometriai konfigurációk fűtési energiaigénye (kWh/év)

Ellenőrzéseket végeztem hasonló tulajdonságú épület esetek szimulációjával. Ezek az eredmények hasonló energetikai eredményeket mutattak, de a komforttal kapcsolatos mutatók különböztek a kis mértékű geometriai eltérések miatt (32. ábra).



32. ábra: hasonló geometriájú épület esetek szimulációs eredményeinek összehasonlítása

Következő lépésként minden esetben meghatároztam az összes energetikai és az összes komfort rangsor pontjának összegét, így a legmagasabb rangsorolási ponttal rendelkező 147 modell (175) lett az optimális megoldás erre a családi ház tervezési feladatra.



33. ábra: Az 5010 épület eset pontozott eredményei

Az 33. ábra minden építési eset súlyozott pontjait mutatja. A legjobb energiával és komforttal kapcsolatos teljesítményt a legtöbb ponttal rendelkező 147-es modell biztosítja, 90% -os WWR-rel és déli tájolással. Az optimális épületmodell teljesítmény-eredményei: 7632 kWh fűtés, 2282 hűtés 1620 kWh világítás, 37,81% megvilágítás, 100% DF, 60,43% PMV. Az értékelés utáni optimális épület modell esetet választották, és kétségtelenül optimális volt, mert az első kutatási fázis modelljei (90) és a második kutatási fázis modelljei (5010), ugyanazt az épület esetet jelölte optimálisnak.

4.5. Eredmények és épületfizikai összefüggések ismertetése

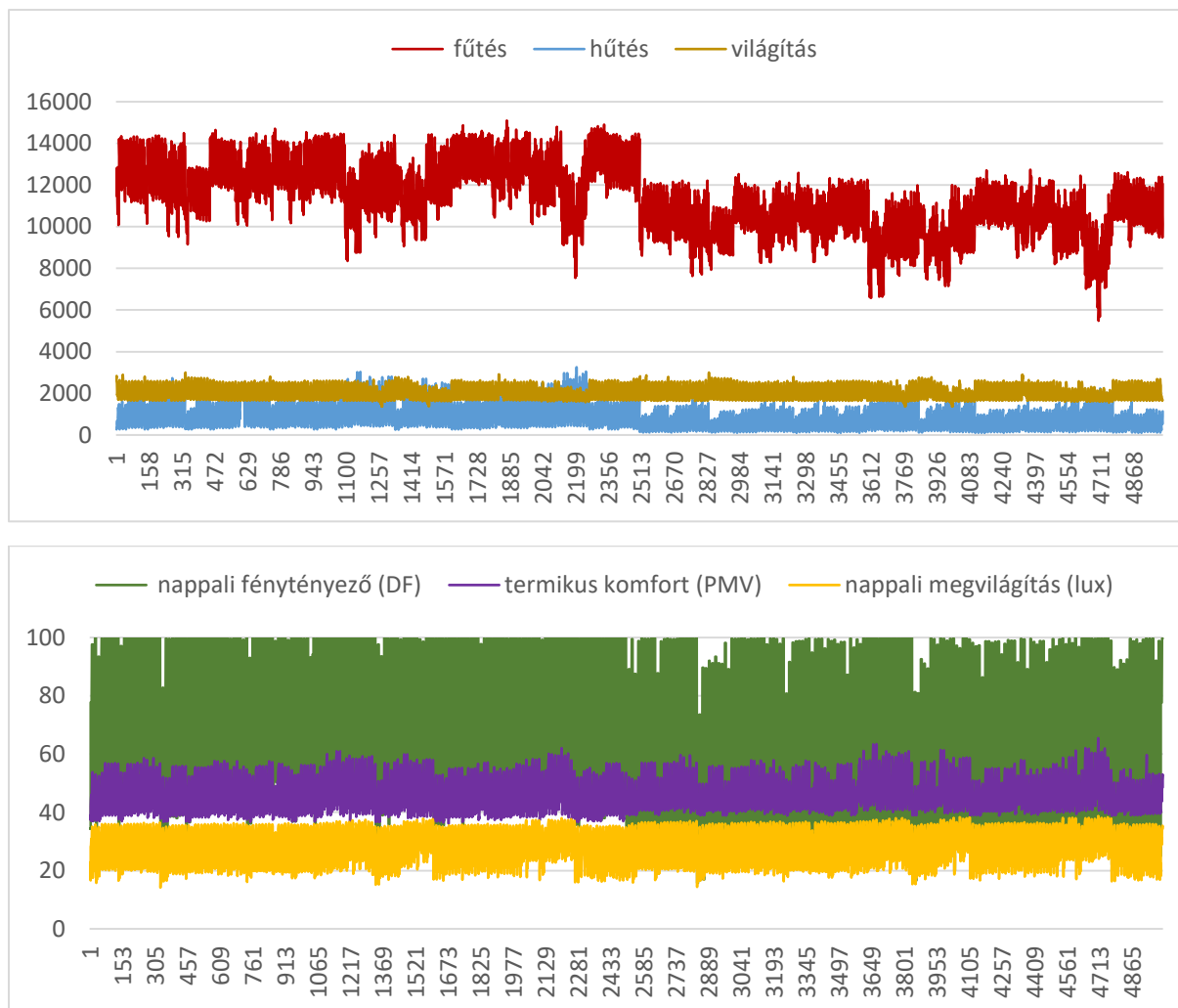
Az egycsaládos családi ház példája céltudatos választás, hogy a vizsgált keresési tér kezelhető maradjon. Mivel az összes épületgeometria generálása a megadott szabályok szerint algoritmikusan elvégezhető, megállapítható, hogy minden megvalósítható épület eset alkalmas a további épülettervezési feladatokra. A vizsgálat különösen a passzív épülettervezési stratégiákra összpontosít, mint a fokozatos fejlesztési folyamat első fázisára, amely kiterjeszhető aktív épületgépészeti és automatizálási rendszerrel. Komplex energetikai és komfort szimulációk biztosították az épületmodellek épületfizikai alapokon nyugvó teljesítményének plauzibilitását.

A szimulációs eredmények hat különböző típusa különböztethető meg (34. ábra):

Az energiával kapcsolatos csoportban: fűtési energiaigény, hűtési energiaigény, világítási energiaigény. A komforttal kapcsolatos eredmények csoportjában; előre jelzett átlagos tartomány (Predicted Mean Vote), amely a termikus komfortot képviseli (elfogadható szinteken; 0,5 és -0,5 között a helyiségben való tartózkodási idő arányában), nappali bevilágítás számítása, amelynél az értékek meghaladják az 500 luxot, nappali fény tényező értékek padlófelületre vetített eloszlásának aránya, amelynél az értékek magasabbak, mint 1,7% nappali fény tényező (daylightfactor) az aktív ház előírások alapján.

Mindig figyelembe kell venni, hogy az adott paramétereknek különböző mértékű az eloszlása az 5010 épületmodell esetében, azaz ugyanaz a tájolás minden ötödik eredménynél előfordul, de egy adott szerkezeti összetétel csak minden második eredménynél.

Ezeket a hatásokat felülírják a változók közötti eltérő kapcsolatok. pl: A nyílászáró arányoknak nincs értelme orientáció nélkül, az A_{env}/S_{tot} is tartalmazza a konfigurációk összes összetevőjét és azok fűtésre gyakorolt hatását egy bizonyos fokig.



34. ábra: az 5010 szimulációs eset fűtési, hűtési, mesterséges megvilágítási energiaigénye (felül) [kWh/év], illetve vizuális és termikus komfort eredményei (alul) [idő%]

Az energiateljesítményt a primer energiaigény szintjére kell kiszámítani, hogy lehetővé váljon a fűtés hűtési és világítási fogyasztásának összehasonlító elemzése. Ezt egy primerenergia-tényezőt (Pe-faktor) alkalmazva érjük el az energiahordozók szerint: gázra 1, a villamos energiára pedig 2,5. A fűtési teljesítményt alapvetően befolyásolják a burkolatok szerkezeti tulajdonságai és az alakja. A hőtároló tömeg és a szigetelés növelésével a téglafal vastagságának megduplázásával és a burkolat szigetelésének megvastagításával az U_{wall} 65% -kal, az U_{floor} 40% -kal és az U_{roof} 28% -kal csökkent, azaz kisebb mértékű energiaigényt eredményez.

Az épületek különböző alakja nem befolyásolja jelentősen a fűtési igényt, mivel az üvegezés aránya viszonylag magas, ami a napsugárzás nyereségének és veszteségének magas arányát eredményezi az ablakokon keresztül. A főhomlokzat orientációjának változása megegyező épületgeometria esetén, a szoláris sugárzás a déli tájolású modellekben kb. 7,72% - 30,44%

(STRUCT. 1 modellek), fűtési igény csökkenést eredményezett a nyugati tájolású esetekhez viszonyítva. A fűtési igényhez kapcsolódóan a legjobb teljesítményt a 147-es modell képviseli, mivel a legjobb formai aránnyal rendelkezik és déli tájolású homlokzati felületének 90%-a üveg és természetesen a kedvezőbb hőátadási képességekkel rendelkező szerkezetekből épült fel. Fontos megjegyezni, hogy a primer fűtési energiaigény jelenti a legnagyobb „fogyasztót”, aránya a modellek teljes energiafogyasztásának 80,05% -a. A világítási igényt jelentősen befolyásolja a WWR és a tájolás. A növekvő ablakozási arány mellett a mesterséges megvilágítás fogyasztása 24,19% - 9,74% -kal csökken, az üvegtáblákon keresztüli természetes megvilágítási intenzitás növekedése miatt. Ugyanakkor, minél kisebb a WWR, a növekvő eltérés jelenik meg a megvilágítási igényt tekintve a különböző tájolások között. Ennek a hatásnak az oka, hogy a déli tájolású épületben a napsugarak meredek dőlésszöge, kisebb nappali megvilágítási intenzitást eredményez a belső térben, és ezért nagyobb szükség van a mesterséges megvilágításra. A világítási igényeket tekintve a leghatékonyabb modellek 90%-os WWR-rel rendelkező modellek voltak. A belső tér vizuális komfortminőségének értékelése az építési esetekben a nappali megvilágítottság és napfénytényező (DF) értékelésből áll. A nappali megvilágítás minősíti a beltéri vizuális komfortot globális sugárzási körülmények között. Az 500 lx feletti átlagos megvilágítási intenzitású órák mennyiségét választottam ki abban az időszakban, amikor az árnyékoló eszközök működése le volt tiltva. Ily módon csak kiváló minőségű, megvilágított vizuális komfort órákat gyűjtöttem össze, és számukat a minta időtartamához viszonyítva [%] -ban állapítottam meg. Ellenkező esetben az alacsonyabb határérték kiválasztása csillapítaná az esetek közötti különbségeket, és az alacsonyabb vizuális komfort szintet is figyelembe venné. Nyáron, amikor az árnyékolók kifejtették hatásukat, a napfény intenzitása kb. 500-700 lx maradt, így nem vizsgáltam ezt az időszakot, mivel így ebben az évszakban minden eset hasonló eredményt hozott. Első látásra a megvilágítási grafikon a fényenergia-igény grafikonra, mint kiegészítő függő értékre reflektál. Ugyanakkor fontos megjegyezni, hogy bár a megvilágítást csak abban az évszakban értékeltem, amelyikben nem történt árnyékolás, október 15. és április 15. között a vizuális komfort órák sikeresen reflektálhattak a változó nappali fényviszonyokra a különféle WWR miatt. Nagyobb üvegezési aránynál a megvilágítás kb. 36,55% - 57,3%-al növekszik 60%, illetve 90%-os WWR esetén. A kisebb WWR (30%) esetek 34,56% - 15,34% erősebb diverzitást mutatnak a tájolás függvényében (különbség a nyugati és a déli tájolás között), a domináns téli napsugárzás déli irányú alacsony beesési szöge miatt (téli az értékelési idő). A legalacsonyabb és a legmagasabb ablakozási arányú modelleket vizsgálva a megvilágítás különbsége kb. 12,91%. A legelőnyösebb megvilágítási szintet a WWR 90% -os modellek biztosítják, a tájolástól függetlenül. A nappali fénytényezőt (DF) a RadianceTM interfész segítségével szimuláltam, vegyes, diffúz nappali fényviszonyok mellett (CIE felhős ég). A vékonyabb homlokzati struktúrák lehetővé teszik a több diffúz nappali fény bejutását a belső terekbe, átlagosan 17,03% -os növekedést biztosítva a (szerkezet 2) STRUCT 2 modellesoporthoz képest. A STRUCT 1 csoport legkisebb WWR-rel rendelkező modelljei 62,63% -kal jobban teljesítenek, mint a vastagabb szerkezetű modellek, míg közepes üvegezés esetén ez az érték 19,5% -ra csökken. Minél magasabb az üvegezési arány, annál magasabb a DF teljesítmény is: 132,38% -os növekedés 30% WWR-ről 60% -os WWR-re és 18,98% -os növekedés 60-90% -os WWR lépcső esetén. Az A_{env}/S_{tot} arány hatásai a DF teljesítményre: a legrosszabb termikus adottságokkal rendelkező modell átlagosan 3,4% -kal jobban teljesített közepes ablak méretekkel, alacsony üvegezésű modell verziókban pedig 20,85% -kal jobban teljesít, mint a 17-es modell (közepes termikus geometriai adottságok). Ez az nyílászárók fő homlokzati felületeken való eloszlásának különbségeinek és a az ablakok arányainak („szalaghatás”) köszönhető. A „szalaghatás” itt azt jelenti, hogy egy szélesebb ablak előnyösebb, mint egy magasabb ablak, a DF növelése és a homogén diffúz fényeloszlás érdekében. Az ablak méretaránya az ablak szélességének és a magasságának viszonyát fejezi ki, amikor az adott

magasságot 1-nek tekintjük. 6-homlokzati egységnyi terület a 17. és 147. modellben: ablak oldalarány (magassággal / magassággal): i) 30%-os WWR esetén: 1,53 / 1, ii) 60% WWR esetén: 2,32 / 1 és iii) 90% WWR esetén: 2,58 / 1. 4 homlokzati egységnyi területe a 3. modellben: ablakarány (magassággal / magassággal): i) WWR 30%: 1,25 / 1, ii) WWR 60%: 2,12 / 1 szélesebb ablak, mint a kis üvegezés (30%), de nem olyan magas, és iii) WWR 90%: 1.96 / 1 magasabb ablak, mint a közepes üvegezés. A legnagyobb üvegezési arányú esetekben a 147-es és a 17-es modell eléri az azonos DF értékeket, mert a fő homlokzat (6 homlokzat-egység terület) modellenkénti üvegezési aránya és az ablak oldalaránya megegyezik. A 3. modell 4 homlokzati egységének területe ugyanazt az üvegezett felületet tartalmazza m²-ben, mint a 6-os homlokzati egységek modelljei, de az alacsonyabb ablakarány és a sötétebb hátsó zónák miatt nem tud lépést tartani a többi modellel az U-alakú épület tömeg. A legjobb DF-szint a 90% -os WWR-rel rendelkező modellek esetén figyelhető meg, az orientációtól függetlenül. Az EDS épület optimalizálási módszertana szerint a folyamat következő szakaszában meg kell adni az épületmodellek energetikai- és komfort teljesítményének súlyozott végértékeit és meg kell határozni az összes eset sorrendjét. Mivel ez a kutatás nem tartalmazza a felhasználók egyedi súlyozási preferenciáit, a súlyozási együtthatókat az egyes energetikai- és komfort vonatkozású eredmény-típusok átlagos értékeinek (6 féle), ezen típusok összegéhez viszonyított aránya határozta meg. Valamennyi modell átlagos primer fűtési, hűtési és világítási energiafogyasztási értékének aránya ezen átlagértékek összértékéhez viszonyítva eredményezte az egyes energiateljesítménytípusokhoz a megfelelő súlytényezőt (weighting factor, WF). Ugyanez az eljárás kiszámítottam a három komfort teljesítménytípus WF-jét. A WF értékek a következők: 80,05% fűtés, 5,88% hűtés 14,07% világítás, 19,87% megvilágítás, 48,53% DF, 31,06% PMV. A WF értékekből kiderül, hogy a fűtés uralja a súlyozási eljárást, majd ezt követi a nappali fényminőség, a megvilágítási igény, a megvilágítási szint és a hűtés. Az energetikai- és komfort vonatkozású teljesítmények eredmény-intervallumok és minimális, illetve maximális értékek tekintetében különböznek egymástól, ezért az összehasonlítás és a rendezés létrehozása érdekében közös pontrendszert vezettem be. Az egyes energetikai- és komfort teljesítménytípusok modelljei pontszámot kaptak, például a fűtési igény tekintetében a legkisebb fűtési igényű modell 5010 (max.) Pontot ért el, míg a legnagyobb fűtési igényű modell 1 (min.) Pontot kapott. Az eltérő komfortteljesítményt értékelve a legtöbb komfortos órával rendelkező modell 5010 pontot ért el, míg a legkevesebb komfortos óraszámúval rendelkező modellek 1 pontot értek el. Az energiahatékonysági pontszámokat ezután megszoroztam a fűtési, hűtési és világítási WF-vel, és a komfort pontszámokat a megfelelő komfort-súlyozási tényezőkkel súlyoztam. A súlyozott teljesítmény pontszámok eredményezték a súlyozott összen energetikai és a súlyozott összkomfort pontszámokat. A súlyozott pontszámokat ezután normalizáltam. Ezt követően csökkenő sorrendet határoztam meg a súlyozott összen energetikai és a súlyozott összkomfort-pontszámok szempontjából. Következő lépésként minden esetben meghatároztam a teljes energetikai és a teljes komfort rangsor pontjainak összegét, így a legmagasabb pontszámot kapott 147-es modell lett az optimális megoldás erre a családi ház tervezési feladatra. A 33. ábra minden építési esetet pontszámait mutatja. A legjobb energiával és komforttal kapcsolatos teljesítményt a 147-es modell biztosítja, 90% -os WWR és déli tájolással. Az optimális épületmodell eredményei: 7632 kWh fűtés, 2282 hűtés 1620 kWh világítás, 37,81% megvilágítás, 100% DF, 60,43% PMV

4.6. Következtetés

Az optimalizálási lépéslánc (EDS módszer) funkcionalitásának érvényesítése érdekében egy kis léptékű, egyszerű tervezési feladatot alkalmaztunk. Egyetlen családi ház példája egy céltudatos döntés, hogy a vizsgált keresési terület kezelhető legyen. Mivel az összes

épületgeometria előállítása meghatározott szabályok szerint algoritmikusan elkészíthető, arra a következtetésre juthatunk, hogy minden további épülettervezési feladatokra alkalmas megvalósítható épület eset előállítható. A konkrét vizsgálat a passzív épülettervezési stratégiákra összpontosít, mint egy fokozatosan fejlődő folyamat első szakaszára, amely kiterjeszhető az aktív épületgépészeti rendszerek alkalmazásával és az automatizálási rendszer komponenseivel. A komplex energetikai- és klímaszimulációk biztosították az épületfizikán alapuló hitelességet az építési modellek eseteinek teljesítménye kapcsán. Az energetikai- és komfort eredményeket objektív súlyozási módszerrel értékelttem az optimális eset felderítése érdekében: az optimális eset A 147-es modell rendelkezik a legjobb helyezéssel, amelyet 80,05% -os fűtés, 5,88% -os hűtés 14,07% -os megvilágítás, 19,87% -os megvilágítás, 48,53% -os DF, 31,06% -os PMV súlyozási tényező biztosít. Az optimális épületmodell teljesítmény-eredményei: 7632 kWh fűtés, 2282 hűtés 1620 kWh világítás, 37,81% megvilágítás, 100% DF, 60,43% PMV. Az adatbázis-fejlesztés során azonosítottam a szükséges lépéseket egy megfelelő adatbázis-rendszer létrehozására a különféle érzékenység-elemzési folyamatokhoz. Ez az adatbázis validálja az ED lépéslánc azon képességét, hogy optimális épületmegoldás megtalálható az előre meghatározott energetikai- és komfort teljesítmény követelményeknek megfelelően. Ez a befejezett modellezési eljárás egy egyszerű példán keresztül demonstrálta a jövőbeli energetikai- és komfort központú épület-optimalizálási módszertan alapvető tartalmát.

5. Érzékenység vizsgálat

Az épületfizikával kapcsolatos építészeti szempontok szerint az épület alakja is elengedhetetlen, mivel meghatározó hatással bír az energiateljesítményre. Vannak hiányosságok a teljes épületgeometriai rendszerek átfogó, szisztematikus energiával és komforttal kapcsolatos generálásában/kezelésében, így ezen a területen további kutatásokra van szükség.

A passzív tervezési stratégiák - beleértve az épület formáját vagy geometriáját és szerkezetét - az egyik legmeghatározóbb tényező az energiával kapcsolatos épületfejlesztés tekintetében.

Érzékenységvizsgálat elvégzésére van szükség, ahhoz hogy a vizsgált keresési térben kiválasztásra kerüljenek a legfontosabb bemeneti paraméterek. Ilyen módon sikerült megerősíteni azt, hogy geometriai konfigurációk szerepe meghatározó a kimenetek szempontjából.

A további vizsgálatok elvégzéséhez, kiegészítettem a bemenő paraméterek listáját ügyelve az érzékenység vizsgálatok és a regressziós modellek kívánalmaira, hogy biztosan tartalmazzon minden fontos geometriai leíró paramétert és az egyes geometriák azonosíthatóak legyenek.

A három bemenő geometriai paraméterek (üvegezési arány, tájolás, szerkezetek) listáját kiegészítettem további bemenő geometriai paraméterekkel 14-re (modulegységek koordinátái, épületburok felületek, sarkok, élek) annak érdekében, hogy a regressziós modellhez szükséges kritikus mértékű megkülönböztethetőséget elérhessem.

A következő bemeneti paramétereket és változókat vettem figyelembe: X_1-6, Y_1-6, Z_1-6, mint koordináták; 'G', mint a talajhoz kapcsolódó felület, 'r', mint a tető felülete; 'B' erkélyfelületként, 'w' külső falfelületként, és csoportosítva, ahogyan azt a 4. táblázat mutatja.

1. táblázat: bemeneti változók csoportosítása

Paraméterek	Magyarázat	Csoport	Kategória	
X_1	első kocka x koordináta	koordináták	bemenet	
Y_1	első kocka y koordináta			
Z_1	első kocka z koordináta			
X_2	második kocka x koordináta			
Y_2	második kocka y koordináta			
Z_2	második kocka z koordináta			
X_3	harmadik kocka x koordináta			
Y_3	harmadik kocka y koordináta			
Z_3	harmadik kocka z koordináta			
X_4	negyedik kocka x koordináta			
Y_4	negyedik kocka y koordináta			
Z_4	negyedik kocka z koordináta			
X_5	ötödik kocka x koordináta			
Y_5	ötödik kocka y koordináta			
Z_5	ötödik kocka z koordináta			
X_6	hatodik kocka x koordináta			
Y_6	hatodik kocka y koordináta			
Z_6	hatodik kocka z koordináta			
szerkezet	különféle	építési eset paramétere		
ablak-fal arány	százalék			
tájolás	szög			
szimulációs eset azonosító	N.o.	számozás	kiegészítő	
# geometria azonosító	konfiguráció száma	számozás		
g	földdel érintkező felület	felületek		
r	tető			
b	balkon			
w	külső fal			
a	árkád (levegővel határos földem)			
a_per_s	homlokzatfelület/padlófelület	együttható		
g él	alap élek száma.	élek		
g pozitív csúcs	alap pozitív csúcs N.o.			
r pozitív él	tető pozitív él N.o.			
r negatív él	tető negatív él N.o.			
a pozitív él	külső fal pozitív él N.o.			
a negatív él	külső fal negatív él N.o.	csúcsok		
a pozitív csúcs	külső fal pozitív csúcs N.o.			
árkád pozitív él	árkád pozitív él N.o.			
árkád pozitív csúcs	árkád pozitív csúcs N.o.	konfiguráció szimuláció		kimenet
nincs ablak fűtés	[kWh/a]			
fűtési energia igény	[kWh/a]		energetikai eredmények	
hűtési energia igény	[kWh/a]			
világítási energia igény	[kWh/a]			
PMV	Hőkomfort-kategória II időarány [%]		komfort eredmények	
nappali megvilágítottság	>500lx időarány [%]			
nappali fény tényező	>1,7 területi arány [%]			

Egyes bemeneti változók hatásának vizsgálatok fontos, hogy ugyanazon bemeneti csoport tagjaként vizsgáljuk meg őket. Ezt nevezzük vizsgálatnak egy csoporton belül; pl. : déli tájolású esetek összehasonlítása a keleti tájolású esetek hatásaival. Egy másik összehasonlítás elvégezhető a különböző bemeneti változók csoportjai között; pl. : orientáció hatásai összehasonlítva az A_{env}/S_{tot} bemeneti változó hatásaihoz; (1. táblázat).

Mindig figyelembe kell venni, hogy az adott paraméterek eltérő eloszlási fokkal vannak szétszórva 5010 szimulációs esetben, vagyis az orientáció minden ötödik eredménynél bekövetkezik, viszont egy szerkezeti összetétel csak az eredmények felére hat. Ezeket a hatásokat felülírják a változók közötti különböző kapcsolatokat. Például az üvegezettségi

arányoknak nincs értelme orientáció nélkül, az A_{env}/S_{tot} magában foglalja a konfigurációk majdnem minden összetevőjét és azok bizonyos fokú fűtésre gyakorolt hatását is.

Az érzékenységvizsgálat segített a szimulációs modellek bemenete és kimenete közötti összefüggések felderítéséhez.

Alkalmazható a modell kimenetéből kiinduló érzékenységvizsgálat, amely a modell bemeneti bizonytalanságának különböző forrásaihoz rendelhető [139].

Más irányból is megközelíthető ez a probléma; kezdve az egyedi tervezési változó hozzájárulásával a tervezési megoldás teljes teljesítményéhez [140].

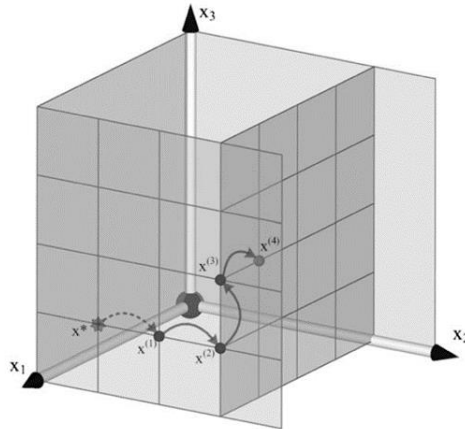
A következő osztályokat különböztetjük meg érzékenységelemzési módszerekkel kapcsolatban: A globális érzékenységi vizsgálati módszerek több tervezési paramétert vesznek figyelembe. A lokális érzékenységi vizsgálati módszerek a kimeneti változékonyságot egyetlen tervezési paraméter változása alapján értékelik. A globális érzékenységi vizsgálati módszert alkalmaztam. Az érzékenységvizsgálatot egy szűrési folyamat előz meg, mely általában az egyes tervezési paraméterek standard értékének két szélső értékét veszi figyelembe, hogy értékelje, mely tervezési paraméterekre érzékeny az épület teljesítménye.

A következő megállapítások ismerete szükséges az érzékenységvizsgálat elvégzéséhez:

- OAT (One At a Time design): csak egy paraméter értéke változik az egymást követő szimulációk között.
 - A k mintavételezett paraméterértékek egy pontot határoznak meg a k -dimenziós térben, és a mintavételi pontok egy 1 oldalú k -dimenziós hiperkockán vannak elosztva (35. ábra).
 - Egy trajektória, azaz egy véletlenszerű ortogonális útvonal, amely lépések a k -dimenziós paraméteren keresztül halad.
 - A trajektóriák 10 lefutása ajánlott a szakirodalomban minimálisan, hogy megbízható eredményt kapjunk.
- A kimenetek közül a fűtési energiaigény lett kiválasztva, amire a bemeneti változók hatásait vizsgáltam.

A számítási környezet sajátosságait az alábbi pontokban fogalmazhatóak meg:

- Az általános módszerek az 1. oldalú hiperkockát veszik figyelembe.
- A keresési teret a szimulációk, azaz a bemeneti adatok és a kimeneti eredmények határozzák meg.
- Néhány változónak két értéke van, néhánynak 5 vagy több értéke.
- A mintavételi mátrixon belül vannak szimulációs eredmények nélküli elemek/esetek;
- Továbbá nincs matematikai függvény a kimenet közvetlen kiszámításához - a kimenet nem mindig áll rendelkezésre.



35. ábra: a hiperkocka és a trajektóriák [120]

Javasolt megoldási keretrendszer az a Morris-féle mintavételi módszert vette figyelembe [141]. A megvalósult adatbázis segítségével egy globális Morris mintavételi módszerű érzékenység vizsgálatot végeztem el, a tervezési változók és a kimeneti változók (komfort és energetikai eredmények) közötti összefüggések feltérképezése céljából. Az érzékenységvizsgálatot az épület fűtési energiaigény célfüggvényére végeztem el, mert az épületek összes energiaigényének domináns, átlagosan 80%-át képezte.

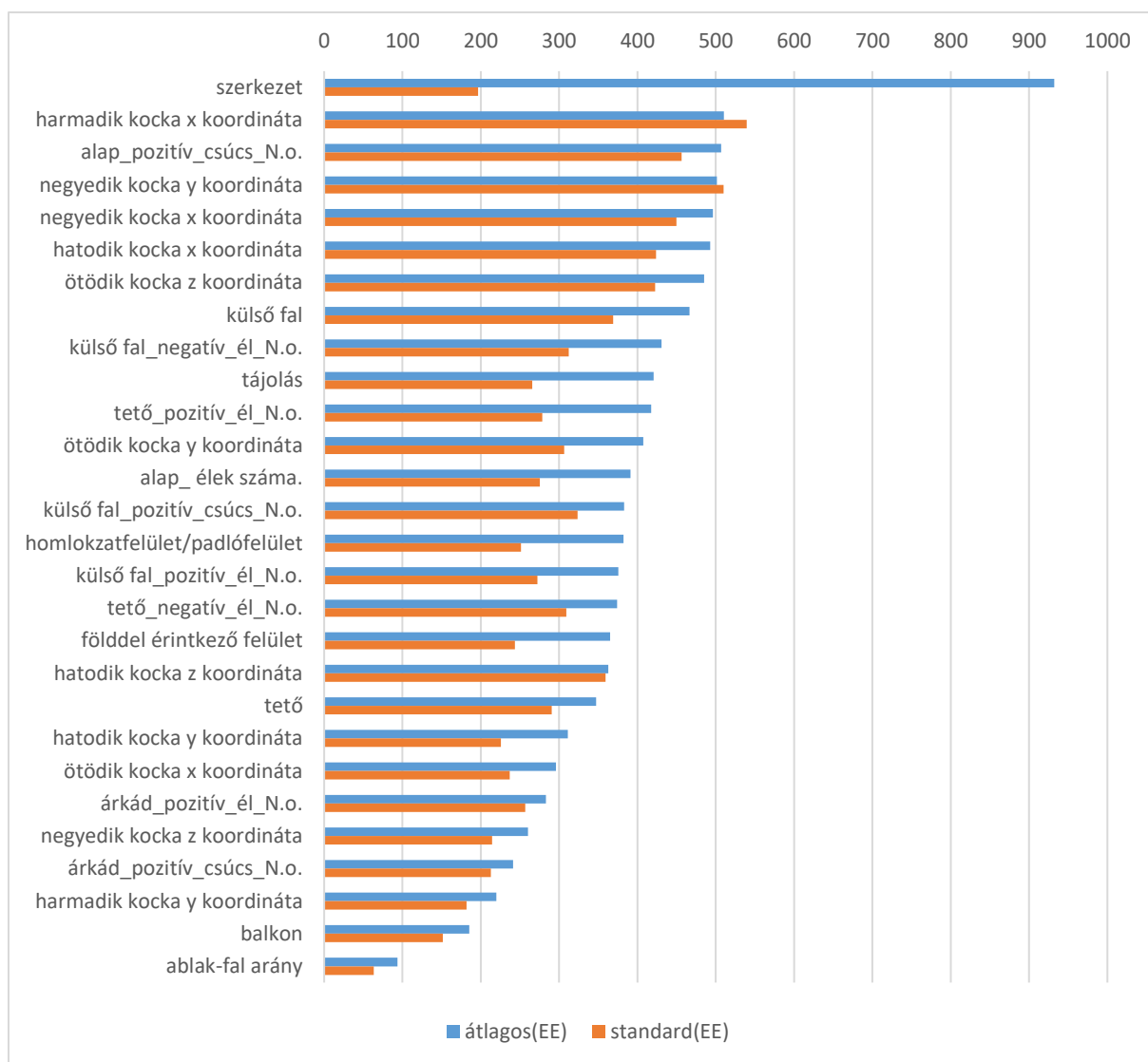
A szimulációk adatmátrixát normalizáltam. A szimulációk normalizált diszkrét értékeit egy függvény diszkrét értékeinek tekintettem a (0,1) intervallumon. A Morris-mintákat generáltam. A Morris-minták egy sora a pálya egy pontja. Más szóval, ez egy szimulációs esetnek tekinthető, azonban nem biztos, hogy már rendelkezésre áll. Az adott Morris-mintához tartozó kimeneti érték meghatározásához egy diszkrétizált távolságmérőt vettem figyelembe. Fontos megjegyezni, hogy építészeti példákban a Morris-módszert általában folytonos változókat vizsgál, ahol a távolságprobléma kezelése lényegesen egyszerűbb.

A Morris-minta minden egyes sorára kiszámítottam annak távolságát minden szimulációs esettől. Az n minimális távolság átlagát vettem figyelembe, és ezt az átlagértéket adtuk meg a Morris mintaeset kimeneti értékének (36. ábra). A továbbiakban a kimeneti modellnél $n = 20$ -at veszem figyelembe. A 6-os felosztású rácson 20 pályát vettem figyelembe.

$$\mu = \sum_{i=1}^r |EE_i|/r$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^r |EE_i - \mu|^2/r}$$

36. ábra: Egy input hatását jellemző érték szórásának a számítása [120]



37. ábra: Az érzékenység vizsgálat eredményei

A érzékenység vizsgálat eredményei azt mutatták, hogy a tájolás és a geometria esetén általánosan a geometria bír nagyobb hatással (37. ábra).

Az épületszerkezet, mint bemenő paraméter rendelkezik a legmagasabb hatással (932.2 átlagos EE) a kimeneti paraméterre, melyet közvetlenül a geometriát leíró paraméterek követnek (koordináták, élek, sarkok, falak 510.38-430.88 átlagos EE). A tájolás és az üvegezési arány ezeknél alacsonyabb hatással rendelkezik (420.77 ill. 93.52 átlagos EE).

A szerkezet a legfontosabb, de ez nem tekinthető hitelesnek az adatbázis összeállítása miatt, vagyis csak két féle szerkezeti összetétel érvényes az épületmodellek esetében.

Így igazoltam a geometria meghatározó szerepét az érzékenység vizsgálatával. Kijelenthető, hogy a tervezési (input) változók között a szerkezetek mellett a geometriai paramétereknek van a legnagyobb hatása az energetikai eredményekre. Tekintettel arra, hogy a passzív tervezési elvek érvényesítése folyamán közel 80%-os energiamegtakarítás lehetséges [3], [4], [5], az épület tömegformálása stratégiai jelentőségű az optimalizáló módszertanban.

6. Többváltozós lineáris regresszió alkalmazhatósága az épületfizikai optimalizálásban

6.1. Bevezetés

A fejezet a többváltozós lineáris regresszió alkalmazhatóságát is vizsgálja épület optimalizációs feladatok megoldásának támogatására. A vizsgálat során épülettervek várható éves fűtési energiaigényének becslésére készültek többváltozós lineáris regressziós modellek és vizsgálatok azok pontosságára ismert is ismeretlen adatokon. A vizsgálatok között a modelleket úgy módosítottuk, hogy a komplexitást csak annyira növeltük, hogy a közelítés megfelelően pontos legyen. A végeredmény egy olyan, többváltozós lineáris modell lett, amely az ismeretlen leíró változókhoz tartozó elvárt kimenetet 0%-os relatív hibával és 1,6%-os szórással becsülte. A becslések R^2 pontja 0,9884 volt. Ezek alapján a modellt a tanító mintákkal meghatározott keresési térben alkalmazhatónak ítéltük.

A lineáris regresszió egy széles körben elfogadott és alkalmazott matematikai megközelítés/módszer, amely arról ismert, hogy alkalmas nagy adatbázisok elemzésére a független és függő változók közötti kapcsolatok tekintetében.

A tervezési változók közötti összetett összefüggések vagy kapcsolatok nem írhatók le egy egyszerű, átlagátlagon alapuló súlyozott sorrendű rendszerrel. Előfordulhat azonos érték, és az azonos értékek sorrendje nincs megfelelően megállapítva, vagy közel azonos értékek azonos pontszámot kaphatnak. Az eltérő energetikai vagy komfort pontszám-összetételű esetek is adhatnak azonos összesített pontszámot.

A fentiek alapján megállapítható, hogy egy ilyen tulajdonságokkal rendelkező adatbázis összefüggéseinek megállapításához olyan módszerre van szükség, amelyhez matematikailag bizonyított, már jól megalapozott irodalommal rendelkező érzékenységvizsgálat kapcsolható.

Az egyik első célunk az volt, hogy a regressziós modellt a képzési minták által meghatározott keresési térben alkalmazzuk.

6.2. Alapadatok és peremfeltételek

Az adatbázis létrehozása elengedhetetlen a bemeneti és kimeneti paraméterek kapcsolatával kapcsolatos megfeleltetések és azok határértékeinek felfedezéséhez. Ez a regressziós modell kifejlesztésében is döntő fontosságú.

167 geometriai konfigurációt generáltunk különböző építészeti szabályok alapján egy koordinátarendszerben, moduláris zónarendszert használva. Ezeket a konfigurációkat úgy alakítottam át épület esetekké, hogy minden egyes konfigurációra több különböző szerkezetet, fal-ablak arányt és tájolást alkalmaztam.

Az épületek időfüggő napfény-, komfort- és energiaviselkedéséről részletes, komplex elemzést lehet szolgáltatni éves, órás felbontásban, dinamikus termikus szimulációs számítások segítségével, a helyi éghajlati viszonyok figyelembevételével. A számítási motort az IDA ICE 4.8 beltéri klíma és energia dinamikus termikus szimulációs szoftver szolgáltatta. Az IDA ICE képes a különböző szabványok figyelembevételével magas szintű vizuális megjelenítésre és utófeldolgozásra.

A hipotézis felállításához és a modell létrehozásához 5010 szimulációs mintát hoztunk létre az IDA ICE dinamikus termikus szimulációs programmal, amely képes részletes kimeneti változók és energetikai és komfort eredmények előállítására.

A termikus szimulációk során figyelembe vettük a helyszín földrajzi elhelyezkedését és a helyi éghajlati viszonyokat (ASHRAE IWEC2 Climate Database). A mesterséges megvilágítást, a berendezéseket és a lakókat a tipikus egycsaládos házak szabványos használatának megfelelően modelleztük. A belső tér és a fűtési központi rendszer hőátadó rendszerét megfelelő teljesítménnyel méreteztem. A légkezelő egység (AHU) rendszere szabályos, kielégítő légcserre (ACH) értékeket biztosít. Az 5010 épületes esetek szimulációira ugyanazokat a peremfeltételeket alkalmaztam; éghajlati és helyzeti adatok, szerkezetek, HVAC és üzemeltetési beállítások. A szimulációk egyik célja a fűtési, hűtési és mesterséges világítási energiaigény, valamint a hő- és napfénykomfort részletes összehasonlító elemzése. Az azonos peremfeltételek és beállítások alapján az eltérő épületforma, szerkezetek, ablak-fal arány (WWR) és tájolás hatásai miatt az energia és komfort eredményekben különbségek várhatóak.

Tizennégy kiegészítő tervezési paramétert különböztettem meg, amelyek lehetővé tették az eredmények és a bemeneti paraméterek közötti közvetlenebb kapcsolatot, és számos független változót biztosítottak a lineáris regressziós modellhez.

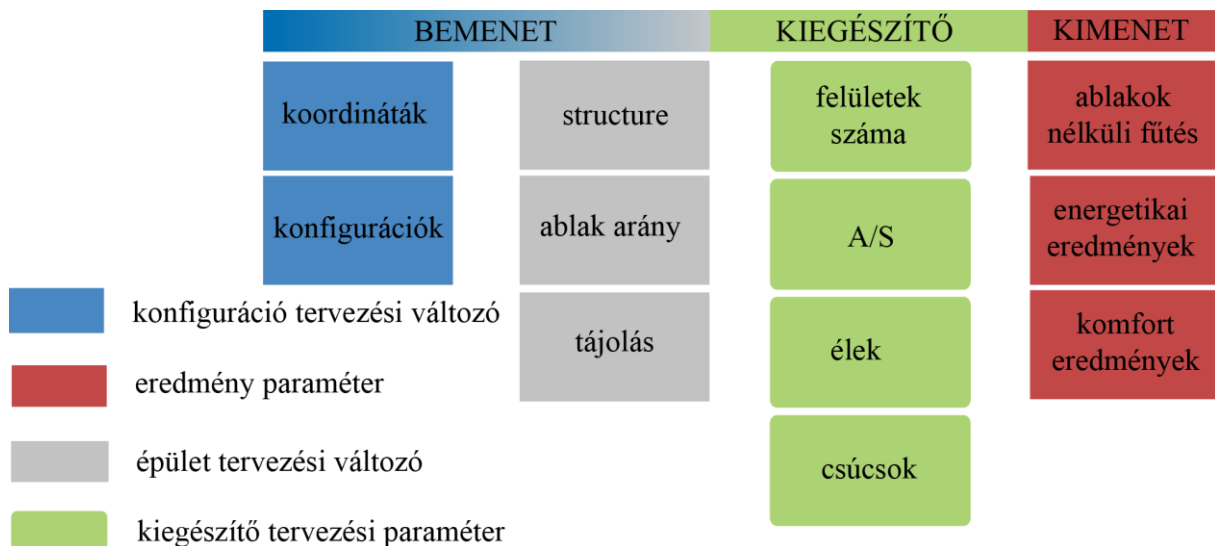
A koordinátákat építészeti szempontból nehéz kódolni, és sok hasonló, ismétlődő adatot tartalmaznak. Ahhoz, hogy ezeket a geometriákat numerikusan megkülönböztessük, nem a koordináták csúcspontjait használva, élek kerültek a rendszerbe. Így lehetővé vált az érzékenységvizsgálat eredményeinek validálása a kimenetnek a bemenetre való visszavezetésével.

6.3. Az épületgeometria leíró változói épületgeometriai tervezési változók:

Az épület geometriák generálása után számos, a geometriával kapcsolatos leíró kiegészítő paraméter teszi lehetővé a szimulációs esetek azonosítását, és ezek a paraméterek növelik a lineáris regressziós modellek pontosságát. (38. ábra, 2. táblázat)

2. Táblázat: Épületgeometriát leíró paraméterek és kimenő változók (szimulációs eredmények).

A paraméter neve	Magyarázat	Csoport	Típus	
szerkezet	különféle	építési eset paramétere	bemeneti változó (független)	
ablak-fal arány	százalék			
tájolás	szög			
g	földdel érintkező felület	felületek	Egy 14 elemből álló egyszerű kiegészítő leíráskészlet	
r	tető			
b	balkon			
w	külső fal			
a	árkád (levegővel határos földém)			
g él	alap_ élek száma.			élek
r pozitív él	tető_pozitív_él_N.o.			
r negatív él	tető_negatív_él_N.o.			
a pozitív él	külső fal_pozitív_él_N.o.			
a negatív él	külső fal_negatív_él_N.o.			
árkád pozitív él	árkád_pozitív_él_N.o.			
g pozitív csúcs	alap_pozitív_csúcs_N.o.	csúcsok		
a pozitív csúcs	külső fal_pozitív_csúcs_N.o.			
árkád pozitív csúcs	árkád_pozitív_csúcs_N.o.			
a_per_s	homlokzatfelület/padlófelület	együttható	komplex geometriai leíró: A / S	
nincs ablak fűtés	[kWh/a]	konfiguráció szimuláció	kimeneti változó (függő)	
fűtési energia igény	[kWh/a]			
hűtési energia igény	[kWh/a]			
világítási energia igény	[kWh/a]	energetikai eredmények		
PMV	Hőkomfort-kategória II időarány [%]			komfort eredmények
nappali megvilágítottság	>500lx időarány [%]			
nappali fény tényező	>1,7 területi arány [%]			



38. ábra: A különböző szimulációs és regressziós modellek összetevőinek kategorizálása

Jelen fejezet esetében a függő változó (kimeneti változó) az adott épületmodellre becsült éves fűtési energiaigény (bemeneti változó).

Minél kisebb az Aenv/Stot érték, annál nagyobb az épületgeometria energiahatékonysága. A 167 épületgeometria elemzésével 17 azonos Aenv/Stot geometriacsoportot lehetett azonosítani, mivel számos geometria-változat rendelkezik mind azonos épületburkolati hőveszteséggel járó felülettel, mind fűtött padlófelülettel. Ezért az Aenv/Stot nem alkalmas az épületgeometriák azonosítására, ezért nem használható részletes regressziós modellekhez.

Mindig figyelembe kell venni, hogy az adott paraméterek különböző mértékű eloszlása 5010-nél szóródik, azaz a tájolás minden ötödik eredménynél előfordul, de egy adott szerkezeti összetétel csak minden második eredménynél.

Ezeket a hatásokat felülírják a változók közötti eltérő kapcsolatok. pl: A nyílászáró arányoknak nincs értelme orientáció nélkül, az A/S is tartalmazza a konfigurációk összes összetevőjét és azok fűtésre gyakorolt hatását egy bizonyos fokig.

6.4. Gépi tanulás

A gépi tanulás egy szemléletes, formalizálható meghatározása szerint annak alkalmazása során egy adott feladatosztályba tartozó feladat hatékonyságát igyekszünk javítani a feladatosztály más feladatainak megoldásával szerzett tapasztalat felhasználásával. Tehát a gépi tanuló eljárás felhasználásához az alábbiakra van szükségünk:

- a feladatosztály meghatározása – az éves energiaigény becslése épület tulajdonságok alapján
- a feladatosztály feladatainak megoldásából származó tapasztalat – IDA ICE szimulációs szoftverrel készített, környezeti statisztikai alapú becsléseket alkalmazó, analitikus elven működő energiaigény szimulációk
- hatékonyság mérés – a vizsgálatokban négyzetes és abszolút eltéréseket vizsgálunk

Ezek felhasználásával igyekszünk olyan hipotézist felállítani, amelyre épített gyakorlati modellünk a feladatosztály még megoldatlan feladatait elfogadható hatékonysággal oldja meg.

A megoldási hatékonyság méréséhez és a teljesítmény értékeléséhez a megszerzett tapasztalatunkat két részre bontjuk. A nagyobb részt, 75%-ot a modell kialakítására, tanítására használjuk, míg a fennmaradó 25% tapasztalaton keresztül a kialakított modell hatékonyságát mérjük, teszteljük, hiszen össze tudjuk hasonlítani a modell által készített becslést a már ismert, így elvárt kimenettel. Először a tanító mintákra adott becslések alapján állítjuk be a modellünk paramétereit, majd a modell számára még ismeretlen tesztelő minták becslési hibája alapján fogadjuk vagy utasítjuk el hipotézist és az az alapján kialakított modellt.

A modell kialakítására jelen vizsgálatban lineáris regressziót alkalmazunk, melynek előnye a gyors és egyszerű felhasználhatóság, hátránya pedig a lineáris közelítés, amellyel a későbbiekben részletesen foglalkozunk.

6.5. Lineáris regresszió

A regresszió számítás egy gyakran használt statisztikai eljárás, melynek során azt igyekszünk meghatározni, hogy egy függő változó milyen módon függ a leíró vagy magyarázó változóktól.

A lineáris regresszió [6] az általános regressziószámítás speciális esete, amikor a függő változó a leíró változók lineáris kombinációjaként, az 1. képletben bemutatott módon, elsőrendű Taylor-sorral áll elő.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad 1. \text{ képlet}$$

$$h(x) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_n x_n \quad 2. \text{ képlet}$$

$$\varepsilon = y - h(x) \quad 3. \text{ képlet}$$

ahol y a függő változó, $x_1 \dots x_n$ a leíró változók, $\beta_0 \dots \beta_n$ a lineáris regressziós modell paraméterei, $h(x)$ a lineáris regresszió hipotézis függvénye, ε pedig a lineáris regresszió közelítési hibája.

6.6. Hipotézis

A 2. képletben bemutatott hipotézisünk szerint található olyan $\beta_0 \dots \beta_n$ paraméter gyűjtemény, amely felhasználásával készített lineáris regressziós modell 3. képletben leírt hibája egy szakértők által is elfogadható küszöb alatt marad.

A paraméterek meghatározásához a legkisebb négyzetek analitikus módszerét[7] alkalmazzuk.

6.7. Modell kialakítás

Többváltozós lineáris regressziós modell kialakításakor feltételezzük, hogy a függő változót több (m darab) leíró változó határozza meg.

Ekkor a leíró változók egyes megfigyelésekhez tartozó értékeit egy

$$X_o = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

mátrixba gyűjthetjük, ahol n a megfigyelések, m pedig a leíró változók száma, így a mátrix x_{ij} eleme az i -edik megfigyelés j -edik leíró változóját jelenti.

A függő változó egyes megfigyelésekhez tartozó értékei és a 2. képlet β paraméterei is egy-egy oszlopvektorba gyűjthetők.

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \text{és} \quad \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \vdots \\ \beta_m \end{bmatrix}$$

Ahol y_i az i -edik megfigyelés függő változója, β_j a j -edik leíró változó együtthatója. Vegyük észre, hogy az x mátrix első oszlopindexe 1, míg a β vektoré első sorindexe 0. A 2. képletben felhasznált konstans paraméter (β_0) leíró változókkal azonos kezeléséhez bővítjük a leíró adatokat egy konstans leíróval, az X_0 mátrixot egy konstans 1-eket tartalmazó oszloppal.

$$X = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & x_{11} & \dots & x_{1m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{1} & x_{n1} & \dots & x_{nm} \end{bmatrix}$$

A fenti jelölés felhasználásával a lineáris regressziós modell mátrix formába írható:

$$y = X\beta + \varepsilon \quad \text{4. képlet}$$

ahol ε az egyes megfigyelések lineáris regressziójának közelítési hibáiból összeállított oszlopvektor, melynek ε_i eleme az i -edik megfigyelés közelítési hibája található.

A β paraméter vektor meghatározásához, ahogy korábban említettük, az m ismeretlenes lineáris egyenletrendszer a legkisebb négyzetek módszerével oldjuk meg. Ekkor a paraméter vektort az 5. képletben leírtak alapján kapjuk.

$$\tilde{\beta} = (X'X)^{-1}X'y \quad \text{5. képlet}$$

A paraméter vektor felhasználásával a lineáris regressziós modellünk becslése

$$\tilde{y} = X\tilde{\beta} \quad \text{6. képlet}$$

A lineáris regressziós közelítés abszolút hibája pedig

$$\varepsilon_a = y - \tilde{y} \quad \text{7. képlet}$$

6.8. Modell értékelése

A modellünk teljesítményének értékelésére az egyes megfigyelések közelítési hibájából számított egyetlen értékre van szükségünk. Ezért a statisztikában és a regresszió analízisben széles körben alkalmazott, 8. képletben bemutatott R^2 pont[128]metrikát használjuk.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(y - \tilde{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2} \quad \text{8. képlet}$$

Az R^2 mérték szerint elérhető legjobb eredmény az 1, az alacsonyabb értékek rosszabb teljesítményt jelentenek és elérhető negatív érték is.

A modellek értékelésére alkalmazzuk még a 7. képletben bemutatott abszolút hibát, valamint a becsült érték arányában kifejezett, vagyis a 9. képletben bemutatott relatív hibát.

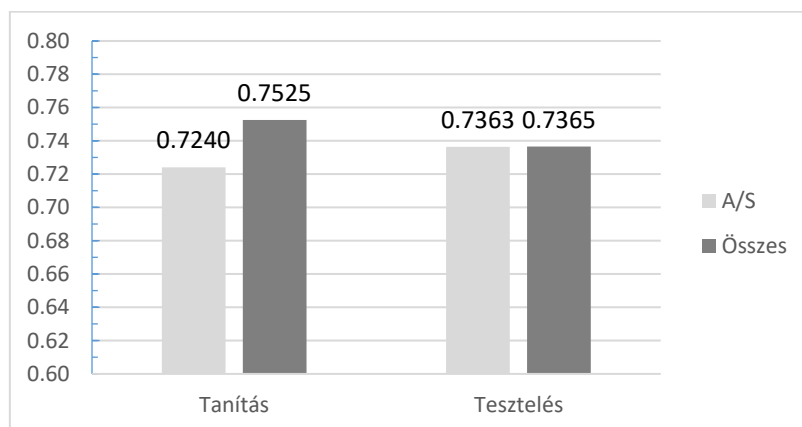
$$\varepsilon_r = \frac{(y - \tilde{y})}{y} \quad 9. \text{ képlet}$$

6.9. Közelítési eredmények

A hipotézis vizsgálata során a modell felállításához elvégzett 5010 megfigyelés 75%-át, 3757 mintát, míg a hatékonyság független teszteléséhez a fennmaradó 25%-ot, 1253 mintát használtunk. A választás véletlen jelleggel, pszeudo-random generálással történt. Amennyiben a tanító és tesztelő eredmények eltérnének, a modell vagy a mintaválasztási eljárás felülvizsgálatra szorulna.

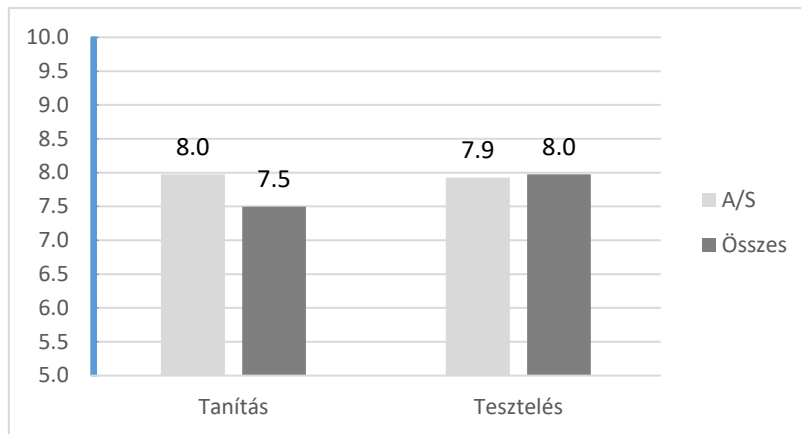
A vizsgálat első lépésében a teljes megfigyelés halmazt felhasználjuk a modell megalkotásához és ellenőrzéséhez egyaránt. A vizsgált első esetben leíró változóként a komplex szakmai leíró A/S értéket használtuk, második esetben pedig a szakértők által, az objektum geometriából leszámolt 14 egyszerű leíró értéket.

Az 39. ábrán bemutatott R^2 pont értékek a komplex leíró esetében 0.7273, az egyszerű leírók esetében 0.7489 volt. Mindkét érték messze elmarad a legjobb 1-es értéktől.



39. ábra: Elsőfokú lineáris regresszió R^2 pont értékei

A hibafüggvények eloszlását D'Agostino K^2 teszttel [142] és Anderson-Darling [143] teszttel vizsgálva kijelenthető, hogy az elsőfokú közelítések során keletkező abszolút hibafüggvények nem, azonban a relatív hibafüggvények normális eloszlású valószínűségi változóknak tekinthetők. Ezért vizsgálható a relatív hibák átlaga és szórása. Ezt felhasználva megállapítható, hogy ugyan ez elsőfokú közelítések relatív hibájának átlaga 1% alatt van, azonban a szórásuk 8%. Bár az abszolút hiba nem normális eloszlású, ezért a közelítés pontosságáról nincs részletes információ, azonban érdemes megjegyezni, hogy az abszolút közelítési hiba átlagának abszolút értéke nem érte el az 1.0 [kWh/év] értéket (40. ábra).



40. ábra: Elsőfokú lineáris regresszió abszolút hiba szórásai

A fentiek alapján levonható az a következtetés, hogy a szimulációs függvény a kezdeti, független bemeneti változók lineáris kombinációjaként nem közelíthető megfelelően, hiszen a relatív hiba szórása 8%. A normális eloszlás karakterisztikája alapján a becslések több mint 30%-ának relatív hibája 2 és 3 σ távolságra, vagyis 16-24% közé várható, így a modell jelen formájában alkalmatlan szimuláció helyettesítésére és további következtetések levonására.

6.10. Nemlineáris regresszió

Ahogy az előző fejezetben bemutattuk, az éves fűtési energia becslés lineáris közelítése csak nagy hibával lehetséges. Szükséges lenne tehát egy nemlineáris közelítő eljárás alkalmazása. Nemlineárisnak tekinthető minden olyan eljárás, amely nem tartozik a lineáris modellek közé, pl. logaritmikus, exponenciális, trigonometrikus stb. A nemlineáris regresszió részét képezi a leíró változók alkalmazandó nemlineáris függvényének meghatározása, kiválasztása is. Az általunk alkalmazott eljárás nemlineáris közelítő polinomjában a leíró változók magasabb fokszámú változatait is felhasználja. Az ilyen típusú közelítést polinomiális regresszióknak [144] is nevezik. Az eljárás alkalmazásának nehézségét az adja, hogy a modellalkotásnak része a leíró változók nemlinearitásának, vagy azok megfelelő szorzat kombinációjának meghatározása is. Azonban, ha visszatekintünk a lineáris regresszió meghatározására, akkor láthatjuk, hogy nem tartalmazott megkötetést a használt leíró változók függőségére vonatkozóan. Vagyis, ha szétválasztjuk a fenti polinomiális regressziós megoldást a polinom tagok fokának, valamint azok együtthatóinak meghatározására, valamint elfogadjuk a modellünk komplexitásának exponenciális növekedését, ezáltal az analitikus megoldás számítási idejének növekedését, akkor a leíró változók legfeljebb második (esetleg harmadik) hatványú kombinációinak kézi hozzáadása után a feladat a többváltozós lineáris regresszió megoldására egyszerűsödik.

6.11. Eredmények

6.11.1. Közelítési pontosság

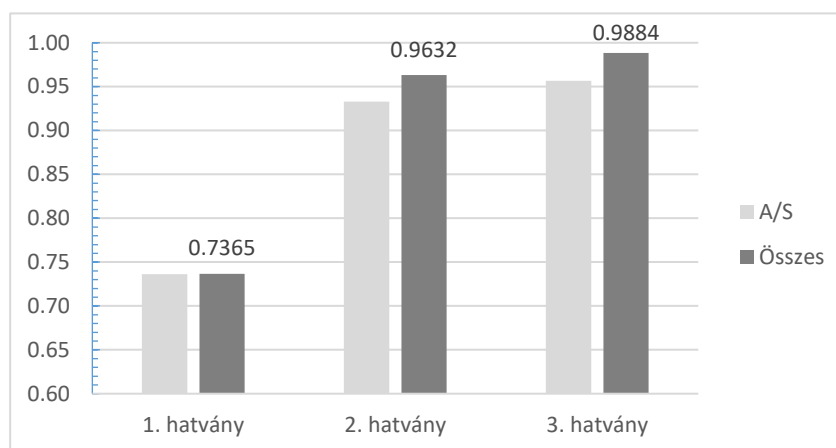
A közelítések pontosságát a 8. képletben bemutatott R^2 mértékkel mérve az 3. táblázatban olvasható teljesítményeket kaptuk. Ez alapján kijelenthető, hogy a szakmai leírókból készített harmadik hatványú tagok lineáris kombinációjaként előálló modellek közelítése a legjobb. Azok közül is a komplex A/S geometria leíró alapuló modell teljesítménye 0.9567 pont, míg

az összes egyszerű leíró magába foglaló modell hatékonysága ennél is jobb, a modell számára ismeretlen adatokon mérve 0.9884.

	A/S		Összes	
	Tanítás	Teszt	Tanítás	Teszt
1. hatvány	0,7240	0,7363	0,7525	0,7365
2. hatvány	0,9311	0,9329	0,9623	0,9632
3. hatvány	0,95244	0,9567	0,9899	0,9884

3. táblázat: Lineáris regressziós modellek közelítésének R^2 pontja

A modellek számára ismeretlen (tesztelő) mintákon mért közelítési pontosságokat a 41. ábra szemlélteti.



41. ábra: Magasabb fokú lineáris regressziók R^2 pont értékei

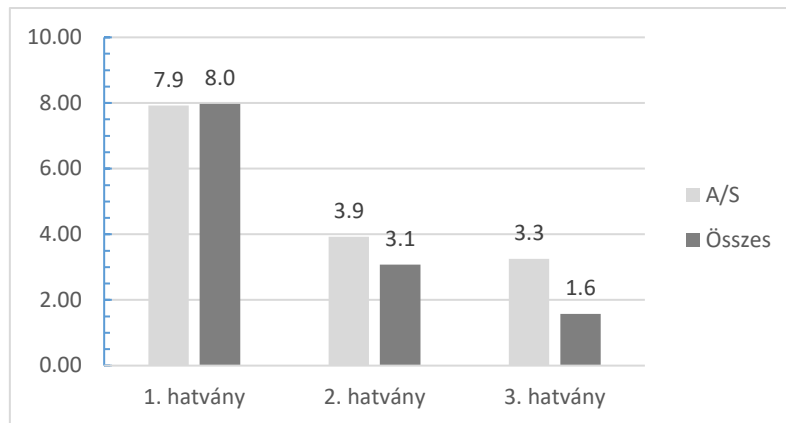
A magasabb fokú hibafüggvények eloszlását is megvizsgálva kijelenthető, hogy az elsőfokú közelítéshez hasonlóan a magasabb fokú közelítések során keletkező abszolút hibafüggvények nem, azonban a relatív hibafüggvények normális eloszlású valószínűségi változóknak tekinthetők. Így vizsgálható azok átlaga, szórása és hisztogramja is.

A modell számára ismeretlen (tesztelő) mintákon mért közelítési varianciákat a 4. táblázat tartalmazza.

[%]	A/S	Összes
1. hatvány	7,9	8,0
2. hatvány	3,9	3,1
3. hatvány	3,3	1,6

4. táblázat: Magasabb fokú lineáris regressziós modellek közelítési szórásai

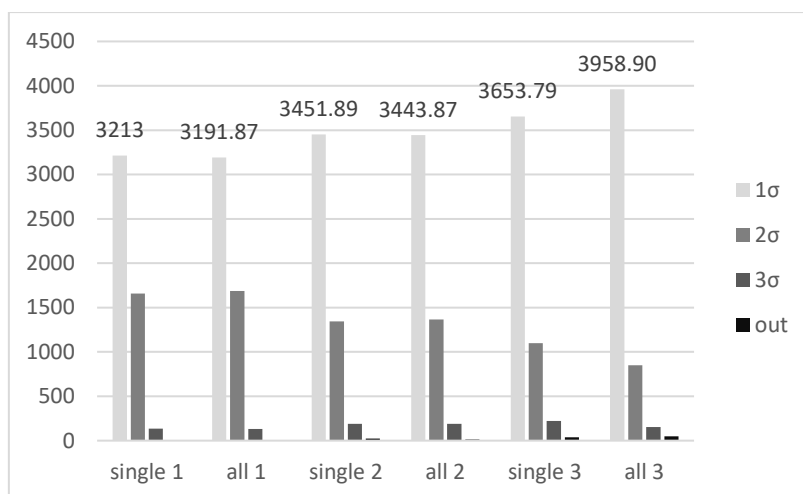
A modellek számára ismeretlen mintákon mért közelítési szórásokat és arányukat a 42. ábra szemlélteti.



42. ábra: Magasabb fokú lineáris regressziók közelítési szórásai

A táblázatokból kiolvasható, hogy az összes egyszerű leíró alkalmazó harmadfokú modell tesztelésekor számított R^2 pont 0,9884, míg a közelítés szórása 1,6%. Ezért valószínű, hogy a modell a normális eloszlásra érvényes 3σ szabály értelmében az adatok 68%-át kevesebb 1,6%, míg az adatok 99%-át kevesebb mint 4,8% relatív hibával fogja közelíteni.

Ezt közelíti az 43. ábra is, ahol a lineáris regressziós modellekkel végzett tesztelő becslések relatív hiba abszolút értékek szórás távolságok szerinti eloszlásának hisztogramja látható. Százalékosan kifejezve a választott modellel legfeljebb 1σ hibával becsült pontok aránya 76.5%, a 3σ -nál nagyobb relatív hibájú becslések aránya pedig 0.9%-volt.

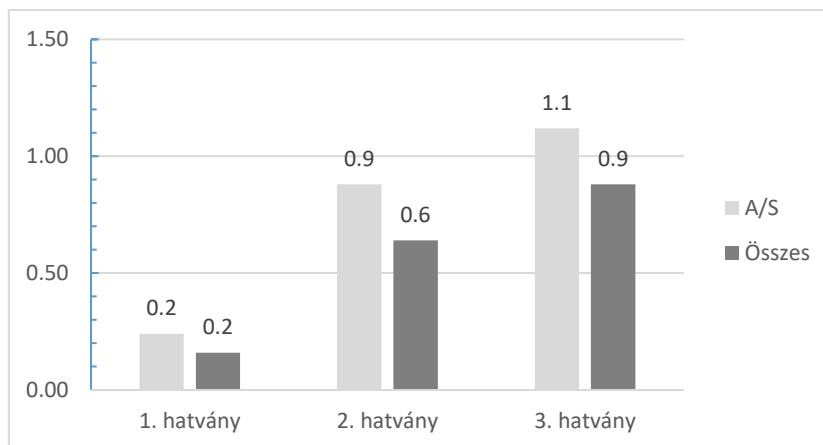


43. ábra: Magasabb fokú lineáris regressziók szóráshoz viszonyított hisztogramja

A hisztogramok az elvégzett normalitás tesztekkel összhangban illeszkednek a Gauss-görbe abszolút értékeinek hisztogramjára. A 3σ tartományon kívüli pontokkal a következő fejezetben részletesen foglalkozunk.

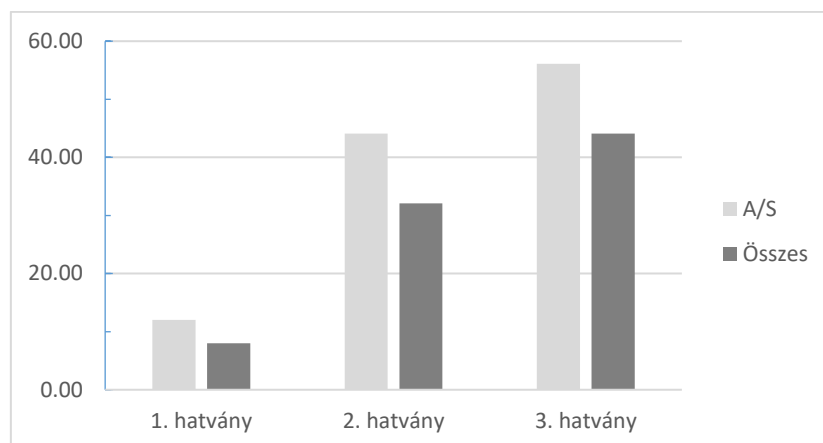
6.12. Anomáliapontok vizsgálata

A normális eloszlás várható értékétől 3 szórásnyinál távolabbi adatpontok a normális eloszlás viselkedése alapján 0.3%-ban még elfogadhatónak tekinthetők. Azonban a 44. ábráról leolvasható, hogy a leíró változók 2. és 3. hatványának alkalmazásakor ez az érték megközelítette az 1%-ot.



44. ábra: Magasabb fokú lineáris regressziók anomália pontjainak aránya [%]

Ennek oka a modellvizsgálatra felhasznált, a modell számára még ismeretlen (teszt) adatokra történő kis mértékben pontatlanabb illeszkedés ezért az adat nem rontja a modell elfogadhatóságát. Azonban az ilyen adatpontok anomáliapontként történő további szakértői elemzése segíthet a leíró változók minőségének építész-épületgépész szakértői javításában.



45. ábra: Magasabb fokú lineáris regressziók anomália pontjainak számai [db]

A 45. ábrán látható, hogy a harmadfokú modell alkalmazása esetén a vizsgálandó pontok száma alig 40 fölötti, így a szakértői elemzésük erőforrás szükséglete könnyen biztosítható.

6.12.1. Lineáris regressziós együtthatók vizsgálata

Az elsőfokú modell alkalmazása esetén a bemenő változók regressziós modell által meghatározott együtthatói tekinthetők érzékenységi mutatóknak is. Ezek alapján azt állapítottuk meg, hogy komplex geometria leíró (A/S) esetén a legnagyobb hatása a geometriának, van, míg második helyen a szigetelési struktúra áll. Több, egyszerű geometria leíró alkalmazása esetén a sorrend megfordul, hiszen a geometria tulajdonságokat több, kisebb entrópiával rendelkező változó kódolja. Az együtthatók elemzése során mindkét esetben legkisebb jelentősége a falak ablakozási százalékának volt.

A magasabb fokszámú közelítési modellekben a magasabb fokú leíró változók, illetve azok szorzatai szakértői szempontból nehezen értelmezhetők, ezért azok elemzése túlmutat jelen munka határain.

6.13. Következtetés

Az eredmények vizsgálata és értelmezése alapján kijelenthető, hogy az összes egyszerű leíró alkalmazó 3-adszoros lineáris regressziós modell alkalmas lehet szimulációs adatok közelítő meghatározására, hiszen a közelítési pontosság az alkalmazott R^2 mértékkel mérve 0,9884 pontot ért el, valamint a relatív becslési hiba várható értéke a teljes mintatér 99,7%-ára 5% alatt marad.

Azonban fontos kijelenteni, hogy a közelítési vizsgálatot a leíró változók ismert értékei által kifizített diszkrét keresési térben végeztük el. A keresési tér további diszkrét értékekkel történő bővítése, folytonossá tétele, vagy dimenziójának növelése az illesztési hatékonyság további vizsgálatát, szükség esetén a modell módosítását igényli.

6.14. Továbbfejlesztés

A leíró változók számának fentebbe említett okokból történő növekedése a modell komplexitásának exponenciális növekedését eredményezheti, ezért a leíró változók optimális megválasztását támogató előfeldolgozás vállhat szükségessé.

Az elkészített modellek felhasználása tetszőleges leíró változók fűtési energiaigény-szimulációjára felveti egy olyan rendszerkomponens létrehozásának igényét is, amely a tetszőlegesen változtatható leíró változók által meghatározott épületgeometria validációját végzi el.

A regressziós modellek lehetővé tehetik a képzési/tanítási minták és a neurális hálózatok felhasználását. A pontos helyettesítő modellek alapján többcélú optimalizációs algoritmusok használhatók.

7. Végző következtetések, összefoglalás

A különböző építészeti szabályok és további szimulációs illetve kiértékelési módszerekhez, érzékenységvizsgálatokhoz kapcsolódó peremfeltételek meghatározása lehetővé teszi, hogy az adott feltételeknek megfelelő körülmények között megtaláljuk a garantáltan optimális épület esetet, eseteket.

Az eddigi kutatások segítségével egyre részletesebben sikerült feltérképezni az épületfizikai teljesítményt befolyásoló tényezők hatásmechanizmusait, fókuszban a geometriai hatásokkal. Így lehetőségünk nyílik egy későbbi öntanuló folyamat elindítására, mely tökéletesíteni fogja remélhetőleg megfigyeléseinket.

A regressziós modellek lehetővé tehetik a képzési/tanítási minták és a neurális hálózatok felhasználását. A pontos helyettesítő modellek alapján többcélú optimalizációs algoritmusok használhatók.

Kitekintés

A kutatómunkám során vizsgáltam építészeti tervezési folyamat során az energetikai és komfort (és ökológiai) optimum garantálásának feltételeit. Cél egy optimális energia, komfort és környezettudatos épületet tervező módszer kidolgozása volt.

(További különböző méretű és funkciójú (télikert, garázs) modulok alkalmazása esetére is külön szabályrendszert hoztam létre.)

Ez a helyettesítő modell csak erre az adatbázisra érvényes értékek generálására alkalmas. Egy általános érvényű helyettesítő modell létrehozásához, a kellő léptékű tanító adatbázis létrehozásához, automatizált szimulációk elvégzésére van szükség.

Az eddigi eredmények alapján következő lépésben egy neurális hálózat megalkotása következik, mely egy lényegesen nagyobb egyedszámú keresési tér feldolgozására képes (5000 helyett 70.000 eset). A mesterséges intelligencia alapú predikciós modell segítségével nem csak az input változók alapján az outputokat meghatározása vált lehetségessé, hanem a kiinduló tervezési információk is kinyerhetőek lesznek az elvárt eredmények alapján.

A mesterséges neurális hálók alkalmazása megfelelő keretet biztosít arra, hogy egy későbbi optimalizációs módszer lényegesen gyorsabban számszerűsítse az eddigi adatokat, eredményeket, továbbá térképezze fel az épületfizikai teljesítményt befolyásoló tényezők hatásmechanizmusait, hogy ellenőrizhető legyen az optimalizációs algoritmus által generált optimális eset érvényessége. Ennek a folyamatnak a részeként valószínűsíthető az eddig meghatározott építészeti szabályrendszer pontosítása és felülbírálna a garantált optimális esetek biztosításaként.

Létrehoztam az automatizáláshoz szükséges szimulációs modelleket EnergyPlus és Radiance szimulációs motorok számára, ezzel biztosítva a kellő számosságú szimulációs esetet és eredményt a neurális hálós tesztek elvégzéséhez.

8. Eredmények

Új tudományos eredmények

A doktori munkám során létrehoztam az Energia Design Szintézis komfort és energetikai épület optimalizációs módszertan első mérföldkövét, mely tartalmazza a peremfeltételeknek megfelelő összes potenciális épület esetet, annak épületfizikai eredményeit (adatbázis) valamint stratégiai súllyal rendelkező tervezési változóit. Ezen kívül létrehoztam a komplex, nagy idő és számítási ráfordítást igénylő szimulációkat kiváltó regressziós helyettesítő modelleket.

1. Megalkottam az elengedhetetlen, a megfelelő mennyiségű és minőségű szabályokat annak érdekében, hogy az optimalizáció szempontjából garantáltan az összes potenciális épület geometria előállításra kerüljön. A szabályok egy startégiái fontosságú szűrő szerepét töltik be, mivel nélkülük a keresési tér egy kezelhetetlenül nagyszámú konfiguráció alternatívát tartalmaz.

Az összes potenciálisan megvalósítható épületkonfiguráció létrehozásához sikeresen létrehoztam egy építészeti szabályrendszert. A szabályok különböző építészeti tervezési szempontokat vesznek figyelembe: a tervezendő feladathoz illeszkedő reális tömegformálást (vízszintes és függőleges méretek és szintszám, térbeli kapcsolatok, egyes elemek funkciójukból adódó elhelyezkedése, a praktikus, használható terek), az energia fogyasztás szempontjából kedvező geometriákat részesíti előnyben. A szabályok kiegészítik és erősítik egymást. **Egy koordináta rendszer alapú moduláris rendszert határoztam meg, melyben könnyen elhelyezhetőek az azonos méretű elemek/kötegek, melyek egymás mellé rendezve képesek egy épület tömegformáját képezni. Egy modellezési példa keretein belül a feladat egy családi ház tömegformájának generálása volt.**

2. A kellő számú geometriai variáció előállításához egy "backtracking" elvű generáló algoritmusra volt szükség. A szükséges számú (5010) szimulációs épület modellek összeállítását, azok kellő számú geometriai variációja tette lehetővé. Az optimalizációs tervezési feladat szempontjából összes potenciális geometria konfigurációt matematikailag bizonyított módon állítottam elő. A geometriai konfigurációk algoritmikus generálása során az összes építészeti szabályoknak megfelelő konfiguráció azonosítható és nem több, nem kevesebb. Az összesen 167 különböző konfigurációt egy backtracking algoritmikus módszer alkalmazásával állítottam elő. A backtracking alapú módszer végezte az összes lehetséges modul kombináció lerakása után, a szabályok szerinti szűrést. A tükrözött és egymásnak megfeleltethető megoldásokat kizárta a generáló képlet. **A bemutatott módszer az összes lehetséges geometriai esetek számát (szabályoknak nem megfelelő esetek számát is tartalmazza) 99%-al csökkentette - összesen 167 konfigurációt generált.**
3. Épület eseteket definiáltam a generált geometriák alapján, különböző méretű ablakokat, tájolást és szerkezeteket alkalmazva, majd szimulációs modelleket hoztam létre az épület esetekből és a peremfeltételek és bemeneti változók meghatározása után végrehajtottam a szimulációs folyamatokat. Az ilyen módon létrehozott 5010 épületeset szimulációs eredményeit kiértékeltem, majd sorrendet állítottam fel az épületesetek között egy első ellenőrző lépéseként. Az épületesetek és szimulációs modellek számát a további érzékenységvizsgálat és helyettesítő modell kívánalmi indokolták. Az optimalizációs modellezés kulcsfontosságú eleme egy épületfizikai adatbázis létrehozása, mely az összes potenciális tervezendő épületeset komfort és energetikai teljesítményét tartalmazza. Az adatbázis célja többérett: épületfizikai elemzés és visszacsatolás a tervezésre, input paraméter érzékenységvizsgálat és helyettesítő meta-modell tanító adatbank létrehozása. Az épületesetek fűtési, hűtési és mesterséges megvilágítás energiaigényei illetve termikus és vizuális komfort mutatóit dinamikus, termikus szimulációk keretén belül számszerűsítettem. Az eredményekből egy flexibilisen, különböző megrendelői igény vagy kutatási szempont alapján változtatható súlyozási rendszer segítségével egy lehetséges sorrendet állítottam fel – egy első ellenőrzési lépésként. A szimulációk számának növelése nem változtatta meg az optimális modell esetét (1 fázis: 90 eset → 2. fázis: 5010 eset → 3. fázis: 70 000). **Az összes fontos kimeneti paraméter értékének ismerete azért volt elengedhetetlen, hogy az érzékenységvizsgálatot és regressziós modell tanító és ellenőrző adatbázisát előállítsam.**
4. A további vizsgálatok elvégzéséhez, kiegészítettem a bemenő paraméterek listáját ügyelve az érzékenység vizsgálatok kívánalmaira, hogy biztosan tartalmazzon minden fontos geometriai leíró paramétert és az egyes geometriák azonosíthatóak legyenek. A három bemenő geometriai paraméterek (üvegezési arány, tájolás, szerkezetek) listáját kiegészítettem további bemenő geometriai paraméterekkel 28-ra (modulegységek koordinátái, épületburok felületek, sarkok, élek). Érzékenységvizsgálat elvégzésére volt szükség, ahhoz hogy a vizsgált keresési térben kiválasztásra kerüljenek a legfontosabb bemeneti paraméterek. Ilyen módon ellenőrizni tudtam azt, hogy a geometriai konfigurációk szerepe meghatározó a kimenetek szempontjából. A tervezési (input) változók között a szerkezetek mellett a geometriai paramétereknek van a legnagyobb hatása az energetikai eredményekre. Tekintettel arra, hogy a passzív tervezési elvek érvényesítése folyamán nagymértékű energiamegtakarítás lehetséges, az épület tömegformálása stratégiai jelentőségű az optimalizáló módszertanban. A megvalósult

adatbázis segítségével egy globális érzékenységvizsgálatot végeztem el, a tervezési változók és a kimeneti változók (komfort és energetikai eredmények) közötti összefüggések feltérképezése céljából. Az érzékenységvizsgálatot az épület fűtési energiaigény célfüggvényére végeztem el, mert az épületek összes energiaigényének domináns részét képezte. **Kimutattam, hogy az épületszerkezet, mint bemenő paraméter rendelkezik a legmagasabb hatással a kimeneti paraméterre, melyet közvetlenül a geometriát leíró paraméterek követnek. A tájolás és az üvegezési arány ezeknél alacsonyabb hatással rendelkezik.**

5. Egy nagyszámú épületeseteket tartalmazó optimalizációs keresési tér bejárása folyamán a szimulációs modellezési és számítási ráfordítás kritikus mértéket ölt, ezért kulcsfontosságú szerepet tölt be a szimulációkat helyettesítő modellezéstechnika. Létrehoztam másod és harmadfokú lineáris regressziós modelleket, melyek képesek a szimulációs eredmények megfelelő pontosságú előrejelzésére. A helyettesítő modellek megfelelő pontosságú működéséhez, harmadfokú lineáris regressziós modell megalkotására volt szükség. **Megállapítottam az eredmények vizsgálata és értelmezése alapján, hogy az összes egyszerű leíró alkalmazó harmadfokú lineáris regressziós modell alkalmas szimulációs adatok közelítő meghatározására, hiszen a közelítési pontosság az alkalmazott R^2 mértékkel mérve közel 1 pontot ért el, valamint a relatív becslési hiba értéke építészeti szempontból hibahatáron belüli értéket mutatott.** A nagy számítási igénnyel rendelkező harmadfokú regresszió mellett a másod fokú modell egy lényegesen gazdaságosabb alternatívát nyújt a számításkapacitás szempontjából és közel azonos pontossággal bír.

9. Mellékletek

9.1. Táblázatok

A.függelék - BECED-kutatás, beleértve az épületforma módosítását az eseti változatok létrehozása érdekében (folytatás)

Ref No.	Év	Téma és eredmények	Célfüggvény	Épületgeometria tervezési változók	a) Algoritmus b) Szimulációs motor c) Keretrendszer / Módszer	Korlátozások
11	2001	14 különböző épületformát vizsgáltak az energiafogyasztással való kapcsolatuk szempontjából. Validálás laboratóriumi mérésekkel. A tömörség fontos a hideg éghajlaton, és kevésbé fontos az enyhe/meleg éghajlaton.	-	• SF	c) LUCIOLE	Hiányzik a matematikai optimalizálás.
50	2003	Két meghatározott formájú irodaházat vizsgálnak az energiafogyasztás minimalizálása és a beltéri komfort maximalizálása érdekében. Parametrikus vizsgálatok elemzik a passzív intézkedések és az NV, a napfény és a fal visszaverő hatását. Az épület geometriájának hatása a fűtési igényre meghatározó.	-	• SF • Termélység / épületszárny • GR, ORI, STR, TM, SHADE	b) TAS c) OPTI	Az eredmények nem alkalmazhatók bármelyik irodaházra. A fűtési igényekkel kapcsolatos SF csak a szakirodalomból idézett. Hiányzik a matematikai optimalizálás.
56	2005	Többszintes épület, amelyet minden emeletenként vizsgálnak a fűtési igény minimalizálása érdekében. Részletes épületburkolat-vizsgálat, tájolási forgatókönyvek 10 fokban. A legelőnyösebb SF 1:1 (négyzet). A fűtési energia szempontjából az 1:1 és 2:1 SF S ORI-vel a legjobban teljesít. A legmegfelelőbb ORI az 1:2 SF esetében az SW.	-	• SF • ORI, STR	c) Finite difference	Nincs újdonság az eredményekben. Hiányzik a matematikai optimalizálás.
51	2006	Egyszerűsített korrelációs (regresszióelemzési) eszközt javasolunk az épület alakjának a hűtésre és az irodaházak teljes éves energiafelhasználására gyakorolt hatásának értékelésére. Minél magasabb az RC, annál alacsonyabb a hűtési és a teljes energiaigény.	-	• Relatív tömörség • GR, STR	b) DOE-2 c) Custom	Egyszerűsített modellezés, nincs valódi optimalizálás, csak regressziós modellek és hatásvizsgálat.
12	2009	Irodatornyok (12 500 m ²) alaprajzi formájának hatása a hőteljesítményre. Négyyszögletes (referencia), L-, T-, kereszt-, H-, U- és vágott formákat vizsgáltak. Egyszerűsített korrelációs egyenletet dolgoztunk ki regresszióelemzés alapján bármelyik forma energiaigényének értékelésére, figyelembe véve a WWR, SHGC és RC értékeket. Ablakok nélkül, ha az RC nő, a hűtési energia csökken. Ablakokkal az RC még mindig dominál. Ez valójában nem az RC miatt van, hanem inkább a különböző geometriájú homlokzatok eltérő napsugárzása miatt. Az RC erősen befolyásolja a hűtést. A tájolásnak jelentős hatása van, függetlenül a formától. A geometria hatása az RC, a WWR és az üvegezés típusától függ.	-	• Relatív tömörség • Geometria generálás energiaértékeléssel • Fal hossza / területe • Termélység / épületszárny • Az elrendezés kerülete • GR, ORI, STR, TM, SHADE	b) DOE-2	Nem történik optimalizálás. Az alkalmazott 8 geometria a szokásos alapvető irodai blokkformákra korlátozódik, anélkül, hogy új geometriai, energia-, kényelmi és környezetvédelmi szempontú tervezési optimalizálási felismeréseket tárnánk fel.
55	2011	Kétemeletes lakóépületek különböző városrészekben. A homlokzatok besugárzását és a napenergia-hasznosítási potenciált vizsgálják a tetőfelületeken elhelyezett BiPV napelemek energiahatékonyágának maximalizálása érdekében. A változók az alak, a sűrűség, a telek elrendezése. 26 konfiguráció. Az aktív tetőfelület az ORI és a homlokzatok alakja következtében a legnagyobb befolyással bír: akár 50%-kal nagyobb villamosenergia-termelés lehetséges a téglalap alakú elrendezéshez képest.	-	• Épületszárnyak elfordulási szöge • A szárnyak mélységaránya • Távolság a blokkok között • ORI	b) EnergyPlus	Az épületek formái csak korlátozottan változhatnak. Csak az energiatermelési célt vettük figyelembe, a hőhatékonyágot csökkentő hatások vagy a panelek hűtésére szolgáló aerodinamikai hatások nélkül. Csak a PV-vel kapcsolatos tanulmány. Hiányzik a matematikai optimalizálás.
54	2015	A lakóépület (150, 230, 307 m ²) geometriájának változói által az energiateljesítményre gyakorolt hatását érzékenységvizsgálat mutatja ki. Hiánypótló információ az épületgeometria jelentőségéről az energiahatékonyágban. Mind az egymásra építés, mind az oldalarány a tömörség képviselői, és - az anyagspecifikus változók mellett - erős hatást gyakorolnak az energiahatékonyágra. Az oldalarány fontosabb az északabbra vagy délebbre fekvő régiókban. A geometriának éghajlatonként eltérőnek kell lennie.	-	• Oldal arány • Magasság / halmazás • Tető / gerinc elhelyezkedése • GR, ORI, STR, TM, SHADE	c) Morris GSA	Csak épületformák automatizált energetikai értékelése. A matematikai optimalizálás hiányzik.

59	2015	Áttekintő vita az energiahatékony épületek tervezésének formai szerepéről. A vita rámutat az épületgeometria korlátozott kihasználására az energiahatékony tervezésben. Hangsúlyozza, hogy míg egyes optimalizálási tanulmányok túlságosan is elmélyülnek a formai vizsgálatban, és ezáltal nem praktikus, összetett formákat generálnak, más tanulmányok rendkívül egyszerű geometriai megközelítést alkalmaznak, alig érintve a lehetőségek mélységét. A geometria kihagyása az energiateljesítményről szóló vitából és magának a geometriának az energetikai kapcsolatának korlátozott megértése a kutatás döntő hiányosságai.	-	<ul style="list-style-type: none"> • Jelentős geometriai módosítás • GR, ORI, STR, TM, SHADE 		Csak áttekintés. Matematikai optimalizálás hiányzik.
60	2016	Városi lakóépületek energiahatékonyságot javító tervezése. A blokkok geometriájának és elrendezésének módosítása. 4 és 8 emeletes épülettömb változatok. 10-szer alacsonyabb exergiaterhelés a hagyományos referenciaesethez képest. A napenergia-nyereséget a morfológiai egységek árnyékhatásában vették figyelembe, ezért a tömbök közötti távolság az épület magasságának 2-szerese.	-	<ul style="list-style-type: none"> • Magasság / halmozás • Távolság a blokkok között • Blokk forma, méret • Kerület és városi terület aránya 	c) own developed exergy calculation method	Továbbfejlesztett tervezési koncepció, amely egy kiadatlan mesterdiplomamunka és egy 1973-as könyv alapján készült. A BDGV-k figyelembevétele nem magyarázható. Nincs energetikai optimalizálás.

B. függelék - BECED-kutatás, beleértve az épületformák generálását eseti változatok létrehozására (folytatás)

Ref. No.	Év	Téma és eredmények	Célfüggvény	Épületgeometria tervezési változók	a) Algoritmus b) Szimulációs motor c) Keretrendszer / Módszer	Korlátozások
61	2013	Különböző családi házak (kb. 150-230 m ²) korai tervezési folyamata formanyelvi alapú geometriai generálással. A generálási és korlátozási szabályok úgy irányítják a folyamatot, hogy csak a kívánt eredményt hozza létre. A formanyelvtan átalakul parametrikus rendszerré. Változatok programozása: az alakváltozatok (méretarány, tükrözés, fordítás, forgatás) egyenletekké és változókká történő átalakítása. Minden helyiséget blokkként modellezünk, változtatható oldalarányokkal, hosszal, szélességgel, alakkal, mérettel és elhelyezkedéssel. A formák automatikus energiaértékelése.	-	<ul style="list-style-type: none"> • Fal hossza / területe • Térmélység / épületszárny • Terek / külső falak közötti összeköttetés • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	b) EnergyPlus c) MATLAB, parametric design, shape grammar	Halmaz szabályok, a formanyelv egyszerűbb változata. Kezdetleges technika. Csak véletlenszerűen generált építési példák bemutatása. Csak a módszertan koncepciójának bizonyítása. Matematikai optimalizálás hiányzik.
62	2018	Az alacsony hőátbocsátású szerkezetek hatásának vizsgálata az EU tervezési iránymutatásai szerint, véletlenszerűen generált kétszintes családi házakon keresztül, a tervezés korai szakaszában. Nagyszámú épületgeometriai alternatíva generálása. Javított keresési sebesség optimalizálási célokra. Az EU északi régióiban az U-érték csökkenésével csökken a geometria, a tájolás, a WWR energetikai hatása. Ezzel szemben a déli régiókban az U-érték csökkenésével a hűtési igény növekszik, és a geometria energetikai hatása fontossá válik: összetett forma, nagyobb ablakok É felé és kisebb ablakok S és Ny felé ajánlott.	-	<ul style="list-style-type: none"> • SF • Relatív tömörség • Geometria generálás energetikai értékeléssel • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	a) ES; SHC b) EnergyPlus c) Evolutionary program for Space allocation program (EPSAP)	Csak véletlenszerűen generált geometriák és automatikus energiaértékelés. A matematikai optimalizálás hiányzik. A geometria energiára gyakorolt hatását nem vizsgálták teljes mértékben. Inkább általános tendencia a konkrét meglátások helyett. A formaoptimalizálásban és az azt követő megtakarításokban rejlő lehetőségek elhanyagolása a burkolat, a mechanikai rendszerek és az automatizálási fejlesztések terén.

63	2018	A szomszédos városi épületek morfológiájának hatása egy 12 emeletes célépület hűtési terhelésére és természetes szellőzésére forró-sivatagi éghajlaton. A Building Modular Cell (BMC) geometria-generálási módszer bevezetésére kerül a városi morfológia generálására, amely 5x5-ös rácsrastreren alapul, 5 városi sűrűségű (UD) épületkategóriával, 3 épületmagassági osztállyal és 5 városi mintával (az épülettömbök közötti utcaterület), valamint egy formageneráló algoritmussal, beleértve az építészetileg alkalmas formák kiválasztását. Nagy városi sűrűség az alacsony hűtési igényhez; normál városi sűrűség (50-60%-os területlefedettség) alacsony szomszédos épületeket igényel; L-alak; a keleti oldalra való tolódás és húzás az elrendezésben a hűtés csökkentése érdekében; sűrű szomszédság alacsony utcaszélességgel (az épületmagasság és az utcaszélesség aránya H/W 12 vagy magasabb); a legjobb NV esetében a H/W 6-8 értéket kell figyelembe venni.	<ul style="list-style-type: none"> • Geometria generálás energetikai értékeléssel • Magasság / halmozás • Városi környezet • Épületmagasság és az utcaszélesség aránya (H/W) 	<ul style="list-style-type: none"> b) Archsim-Diva, Autodesk Inventor, Autodesk CFD, ANSYS Fluent, c) GH 	Nem végeztek energiaoptimalizálást. A CFD-szimuláció validálása egy másik szimulációs szoftverrel.
----	------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------

C. függelék - épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációs kutatás az alapvető épületforma-módosítás felhasználásával eseti változatok létrehozására (folytatás)

Ref. No.	Év	Téma és eredmények	Célfüggvény	Épületgeometria tervezési változók	a) Algoritmus b) Szimulációs motor c) Keretrendszer / Módszer	Korlátozások
75	1987	Az első úttörő tanulmány (1983), amely az épületek energiaoptimalizálását vizsgálta, beleértve az alak és a burkolat változóit is. Iroda (2000 m ²). A módszer példaértékű bemutatása.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. hőterhelés • Teljes tökekköltség • Max. területarány, a megfelelő megvilágítási szint biztosítása 	<ul style="list-style-type: none"> • Alapterület • Oldal arány • Jelentős geometriai módosítás • Magasság / halmozás • GR, ORI, STR, TM, SHADE • HVAC / energetikai rendszer 	c) Pareto optimal dynamic programming, FORTRAN	Szimuláció és fejlett optimalizációs algoritmus nélkül.
86	2001	Épületburkolat-optimalizálás vázlattevé szakaszban családi ház változó méretben - interaktív eszköz. Több szempontú döntéstámogató eljárás (MCDA), amely az ügyfél, a tervezőcsoport, a hatóságok és a felhasználók preferenciáit, követelményeit és korlátait integrálja az optimalizálási folyamatba. 1) A korlátok és célok meghatározása, 2) megvalósíthatósági tanulmány, 3) vázlattevé. Iteratív beavatkozás / optimalizálás az összes résztvevő követelményeinek, teljesítményeredményeinek és a tervezésnek a figyelembevételével.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. fűtési költség • Min. AC költség • Min. HMV költség • Min. világítási költség • Min. üzemeltetési költség • Min. építési beruházások 	<ul style="list-style-type: none"> • Oldal arány • Geometria generálás energetikai értékeléssel • Tető / gerinc elhelyezkedése • GR, ORI, STR, TM, SHADE • HVAC / energetikai rendszer 	<ul style="list-style-type: none"> a) GA b) LEMA EsQUISE module c) Aid to the Multiple criteria Conception of the building Envelope (AMCE) 	GA, ezért csak közel optimális megoldások. Csak elméleti javaslat.

80,81, 82	2002	Három tanulmány az épület alakjának, a lakások közötti belső falszakaszoknak és a hőforrás-felhasználásnak a többlakásos lakóépületekben (2133,3 m ²) történő több szempontú optimalizálásáról. Részproblémákra bontás: forma, belső válaszfalak, hőforrások és a globális optimalizálási probléma kezelése. A prizmatikus épület alakját magasságban, az oldalak arányaiban és az ORI-ben határoztuk meg. A négyszögletes forma téglalapra és 2 trapézra cserélésével optimális alakot alakítottak ki.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. építési költség • Min. fűtési igény • Min. hőforrásokból származó emisszió 	<ul style="list-style-type: none"> • Fal hossza / területe • Termélység / épületszárny • Magasság / halmozás • Fal dőlésszögei • GR, ORI, STR, TM, SHADE • HVAC / energetikai rendszer 	<ul style="list-style-type: none"> b) CAMOS c) Analytic-numerical 	Nagyon korlátozott geometriával kapcsolatos tervezési változók.
77	2002	Egy közösségi terem alacsony energiafelhasználású épületenergetikai optimalizálása, 1 zóna (200 m ²) kombinált számítógépes algoritmus és emberi megítélés alapján. A lehetséges közel optimális tervek széles skálájának megtalálása. A GA által generált minden egyes tervezési eset építészeti vonzerejének időigényes osztályozása helyett (vagy a feldolgozott tervek számának jelentős csökkentése az időmegtakarítás érdekében), minden egyes épületváltozónként hisztogramot javasolunk. Az esetek elemezhető és építészeti vázlatokká dolgozható fel. A hasonló éves energiafelhasználást teljesítő modellek különböző tervekkel rendelkeznek. A minimális hővesztéssel rendelkező modellek szigetelést és kompakt formát alkalmaznak, míg a napenergia-nyereséget maximalizáló modellek szabadabb formát és nagyobb ablakokat használnak. A 2 stratégia kombinációja a nyári túlmelegedési problémák miatt problémás.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. éves energiafogyasztás • Max. hővesztések • Max. hőnyereség • Max. építészeti vonzerő 	<ul style="list-style-type: none"> • Fal hossza / területe • Termélység / épületszárny • Tető / gerinc elhelyezkedése • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	<ul style="list-style-type: none"> a) GA b) Simplified dynamic thermal model, EXCALIBUR. c) custom calculation 	Nagyon korlátozott geometriával kapcsolatos tervezési változók. Az épületfizikai teljesítményre vonatkozó következtetések nem újak. GA, ezért csak közel optimális megoldások.
84	2003	Téglalap alakú irodaház és lakóépület többcélú optimalizálása a falak összetételével, formák generálásával és HVAC-rendszerek meghatározásával. Pareto-kísérletek: az egyes helyiségek méretét és tetőszerkezetét a GA módosítja. A Pareto-előépítési esetek nagy változatosságát sikerült elérni. A fűtés optimális megoldása egyetlen, kompakt, nagyméretű, S és W homlokzatú, teljesen üvegezett épülettestben érhető el. A világítási igény tekintetében az optimális eset kis, napfény által könnyen átjárható tereket biztosít S felé néző nagy üvegezett homlokzatokkal.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. világítási igény • Min. fűtési hőenergia-igény • Min. építési beruházási költségek 	<ul style="list-style-type: none"> • Geometria generálás energetikai értékeléssel • Fal hossza / területe • Termélység / épületszárny • Tető / gerinc elhelyezkedése • GR, ORI, STR, TM, SHADE • HVAC / energetikai rendszer 	<ul style="list-style-type: none"> a) GA b) DOE-2 	Az épületforma véletlenszerű generálásában nem észlelhetők kölcsönös függőségek és energiával kapcsolatos logika. Az épületfizikai teljesítményre vonatkozó következtetések nem újak.
70	2003	Iroda, 1092 m ² , döntéstámogató rendszer (DSS), két építész, két statikus és egy épületgépész mérnök bevonásával az értékelésbe. Matematikai módszer bemutatása.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. beruházási költség • Max. tiszta tartomány • Max. természetes források felhasználása 	<ul style="list-style-type: none"> • Alapterület • Termélység / épületszárny • Magasság / halmozás • Nettó/bruttó alapterület aránya • Fal-alapterület arány • Városi környezet • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	<ul style="list-style-type: none"> a) GA c) BGRID, Microsoft Visual Basic 	Korai fázisban lévő optimalizálási keretrendszer, további fejlesztésre szorul. Geometriai generálás nélkül (csak számítás).
68	2005	Javasolt optimalizálási módszer többcélú genetikai algoritmusokkal a korai tervezési szakaszban, egy példán keresztül bemutatva (iroda, 1000 m ²). Az LCEI 65%-kal csökken, és az LCEI-n belüli működés 20%-kal csökken. A költségcsökkentés szempontjából az 1. oldal arány előnyösebb, de a téglalap alakú, déli hosszú oldalú forma jobb energiahatékonyságot biztosít. Kompromisszum a környezet vagy a költséghatékonyság szempontjából optimális méretarány között. Egy matematikai módszer bemutatása és bizonyítása.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. LCEI • Min. LCCA (40 év) 	<ul style="list-style-type: none"> • Oldal arány • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	<ul style="list-style-type: none"> a) MOGA (Pareto) b) ASHREA Toolkit c) Custom calculation , ANTHEA 	Egyszerű geometria, nagyon korlátozott geometriával kapcsolatos változók.

72	2005	Javaslat az Analytic Target Cascading (ATC) használatára, egy multidiszciplináris hierarchikus optimalizálási módszerre. Az alkalmazhatóság bemutatása egy kísérleti tanulmányon keresztül (597 m ² -es iroda-műhelyépület). Egy matematikai módszer bemutatása és bizonyítása.	<ul style="list-style-type: none"> • Max. terület • Max. hőkomfort • Min. fűtési igény • Min. hűtési igény 	<ul style="list-style-type: none"> • Fal hossza / területe • GR, ORI, STR, TM, SHADE • HVAC / energetikai rendszer 	<ul style="list-style-type: none"> b) EnergyPlus c) custom calculation, superEGO, Sequential Quadratic Programming (SQP) 	Korai fázisban lévő optimalizálási keretrendszer, további fejlesztésre szorul.
85	2005	A javasolt módszer lehetővé teszi a tervező számára, hogy feltárja és vizualizálja a tervezés evolúcióját, a formák generálását, és interaktívan részt vegyen az optimalizálási folyamatban. A felhasználó egy grafikus felhasználói felületen keresztül kiválaszt egy példányt a formák közül, ezt követően a GA folytatja a legjobb megoldás keresését. Automatizált háló- és CFD-számítások. Példa (általános, egyszerű 1 szobás) az optimalizálás folyamatos evolúciójára diszkrét tervpéldányok automatikus létrehozásával és a folyamat közbeni morfológiával. A hagyományos tervezéshez képest: jelentős számítási időmegtakarítás, a változók és a teljesítmények közötti kapcsolat nyomon követésének lehetősége, a különböző megoldások közötti kompromisszum értékelésének lehetősége, újszerű tervezési megoldások-konfigurációk lehetségesek, mivel nem a tervezői szemlélet befolyásolja.	<ul style="list-style-type: none"> • Max hőkomfort • Max szellőzési teljesítmény • Min. hőmérséklet-különbségek a céltól • Min. légáramlási sebességkülönbségek a céltól 	<ul style="list-style-type: none"> • Fal hossza / területe • Termélység / épületszárny • Magasság / halmozás • GR, ORI, STR, TM, SHADE • HVAC / energetikai rendszer 	<ul style="list-style-type: none"> a) GA b) Gambit, Ansys Fluent (CFD) c) GALib, C++, Java API 	GA használata, ezért csak közel optimális megoldások. A tervező preferenciáinak figyelembe vétele a folyamat során azt jelenti, hogy a kiválasztott morfolízis ígéretes megoldás lehet, de még mindig nem biztos, hogy a garantált optimum.
69	2007	Egy irodaház formájának optimalizálása ovális alapon. Egy matematikai variációs módszer bemutatása és bizonyítása. A hőveszteségek és -nyereségek kb. 10%-kal csökkennek. Az optimalizált ovális forma jobban teljesít, mint a kör vagy négyzet alapon.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. építési költség • Min. fűtési igény (1-100 év) 	<ul style="list-style-type: none"> • Elrendezési görbék hossza 	<ul style="list-style-type: none"> c) Variational method; custom calculation 	Egyszerű geometria, nagyon korlátozott geometriával kapcsolatos változók.
71	2009	Egy MDO bemutatása a rendszer építőelemekre bontásával (dekompozíció) CAD és IFC-kódok segítségével. Interaktív módszer a tervező bevonásával a mennyiségi és minőségi elemzéshez. Matematikai módszer bemutatása és bizonyítása. Egy ipari csarnok (1200 m ²) acél- és favázas teherhordó szerkezetének optimalizálása.	<ul style="list-style-type: none"> • Kompromisszum a gazdasági és környezeti felhasználói preferenciák között 	<ul style="list-style-type: none"> • Teherhordó szerkezet • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	<ul style="list-style-type: none"> a) MOGA c) N-Square diagram (Design Structure Matrix), ModelCenter 	A szerkezet geometriájának változóira korlátozódik.
79	2009	MDO egy osztályterem épületében. Egyedi faktoriális tervezés (DOE). A PIDO szoftver tesztalkalmazása egy AEC feladatra. A szerkezet beruházási költségei csökkennek a tér hosszának növekedésével, mivel a gerenda feszítávolsága csökken és olcsóbbá válik. Az üzemeltetési költségek a hossz növekedésével nőnek, a nagyobb felület (hőveszteség), a nagyobb WWR a több napenergia-nyereség és a hűtési igény miatt.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. az acélvázaz teherhordó szerkezet beruházási költségei • Min. LCC érték az acélvázaz teherhordó szerkezet esetén. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fal hossza / területe • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	<ul style="list-style-type: none"> a) GA, Gradient-based algorithm b) EnergyPlus, Process Integration and Design Optimization (PIDO). c) ModelCenter, C++, DesignExplorer, Darwin 	Az épületfizikai teljesítményre vonatkozó következtetések nem újjak. GA használata, ezért csak közel optimális megoldások.
74	2013	Családi ház, az energiaköltség-optimum görbék gazdasági ösztönzői a nettó nulla energiafelhasználású otthonban (NZEH). MO-elemzés a célfüggvény Pareto-görbéinek megtalálására. A nettó nulla energiahatékonyság passzív napenergia tervezéssel, a HVAC rendszer hatékonyságának javításával és megújuló forrásokkal (PV-panelek) lehetséges. a költségoptimalis esetben az energiateljesítmény kb. 10 000 kWh/a. Egy NZEH körülbelül ugyanannyiba kerül, mint a referenciaépület (Building America referenciaépület DOE 2010) 30 éves élettartam mellett.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. nettó energiafogyasztás • Min. LCC 	<ul style="list-style-type: none"> • Oldal arány • Tető / gerinc elhelyezkedése • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	<ul style="list-style-type: none"> a) Multi-objective algorithm b) EnergyPlus, BEOpt 	Az épületfizika szempontjából a következtetés nem új ismeret. Az épület geometriájáról, méretéről stb. nem áll rendelkezésre információ.

78	2014	Egy alacsony költségű családi ház (LCH) többcélú optimalizálása 3 különböző éghajlaton (Kína). A módszer példaértékű bemutatása. Geometriával kapcsolatos következtetések mint tervezési segédlet: Trópusi monszun éghajlaton, NV és/vagy AC K-Ny-i irányú épületeknél ajánlott a hosszúka téglalap alak. Szubtrópusi területeken NV működtetése esetén a négyzet alakú forma ajánlott. Az éghajlat döntő hatással van az épület üzemeltetési típusára (passzív vagy aktív).	<ul style="list-style-type: none"> • Min. építési költség • Min. LCC • Max. hőkomfort 	<ul style="list-style-type: none"> • Oldal arány • Fal hossza / területe • Termélység / épületszárny • GR, ORI, STR, TM, SHADE • HVAC / energetikai rendszer 	<ul style="list-style-type: none"> a) Hybrid: PSO + Hooke-Jeeves b) EnergyPlus c) GenOpt 	Nagyon korlátozott geometriával kapcsolatos tervezési változók.
73	2015	Iroda, 1 reprezentatív emelet (1000-2000 m ²). A fűtési és hűtési terhelést minimalizáló tervezési változók keresése. A DOE lehetséges tervezési változó-konfigurációkat állított elő. A tervezési változókat statisztikailag polinomiális egyenlet formájában kaptuk meg a pareto-front meghatározásához. A módszer a tervezési változók összes lehetséges kombinációjának egy részhalmozát használja, hogy megkönnyítse a nagyszámú tesztfutással járó kimerítő teljes frakcionált tervezést. (1) Nagyszámú változót modelleznek és értékelnek szűrőként, hogy megtalálják a fontos változókat. (2) Funkcionális összefüggéseket tárunk fel a változóknak a célfüggvényekre gyakorolt hatásáról. (3) A változók optimalizálása. Az ablakok és a légszivárgás változói jelentősen befolyásolják az energiaterhelést, míg az oldalarány hatástalan. A HVAC rendszer befolyásolja a passzív tervezést.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. fűtési terhelés • Min. hűtési terhelés 	<ul style="list-style-type: none"> • Alapterület • Oldal arány • GR, ORI, STR, TM, SHADE • HVAC / energetikai rendszer 	<ul style="list-style-type: none"> a) NSGA-2, DOE b) TRNSYS, R, NIST/SEMATECH 	Nagyon korlátozott geometriával kapcsolatos tervezési változók. A forma tervezési változókat és a burkolt tervezési változókat (WWR, anyagok) egyszerre vizsgálják, ezért a geometria mint elsődleges építészeti-funkcionális előfeltétel fontosságát felülírják a tervezési technológiailag későbbi és költségesebb tervezési lépések. A következtetések nem tartalmaznak új ismereteket.
76	2015	MO optimalizálása a hőkomfort és az energia az épülettervezésben (többcsaládos ház). A GA optimalizálja a hátsó terjedésű (BP) ANN súlyát és küszöbértékét. Szimuláció alapuló GA-BP hálózat kiképzése és az eredmények validálása. Ezt követően NSGA-II optimalizálás: a lehetséges megoldások értékelése. Jelentős (kb. 50%-os) javulás az energia terén és jelentéktelen javulás a komfortérzetben.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. éves energiafogyasztás • Max. hőkomfort 	<ul style="list-style-type: none"> • SF • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	<ul style="list-style-type: none"> a) NSGA-II. GA-back propagation network (GA-BP) b) EnergyPlus c) Matlab 	Nagyon korlátozott geometriával kapcsolatos tervezési változók. Téglalap alakra korlátozódnak, ismert teljes alapterülettel. További épületgeometria- és típusképzési mintákhoz kiterjedt vizsgálati eredményekre van szükség.
88	2019	MO BEO. Geometriai, burkolati és energetikai rendszerek Pareto-optimalizálása. Javasolt "Harlekin" optimalizálási keretrendszer (egyenletlenségek a változatosan tájolt homlokzatokban, anyagok, színek, WWR, hőszigetelési jellemzők): (1) GA optimális, nem dominált megoldásokat generál; (2) intelligens kimerítő mintavétel az optimális (minimalizált) PEC, globális költség (GC) és beruházási költség (IC) forgatókönyvekből. A döntéshozók akarataik és igényeik szerint választhatják ki a "legjobb" megoldást. Példa (iroda, 2700 m ²) modellezés és számítások. Ajánlások az optimális geometriára (1. oldalarány) és a WWR-re vonatkozóan.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. fűtési energiaigény • Min. hűtési energiaigény • Min. világítási energiaigény • Min. termikus diszkomfort órák 	<ul style="list-style-type: none"> • Oldal arány • GR, ORI, STR, TM, SHADE • HVAC / energetikai rendszer 	<ul style="list-style-type: none"> a) MOGA b) EnergyPlus c) MATLAB 	Nagyon korlátozott geometriával kapcsolatos tervezési változók. GA, ezért csak közel optimális megoldások, "ad-hoc" véletlenszerű megoldásgenerálás. Az épületfizikai teljesítményre vonatkozó következtetések nem újak. A módszer nem felhasználóbarát, programozási és BEO-szakértelmet igényel. A generáció és a populáció méretének meghatározása nem indokolt.
58	2019	Irodaházak energiateljesítményének és napfényoptimalizálásának MO-optimalizálása a DOE kereskedelmi referenciaépület sablonja alapján. Az éghajlat hatása a nappali fényre és az energiateljesítményre a tervezés korai szakaszában. Az épület mélységét nagyban befolyásolja az éghajlat. Meleg és vegyes éghajlaton a nagyobb oldalarányok (1,97) jobbák, míg hideg éghajlaton az alacsonyabb oldalarányok (1-1,37) előnyösebbek. A tetőgerincnek az épület közepe körül kell elhelyezkednie. Az EUI-t és az UDI-t leginkább befolyásoló tervezési változók a tetőablakok és ablakok, valamint bizonyos árnyékolási tulajdonságok. Az épület mélysége erősen meghatározza az energiaigényt.	<ul style="list-style-type: none"> • Max. hasznos nappali megvilágítás (UDI) • Min. energiateljesítmény (EUI) 	<ul style="list-style-type: none"> • Termélység / épületszárny • Tető / gerinc elhelyezkedése • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	<ul style="list-style-type: none"> a) MOGA b) EnergyPlus c) GH, Ladybug, Honeybee, Octopus, R 	Nagyon korlátozott geometriával kapcsolatos tervezési változók. GA, ezért csak közel optimális megoldások. Az épületfizikai teljesítményre vonatkozó következtetések nem újak. A generáció és a populáció méretének meghatározása nem indokolt.

87	2020	SO és MO lakóépületek (740 m2) környezetvédelmi optimalizálása. Bemutatott módszer LCEI példaszámításokkal. Kb. 4-6 emeletes kompakt, kocka alakú épület, kissé nagyobb S-i homlokzattal, nagy WWR (kb. 60%) a S-i és kis WWR az É-i oldalon. A megtestesült és az üzemeltetési hatás közötti kompromisszum optimalizálása során az egycélú optimalizálás (SO) a kompakt formát preferálta teljesen üvegezett homlokzatokkal, az üzemeltetési hatás optimalizálása pedig nagy déli homlokzati formát (max. szoláris nyereség) és nagyon intenzív szigetelést (vesztéscsökkentés) eredményezett. Az SO + MO optimalizálás esetén: közel kocka alakú forma, a napenergia-nyereségre optimalizált WWR-rel (kettős üvegezés) az S homlokzaton, a többi homlokzat pedig az alacsony transzmissziós veszteségekre optimalizált (hármás üvegezés). Az MO környezeti hatás optimalizálásánál 60-80%-os környezeti megtakarítás érhető el. Hasonló eredmény érhető el jelentősen eltérő megoldásokkal.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. LCEI (50 év, EN 15978) • Min. üzemeltetési költség • Min. nem megújuló kumulatív energiaigényen alapuló megtestesült hatás (CED). 	<ul style="list-style-type: none"> • Oldal arány • GR, ORI, STR, TM, SHADE • HVAC / energetikai rendszer 	<ul style="list-style-type: none"> a) GA c) GH, Ladybug, Honeybee, Octopus, Steady-state model EN ISO 13790 	GA, tehát csak egy sor közel optimális megoldás. A GA "fekete ökörként" működik, ezért a tervező nem tudja követni, hogy pontosan mi történik a számítások során. Csak állandósult állapotú energia számítások.
83	2021	MO optimalizálása egy normál tantermi térben. Az ANN, a helyettesítő modellek népszerű típusa kb. 2570-szeresére gyorsítja a rendszeres szimulációs időt. 14,2-24,6%-os átlagos teljesítményjavulás a 3 célfüggvényben (integrált megoldás).	<ul style="list-style-type: none"> • Min. légkondicionálás • Min. világítási energiafogyasztás • Min. hőérzetet okozó kellemetlen órák • Max. átlagos UDI 	<ul style="list-style-type: none"> • Fal hossza / területe • Termélység / épületszárny • Magasság / halmazás • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	<ul style="list-style-type: none"> a) NSGA-II b) EnergyPlus, Radiance c) GH, Python, Ladybug, Colibri, Geatpy 	Nagyon korlátozott geometriával kapcsolatos tervezési változók. Véletlenszerűen generált tervezési esetek az ANN képzési adathalmazához a parametrikus eszközökkel, ezért az optimum kimaradhat. Nem egyértelmű megkülönböztetés 3 különböző esetben a váltakozó geometria, tájolás, WWR, árnyékolás, napelnyelés. Az épületfizikai teljesítményre vonatkozó következtetések nem újak.
89	2021	Lakóépületek (2 000; 4 000; 6 000 m2) gépi tanuláson alapuló termikus optimalizálása. Latin hiperkocka mintavételezés (LHS) generálja az épületkonfigurációkat. A Gradient boosting machine (GBM) a szimuláción alapuló adathalmazon keresztül képzett a céleredmény előrejelzéséhez. A GA a helyettesítő GBM modellel optimalizál. Optimális méretarány-értékeket találtunk a 3 váltakozó helyszín (éghajlat) és 3 különböző épületmagasság (5, 10 és 15) esetén 0,67-1,67 között.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. fűtési terhelés • Min. hűtési terhelés • beruházási költségkorlátok mellett. 	<ul style="list-style-type: none"> • Oldal arány • Magasság / halmazás • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	<ul style="list-style-type: none"> a) GA b) EnergyPlus, DEAP c) Gradient boosting machine (GBM) 	Nagyon korlátozott geometriával kapcsolatos tervezési változók. GA, ezért csak közel optimális megoldások, véletlenszerű generálás. Az épületfizikai teljesítményre vonatkozó következtetések nem újak. A generáció és a populáció méretének meghatározása nem indokolt.
91	2021	A magas lakóépületek elhelyezkedése és magassága jelentős hatással van a belső és külső (városi terek) vizuális és termikus komfortérzetre. A 10 legjobb optimalizált esetet (városi konfigurációkat) választottuk ki.	<ul style="list-style-type: none"> • Max. DF • Max. égbolt látószög aránya • Max. ablak napsütéses órák • Max. napfényes órák • Max. univerzális termikus éghajlati index 	<ul style="list-style-type: none"> • Magasság / halmazás • Városi környezet 	<ul style="list-style-type: none"> a) NSGA-II b) Radiance, Daysim c) Matlab, Grasshopper, Ladybug 	Korlátozott geometriaoptimalizálás. Főként csak vizuális kényelmi optimalizálás.
90	2021	Geometriával kapcsolatos teljesítményoptimalizálás automatikus felismerési és konverziós módszerrel, preferenciaalapú optimalizációs algoritmussal, amely segíti a tervezők döntéshozatali folyamatát. (1) A preferenciák meghatározása a tervező által szoftveres segítséggel. (2) Preferencia alapú optimalizációs algoritmus keresi az optimális megoldásokat. (3) A tervező kiválasztja a legjobb megoldást.	<ul style="list-style-type: none"> • Ügyféllel, tervezővel kapcsolatos preferenciák 	<ul style="list-style-type: none"> • Alapterület • Termélység / épületszárny 	<ul style="list-style-type: none"> a) 3D space recognition algorithm b) custom simulation engine c) MOOSAS 	A tervezőtől előzetes konkrét preferenciamodell-tervezésre van szükség.

D. függelék - épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációs kutatás a fejlett épületforma-módosítás alkalmazásával eseti változatok létrehozására (folytatás)

Ref. No.	Év	Téma és eredmények	Célfüggvény	Épületgeometria tervezési változók	a) Algoritmus b) Szimulációs motor c) Keretrendszer / Módszer	Korlátozások
53	2006	Pentagon alakú irodai elrendezés optimalizálása. A hossz-szög módszer (a poligon az észak és egy él közötti szöggel, ORI = az 1. él szöge) jobban teljesít, mint a hossz-szög módszer (a poligon az élek hosszával és a két szomszédos él közötti szöggel, ORI = az 1. él szöge a valódi északhoz képest) a MOGA keretében. Az alacsony LCC-t a szabályos ötszögekhez közeli, az alacsony LCEI-t pedig a nagyobb (szélesebb) déli homlokzatformák okozzák.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. LCC • Min. LCEI 	<ul style="list-style-type: none"> • Fal dőlésszöge • Tető / gerinc elhelyezkedése • GR, ORI, STR 	<ul style="list-style-type: none"> a) MOGA b) RS Means, ATHENA 	Inkább a módszer bemutatása, mint átfogó geometria generálás és optimalizálás. GA, ezért csak az optimum közeli keresés.
46	2009	Javaslat egy hierarchikus geometriai kapcsolaton alapuló, ágensalapú geometria-generálásra. Geometriák morfizálása ágenseken és gyermekpontokon keresztül a geometriák 3d-s sarokpontjaiként. Egy kocka alakú referencia épületgeometriát (225 m ² -es lakás) módosítottunk a minimális hővesztésért biztosító optimális alakra. Egyedülálló geometria-generálási megközelítés (szabad alakítás) a teljes épületgeometriák szabad alakban történő kezelésére. Térfogatanként 12% hőterhelés és burkolatfelületenként 6% hőáram megtakarítható.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. hőcsere a burkolaton keresztül 	<ul style="list-style-type: none"> • 3D geometriák sarokpontjai • Az egyes helyiségek rácspozíciója 	<ul style="list-style-type: none"> a) GA b) EnergyPlus, c) MATLAB, m-file 	Egyszerű példa egy épületre, korlátozott geometriai változókkal és nem praktikus (drága) bonyolult (építési) burkolatfelületekkel.
52	2010	A napenergia-felhasználás (fűtés, világítás) MO-optimalizálása egy 18000 értékelést tartalmazó városi kerületben. A "teraszok lapos tetők" (K-Ny-i épülettengely), a "födémek ferde tetők" (É-D-i épülettengely) és a "teraszudvarok" (udvarok) morfológiai változatait vizsgálták, és az utóbbi teljesített a legjobban az energianyeresség és -vesztés tekintetében a legnagyobb kollektorfelület alapján, miközben a térfogat kompakt maradt. A középkori településmorfológia formára vonatkozó (kompakt) szerkezete a minimális veszteségek érdekében. A modern településmorfológia új, kevésbé kompakt formákat igényel a besugárzás kitermeléséhez is.	<ul style="list-style-type: none"> • Max. a fűtési szezonban a hővesztések által a burkolatra gyakorolt besugárzási eltérés • Max. a burkolat hővesztésével és minimális térfogatával a burkolatra jutó sugárzási eltérés. 	<ul style="list-style-type: none"> • Engedélyezett városi morfológiai térfogat aránya • ORI • Magasság / halmozás • Tető / gerinc elhelyezkedése 	<ul style="list-style-type: none"> a) EA b) RADIANCE c) MOO, OSMOSE, cumulative sky model, Matlab 	Az EA-t Pareto-optimalizálással használták a hiányzó konvergenciaellenőrzés pótlására. Így csak közel optimális megoldás érhető el.
97	2010	A hibrid evolúciós algoritmust korlátok kezelésével alkalmazzák a városi épületkonfiguráció optimalizálásának módszereként. 3 alkalmazás: kocka alakú épületek egy városi tömbben; összetett bővítési épület tetőformák egy meglévő ház mellett; téglalap alaprajzú épület térfogata Fourier-sorozatokkal paraméterezhető.	<ul style="list-style-type: none"> • Max. napenergia-felhasználás 	<ul style="list-style-type: none"> • Magasság / halmozás • Tető geometria • Térfogat 	<ul style="list-style-type: none"> a) CMA-ES (covariance matrix adaptation evolution strategy), HDE (hybrid differential evolution). b) RADIANCE 	Érdekes, változatos alkalmazásai a módszernek, de inkább szemléltető, mint szisztematikus optimális épületgenerálási eljárás.

94	2010	Különböző betű alakú, téglalap és trapéz alakú elrendezéseket vizsgálnak 2 szinten lakóházakban. A téglalap és a trapéz alakú formák a legjobb teljesítményt nyújtják. Ha csak az alakváltozót vesszük figyelembe: Az ablakokon keresztül érkező napsugárzás miatt a napsugárzás miatt a napsugárzás miatt az S-i irányú trapéz, a hűtési éghajlaton pedig az É-i irányú trapéz előnyösebb. Ha a geometria, a WWR és az anyagváltozókat együttesen vesszük figyelembe: az optimális formák között alig van különbség. Az U-értékek csökkentése csökkenti a geometria és a WWR hatását a hidegebb éghajlati övezetekben, melegebb éghajlaton pedig a túlmelegedés megfordítja ezt a tendenciát. Az építéseknek nagy rugalmasságuk van a hideg éghajlaton a formakialakításban. Az épületformák eredményei a max. LCC (max. felületek, oldalarány) eredményei nagy különbségeket mutatnak, ami jelzi az épületgeometria döntő hatását az energiahatékonyságra.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. LCC 	<ul style="list-style-type: none"> • Oldal arány • Termélység / épületszárny • GR, ORI, STR, TM, SHADE • HVAC / energetikai rendszer 	<ul style="list-style-type: none"> a) GA b) DOE-2 c) MATLAB, Perl. 	Ez a tanulmány nem vette figyelembe, hogy a tömegforma optimalizálása után jelentős megtakarítások érhetők el a további passzív és aktív fejlesztésekkel: az alaktervezési módosítások alacsonyabb költségekkel járnak a későbbi anyag- és HVAC-rendszer-specifikus beruházásokhoz képest (LCCA), ezért az épületgeometria nem független az energetikai tervezéstől.
95	2011	Különböző betű alakú, téglalap és trapéz alakú elrendezéseket vizsgálnak 2 emeletes lakóépületekben. SO a HVAC-rendszerek optimalizálása, az épületburok és a HVAC-rendszer egyidejű (teljes) optimalizálása és szekvenciális módon (1. burkolat, majd HVAC-optimalizálás). A különböző optimalizálási tartományok (burkolat és HVAC) és kényszerek szerint a különböző formák jobban teljesítenek. Az 5 amerikai városban a teljes optimalizálásban a téglalap alakú (AR 1) forma teljesíti a legjobban, míg az energiaköltségek teljes optimalizálásában a különböző formák adják a legjobb eredményeket.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. LCC (30 years) • Min. energiaköltségek 	<ul style="list-style-type: none"> • Oldal arány • Termélység / épületszárny • GR, ORI, STR, TM, SHADE • HVAC / energetikai rendszer 	<ul style="list-style-type: none"> a) Sequential search, PSO, GA b) DOE-2 	Nincs összefüggés a épületgeometriai tervezési változók és az optimalizálási eredmények között.
96	2013	Egy alagútban kialakított üvegház (1000 m ³) és egy 25 000 m ² -es gömb alakú városnéző geometria-optimalizálása, amelyet a meglévő londoni városnéző (Arch.: Norman Foster) ihletett: nagyjából becsült energiamegtakarítás. Az ellipszoid gömbgeometria tengelyaránya és ivaránya van a legnagyobb hatással az energiafelhasználásra, a legjobb tengelyarány 1,0-1,2 (közel forgásszimmetrikus kupola geometria). A tájolás nem befolyásolja jelentősen az eredményeket.	<ul style="list-style-type: none"> • Max. energiahatékonyság 	<ul style="list-style-type: none"> • Jelentős geometriai módosítás • Gömbgeometria aránya • Termélység / épületszárny • Magasság / halmazás • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	<ul style="list-style-type: none"> a) Parallel direct search based on ES (GA) b) Autodesk Ecotect c) Modified differentiation evolution method 	A geometriával kapcsolatos változók korlátozott száma és a számítások, modellezés és eredmények gyenge leírása.
57	2019	Egyszerű irodai épületblokkok geometriájának (energiaigényének) optimalizálása egy városnegyedben, megújuló energiaforrásokkal és egyidejűleg decentralizált multi-energiarendszerekkel (MES) párosítva. A sarokpontok vízszintes és függőleges helyzetének optimalizálása. A szélsőséges szén-dioxid-forgatókönyvek esetében az optimális formák szabályosak, míg a két szén-dioxid-forgatókönyv között a geometriák szabálytalanabbá válnak (a napfény- és napfényhasznosítás, a rendelkezésre álló alapterület és az ORI egyensúlyba hozása). Egymást követő optimalizálás: 1. geometriaoptimalizálás, majd energiarendszer és napenergia-potenciál optimalizálása. Beágyazott optimalizálás: a geometria, az energia- és a napenergia optimalizálása egyszerre történik. Az egymást követő optimális formák E-D-i ORI-vel, míg a fészkelt formák izotróp testekkel rendelkeznek. Az alakzat és az energiarendszer kölcsönösen függnek egymástól, és egyszerre kell optimalizálni őket.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. beruházási költség • Min. üzemeltetési költség • Min. üzemeltetési szén-dioxid-kibocsátás 	<ul style="list-style-type: none"> • Geometria generálás energetikai értékeléssel • Magasság / halmazás • Elrendezés sarkainak koordinátái 	<ul style="list-style-type: none"> b) EnergyPlus c) RBFOpt (Radial Basis Function Optimization) 	Black-box optimalizáló, mivel a geometriai optimalizálási problémát nehéz analitikusan megoldani, és a szimulációs program összetett. Korlátozottan egyszerűsített geometriák. Bár az alak hatással van az energiaszükségletre, a rendszer hatékonyságára és a megújuló energia potenciáljára, az energiarendszerekre vonatkozó bizonyos előzetes döntések nem befolyásolhatják az épületek sűrűségét, az ORI-t és az alakokat.

47	2020	Egy lakótömb (8000 m ³ , 4-8 szint; 2673 m ² , 6 szint) többobjektív épületforma- és burkolatoptimalizálása. I. fázis: közös lineáris (I), L- (L), udvari (O), C- (C), T- (T), H- (H), kereszt (X) és Y-alakú (Y) épületek geometriaoptimalizálása (LOD 100) WWR és ORI opciókkal. Az O, T, H, X és Y alakú épületek Pareto-optimalis megoldásokként működnek. Ennek fő oka e testek önárnyékoló hatása és az SF minimalizálása. Az I. fázis kimeneteként kapott optimális épületgeometria a II. fázis bemenete, amely passzív és aktív stratégiákat alkalmaz (LOD 300) a további optimalizáláshoz.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. fűtési igény • Min. hűtési igény • Min. energiaköltségek • Min. beruházási költség • Min. CO2 kibocsátás 	<ul style="list-style-type: none"> • Alak arány (SP) • Geometria generálás energetikai értékeléssel • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	<ul style="list-style-type: none"> a) active-archive NSGA-II b) EnergyPlus c) Own developed calculation platform 	A generációs és populációs méret meghatározása nem indokolt (csak a szakirodalom szerint). Geometriai optimalizálás azonos hasznos alapterületre és térfogatra, miközben figyelmen kívül hagyja a különböző formák eltérő burkolatméreteit és beruházási költségeit. Többszintes tömbökre csak egyzónás hőtechnikai szimulációs modellek számítása. Ez az egyszerűsítés pontatlan vagy irreális eredményekhez vezet. GA, ezért csak közel optimális megoldások, véletlenszerű generálás és ezért feltételezett következtetések. Az épületfizikai teljesítményre vonatkozó következtetések nem újjak.
----	------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

E. függelék - épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizációs kutatás, beleértve az épületformák generálását az eseti változatok létrehozásához (folytatás)

Ref. No.	Év	Téma és eredmények	Célfüggvény	Épületgeometria tervezési változók	a) Algoritmus b) Szimulációs motor c) Keretrendszer / Módszer	Korlátozások
99	2002	Többszalagos ház elrendezésének optimalizálási problémája: egymáshoz kapcsolódó téglalap alakú terek legjobb helyének és méretének megtalálása. 2d-alaprajz és topológia automatizált generálása. Interaktív optimalizációs eszköz (www.ode.engin.umrich.edu). Gradiens alapú algoritmus a 2d-geometria generálásához és hibrid helyi-globális módszerek. (1) 2 téregység pozícióinak felcserélése, (2) a pozíciók perturbálása, (3) egy téregység méretének csökkentése. Topológiai döntések heurisztikus globális módszerekkel a térben lévő helyiségek közötti legjobb kapcsolatrendszer megtalálására. Az átfedések korlátozása, a terek, utak és bejáratok kapcsolatainak szabályozása és burkolása.	<ul style="list-style-type: none"> • Min. fűtési költség • Min. hűtési költség • Min. világítási költség • Min. hozzáférések • Min. előszoba, folyosó (max. élettér) 		<ul style="list-style-type: none"> a) SA, GA, Hybrid SA/SQP c) Maximum Distance Distribution Method (MDDM), C implementation of Feasible Sequential Quadratic Programming (CFSQP). 	2-d geometria generálására korlátozódik. Nagyon korlátozott energia számítások és eredmények nem kerülnek bemutatásra. Nincs optimalizálás az energiateljesítményben.

48	2019	<p>Saját fejlesztésű többcélú optimalizálási technika 5 magas irodaház (384; 512; 610; 768; 896 m²) számára 5 városi sűrűségű (UD) területen. A TDT 12,2%-kal, a fűtés 17%-kal és a hűtés 35%-kal csökkent. Automatizált úrlapgenerálás (szabályok szerint), szimuláció, optimalizálás. Saját fejlesztésű "épület moduláris cellák" (BMC) geometria-generálási technika, amely 4x4-es rácshálós raszteren alapul. TDT validálás mintateremben végzett mérésekkel. Nagyobb sűrűség ajánlott (több mint 50% BMC). Az udvarokat a telek közepére vagy S-i részére kell elhelyezni. Közel kocka alakú formák előnyben részesülnek: A fél-CY, CY és U formák a leggyakoribb optimális megoldások $RC \geq 0,75-0,89$ értékkel sűrű városi területeken, mivel udvaraik télen melegebbek, nyáron pedig hűvösebbek a környezethez képest. Az alacsony UD-értékű területeken a fél-CY és fél-L alaprajzot kell előnyben részesíteni $RC 0,85-0,98$ értékkel. Általában a magasabb BMC minden környezetben jobb energia- és komfortteljesítményt eredményez. A keleti és nyugati homlokzatokon a szabályok szerint az alacsony szögben érkező napsugárzás visszautasítása érdekében üres helyeket kell alkalmazni, miközben lehetővé kell tenni a napenergia nyereségét a déli oldalról.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Min. fűtési igény • Min. hűtési igény • Min. TDT 	<ul style="list-style-type: none"> • Geometria generálás energetikai értékeléssel • Magasság / halmozás • Városi környezet • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	<p>a) GA, SPEA-2 b) EnergyPlus, c) Energy Efficient Form-finder (EEF), GH, Octopus</p>	<p>A nem zárt udvari formájú fél-CY-alaprajz a legnagyobb fűtési és hűtési megtakarítást eredményezi - ez a forma a forró-sivatagi éghajlaton jellemző iráni népszokás -, így az eredmény igazolta a már meglévő empirikus ismereteket. Az épületfizikai eredmények nem nyújtanak újdonságot.</p>
49	2019	<p>Magas lakóépületek elrendezésének optimalizálása. A GA 2 fázisban generálja az alaprajzokat: a különböző szárnyak kombinációja az alakzat kialakításához és a lakások elrendezése a szárnyakban. A napenergia és a szél figyelembevétele. A geometria optimalizálásával (hosszúak I alakú, kis lakásokkal rendelkező épületek) 33%-os árammegtakarítás érhető el a váltóáram és a világítás terén. További 16%-os üzemeltetési villamosenergia-csökkentés a természetes szellőzés alkalmazásával érhető el, főként az átmeneti évszakokban. Az elrendezés az éghajlati viszonyoktól, a telekviszonyoktól, az anyagoktól és a használati paramétereiktől függően változhat.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Min. AC energia igény • Min. világítási energiaigény 	<ul style="list-style-type: none"> • Alapterület • Geometria generálás energetikai értékeléssel • Fal hossza / területe • Termélység / épületszárny • Magasság / halmozás • Szárnyak elfordulási szöge • GR, ORI, STR, TM, SHADE 	<p>a) GA, Sherman-Grimrud algorithm b) DOE-2.2., MathWorks c) Matlab</p>	<p>GA, ezért csak közel optimális megoldások, "ad-hoc" véletlenszerű generálás. Az épületfizikai teljesítményre vonatkozó következtetések nem újak. A generáció és a populáció méretének meghatározása nem indokolt.</p>

9.2. Irodalomjegyzék

- [1] U. Acar, O. Kaska, and N. Tokgoz, “Multi-objective optimization of building envelope components at the preliminary design stage for residential buildings in Turkey,” *J. Build. Eng.*, vol. 42, no. March, p. 102499, 2021, doi: 10.1016/j.jobbe.2021.102499.
- [2] M. Rabani, H. Bayera Madessa, and N. Nord, “Achieving zero-energy building performance with thermal and visual comfort enhancement through optimization of fenestration, envelope, shading device, and energy supply system,” *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 44, no. January, p. 101020, 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101020.
- [3] C. Hausladen, Gerhard; Saldanha, Michael; Liedl, Petra; Sager, *Climate Design*. 2005.
- [4] A. Sadooghi, C. Kibert, F. M. Sadeghi, and S. Jafari, “Thermal performance analysis of a traditional passive cooling system in Dezful, Iran,” *Tunn. Undergr. Sp. Technol.*, vol. 83, no. May 2018, pp. 291–302, 2019, doi: 10.1016/j.tust.2018.09.024.
- [5] C. E. Ochoa and I. G. Capeluto, “Strategic decision-making for intelligent buildings: Comparative impact of passive design strategies and active features in a hot climate,” *Build. Environ.*, vol. 43, no. 11, pp. 1829–1839, 2008, doi: 10.1016/j.buildenv.2007.10.018.
- [6] X. Cao, X. Dai, and J. Liu, “Building energy-consumption status worldwide and the state-of-the-art technologies for zero-energy buildings during the past decade,” *Energy Build.*, vol. 128, no. October 2017, pp. 198–213, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2016.06.089.
- [7] IEA and UNEP, *2019 Global Status Report for Buildings and Construction*, vol. 224. 2019.
- [8] M. Fesanghary, S. Asadi, and Z. W. Geem, “Design of low-emission and energy-efficient residential buildings using a multi-objective optimization algorithm,” *Build. Environ.*, vol. 49, no. 1, pp. 245–250, 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.09.030.
- [9] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz, and C. Pout, “A review on buildings energy consumption information,” *Energy Build.*, vol. 40, no. 3, pp. 394–398, 2008, doi: 10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
- [10] C. R. Lemke, *ArchitekturForm & Solarenergie*. 2009.
- [11] C. Menezo, S. Lepers, P. Depecker, and J. Virgone, “Design of buildings shape and energetic consumption,” *Build. Environ.*, vol. 36, no. 5, pp. 627–635, 2001.
- [12] A. AlAnzi, D. Seo, and M. Krarti, “Impact of building shape on thermal performance of office buildings in Kuwait,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 3, pp. 822–828, 2009, doi: 10.1016/j.enconman.2008.09.033.
- [13] J. M. Santos-Herrero, J. M. Lopez-Guede, and I. Flores-Abascal, “Modeling, simulation and control tools for nZEB: A state-of-the-art review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 142, no. February, p. 110851, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110851.
- [14] A. Brambilla, G. Salvalai, C. Tonelli, and M. Imperadori, “Comfort analysis applied to the international standard ‘Active House’: The case of RhOME, the winning prototype of Solar Decathlon 2014,” *J. Build. Eng.*, vol. 12, no. June, pp. 210–218, 2017, doi: 10.1016/j.jobbe.2017.05.017.
- [15] O. Suzer, “Analyzing the compliance and correlation of LEED and BREEAM by conducting a criteria-based comparative analysis and evaluating dual-certified projects,” *Build. Environ.*, vol. 147, no. September 2018, pp. 158–170, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.09.001.
- [16] D. Licina and S. Langer, “Indoor air quality investigation before and after relocation to WELL-certified office buildings,” *Build. Environ.*, vol. 204, no. July, p. 108182, 2021, doi:

10.1016/j.buildenv.2021.108182.

- [17] S. C. Turner *et al.*, “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy,” *Am. Soc. Heating, Refrig. Air-Conditioning Eng. Inc.*, 2010, doi: 10.1016/0140-7007(79)90114-2.
- [18] Y. K. Juan, P. Gao, and J. Wang, “A hybrid decision support system for sustainable office building renovation and energy performance improvement,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 3, pp. 290–297, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.09.006.
- [19] J. S. Gero, N. D’Cruz, and A. D. Radford, “Energy in context: A multicriteria model for building design,” *Build. Environ.*, vol. 18, no. 3, pp. 99–107, 1983, doi: 10.1016/0360-1323(83)90001-X.
- [20] A. T. Nguyen, S. Reiter, and P. Rigo, “A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1043–1058, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.061.
- [21] X. Shi, Z. Tian, W. Chen, B. Si, and X. Jin, “A review on building energy efficient design optimization from the perspective of architects,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 65, pp. 872–884, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.07.050.
- [22] U.S. Department of Energy, “Buildings energy databook,” *Energy Effic. Renew. Energy Dep.*, p. 286, 2012, [Online]. Available: <http://buildingsdatabook.eren.doe.gov/DataBooks.aspx>.
- [23] C. L. Gupta, “A systematic approach to optimum thermal design,” *Build. Sci.*, vol. 5, no. 3–4, pp. 165–173, 1970, doi: 10.1016/0007-3628(70)90006-X.
- [24] F. Kheiri, “A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 92, no. May 2017, pp. 897–920, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.080.
- [25] V. Machairas, A. Tsangrassoulis, and K. Axarli, “Algorithms for optimization of building design: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 31, no. 1364, pp. 101–112, 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.11.036.
- [26] B. Liu and D. Rodriguez, “Renewable energy systems optimization by a new multi-objective optimization technique: A residential building,” *J. Build. Eng.*, vol. 35, no. November 2020, p. 102094, 2021, doi: 10.1016/j.job.2020.102094.
- [27] M. Palonen, M. Hamdy, and A. Hasan, “Mobo a new software for multi-objective building performance optimization,” *Proc. BS 2013 13th Conf. Int. Build. Perform. Simul. Assoc.*, no. August, pp. 2567–2574, 2013.
- [28] Z. Yu, Z. Gou, F. Qian, J. Fu, and Y. Tao, “Towards an optimized zero energy solar house: A critical analysis of passive and active design strategies used in Solar Decathlon Europe in Madrid,” *J. Clean. Prod.*, vol. 236, p. 117646, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117646.
- [29] M. M. Saad and M. T. Araji, “Co-model for urban density permutations and building form optimization with high-performance energy criteria,” *J. Build. Eng.*, vol. 43, no. August, p. 103109, 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.103109.
- [30] B. Huang *et al.*, “A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of Building Materials,” *One Earth*, vol. 3, no. 5, pp. 564–573, 2020, doi: 10.1016/j.oneear.2020.10.010.
- [31] S. N. Al-Saadi and K. S. Al-Jabri, “Optimization of envelope design for housing in hot climates using a genetic algorithm (GA) computational approach,” *J. Build. Eng.*, vol. 32, no. May, 2020, doi: 10.1016/j.job.2020.101712.
- [32] F. Ascione, N. Bianco, G. Maria Mauro, and D. F. Napolitano, “Building envelope design: Multi-objective optimization to minimize energy consumption, global cost and thermal

- discomfort. Application to different Italian climatic zones,” *Energy*, vol. 174, pp. 359–374, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.02.182.
- [33] J. Ferdyn-Grygierek and K. Grygierek, “Multi-Variable optimization of building thermal design using genetic algorithms,” *Energies*, vol. 10, no. 10, 2017, doi: 10.3390/en10101570.
- [34] T. Hong, J. Kim, and M. Lee, “A multi-objective optimization model for determining the building design and occupant behaviors based on energy, economic, and environmental performance,” *Energy*, vol. 174, pp. 823–834, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.02.035.
- [35] M. Hamdy, “IMPLEMENTATION OF PARETO-ARCHIVE NSGA-II ALGORITHMS TO A NEARLY-ZERO-ENERGY BUILDING OPTIMISATION PROBLEM,” no. January, 2012.
- [36] H. Li and S. Wang, “Coordinated optimal design of zero/low energy buildings and their energy systems based on multi-stage design optimization,” *Energy*, vol. 189, p. 116202, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116202.
- [37] F. Harkouss, F. Fardoun, and P. H. Biwole, “Passive design optimization of low energy buildings in different climates,” *Energy*, vol. 165, pp. 591–613, 2018, doi: 10.1016/j.energy.2018.09.019.
- [38] H. B. Gunay, M. Ouf, G. Newsham, and W. O’Brien, “Sensitivity analysis and optimization of building operations,” *Energy Build.*, vol. 199, pp. 164–175, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.06.048.
- [39] A. Toutou, M. Fikry, and W. Mohamed, “The parametric based optimization framework daylighting and energy performance in residential buildings in hot arid zone,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 57, no. 4, pp. 3595–3608, 2018, doi: 10.1016/j.aej.2018.04.006.
- [40] Y. Ke, J. Xie, and S. Pouramini, “Utilization of an improved crow search algorithm to solve building energy optimization problems: Cases of Australia,” *J. Build. Eng.*, vol. 38, no. January, p. 102142, 2021, doi: 10.1016/j.jobee.2020.102142.
- [41] M. Ilbeigi, M. Ghomeishi, and A. Dehghanbanadaki, “Prediction and optimization of energy consumption in an office building using artificial neural network and a genetic algorithm,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 61, no. June, p. 102325, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102325.
- [42] D. J. Gerber, E. Pantazis, and A. Wang, “A multi-agent approach for performance based architecture: Design exploring geometry, user, and environmental agencies in façades,” *Autom. Constr.*, vol. 76, pp. 45–58, 2017, doi: 10.1016/j.autcon.2017.01.001.
- [43] H. Kim and M. J. Clayton, “A multi-objective optimization approach for climate-adaptive building envelope design using parametric behavior maps,” *Build. Environ.*, vol. 185, no. 2020, p. 107292, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107292.
- [44] W. S. M. Abdel-Rahman, “Thermal performance optimization of parametric building envelope based on bio-mimetic inspiration,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 1133–1142, 2021, doi: 10.1016/j.asej.2020.07.007.
- [45] J. H. Lee, “Optimization of indoor climate conditioning with passive and active methods using GA and CFD,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 9, pp. 3333–3340, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.08.029.
- [46] Y. K. Yi and A. M. Malkawi, “Optimizing building form for energy performance based on hierarchical geometry relation,” *Autom. Constr.*, vol. 18, no. 6, pp. 825–833, 2009, doi: 10.1016/j.autcon.2009.03.006.
- [47] A. Ciardiello, F. Rosso, J. Dell’Olmo, V. Ciancio, M. Ferrero, and F. Salata, “Multi-objective approach to the optimization of shape and envelope in building energy design,” *Appl. Energy*, vol. 280, no. October, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115984.

- [48] K. Javanroodi, V. M. Nik, and M. Mahdavinejad, "A novel design-based optimization framework for enhancing the energy efficiency of high-rise office buildings in urban areas," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 49, no. May, p. 101597, 2019, doi: 10.1016/j.scs.2019.101597.
- [49] V. J. L. Gan, H. K. Wong, K. T. Tse, J. C. P. Cheng, I. M. C. Lo, and C. M. Chan, "Simulation-based evolutionary optimization for energy-efficient layout plan design of high-rise residential buildings," *J. Clean. Prod.*, vol. 231, pp. 1375–1388, 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.324.
- [50] E. Gratia and A. De Herde, "Design of low energy office buildings," *Energy Build.*, vol. 35, no. 5, pp. 473–491, 2003, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00160-3.
- [51] R. Ourghi, A. Al-Anzi, and M. Krarti, "A simplified analysis method to predict the impact of shape on annual energy use for office buildings," *Energy Convers. Manag.*, vol. 48, no. 1, pp. 300–305, 2007, doi: 10.1016/j.enconman.2006.04.011.
- [52] J. H. Kämpf, M. Montavon, J. Bunyesc, R. Bolliger, and D. Robinson, "Optimisation of buildings' solar irradiation availability," *Sol. Energy*, vol. 84, no. 4, pp. 596–603, 2010, doi: 10.1016/j.solener.2009.07.013.
- [53] W. Wang, H. Rivard, and R. Zmeureanu, "Floor shape optimization for green building design," *Adv. Eng. Informatics*, vol. 20, no. 4, pp. 363–378, 2006, doi: 10.1016/j.aei.2006.07.001.
- [54] T. L. Hemsath and K. Alagheband Bandhosseini, "Sensitivity analysis evaluating basic building geometry's effect on energy use," *Renew. Energy*, vol. 76, pp. 526–538, 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.11.044.
- [55] C. Hachem, A. Athienitis, and P. Fazio, "Investigation of solar potential of housing units in different neighborhood designs," *Energy Build.*, vol. 43, no. 9, pp. 2262–2273, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.05.008.
- [56] U. T. Aksoy and M. Inalli, "Impacts of some building passive design parameters on heating demand for a cold region," *Build. Environ.*, vol. 41, no. 12, pp. 1742–1754, 2006, doi: 10.1016/j.buildenv.2005.07.011.
- [57] C. Waibel, R. Evins, and J. Carmeliet, "Co-simulation and optimization of building geometry and multi-energy systems: Interdependencies in energy supply, energy demand and solar potentials," *Appl. Energy*, vol. 242, no. November 2018, pp. 1661–1682, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.177.
- [58] Y. Fang and S. Cho, "Design optimization of building geometry and fenestration for daylighting and energy performance," *Sol. Energy*, vol. 191, no. August, pp. 7–18, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.08.039.
- [59] T. L. Hemsath and K. A. Bandhosseini, "Building design with energy performance as primary agent," *Energy Procedia*, vol. 78, pp. 3049–3054, 2015, doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.722.
- [60] Y. Mert and N. Saygin, "Energy efficient building block design: An exergy perspective," *Energy*, vol. 102, pp. 465–472, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.02.121.
- [61] V. Granadeiro, J. P. Duarte, J. R. Correia, and V. M. S. Leal, "Building envelope shape design in early stages of the design process: Integrating architectural design systems and energy simulation," *Autom. Constr.*, vol. 32, no. September, pp. 196–209, 2013, doi: 10.1016/j.autcon.2012.12.003.
- [62] E. Rodrigues, M. S. Fernandes, N. Soares, Á. Gomes, A. R. Gaspar, and J. J. Costa, "The potential impact of low thermal transmittance construction on the European design guidelines of residential buildings," *Energy Build.*, vol. 178, pp. 379–390, 2018, doi: 10.1016/j.enbuild.2018.08.009.
- [63] K. Javanroodi, M. Mahdavinejad, and V. M. Nik, "Impacts of urban morphology on reducing

- cooling load and increasing ventilation potential in hot-arid climate,” *Appl. Energy*, vol. 231, no. May, pp. 714–746, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.09.116.
- [64] Xuejun Cao, Zhijun He, and Yunhe Pan, “Automated design of house-floor layout with distributed planning,” *Comput. Des.*, vol. 22, no. 4, pp. 213–222, 1990, doi: 10.1016/0010-4485(90)90050-M.
- [65] T. Elezkurtaj and G. Franck, “Algorithmic support of creative architectural design,” *Organization*, no. February, pp. 1–16, 2002, [Online]. Available: <http://www.iemar.tuwien.ac.at/wp-content/uploads/2011/12/umbau19.pdf>.
- [66] J. Francisco, R. Costa, P. Doc, V. Manuel, and B. Murtinho, “Development of an algorithm which generates functional floor plans for residential buildings based on modular construction,” 2015.
- [67] Z. Guo and B. Li, “Evolutionary approach for spatial architecture layout design enhanced by an agent-based topology finding system,” *Front. Archit. Res.*, vol. 6, no. 1, pp. 53–62, 2017, doi: 10.1016/j.foar.2016.11.003.
- [68] W. Wang, R. Zmeureanu, and H. Rivard, “Applying multi-objective genetic algorithms in green building design optimization,” *Build. Environ.*, vol. 40, no. 11, pp. 1512–1525, 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.11.017.
- [69] M. Adamski, “Optimization of the form of a building on an oval base,” *Build. Environ.*, vol. 42, no. 4, pp. 1632–1643, 2007, doi: 10.1016/j.buildenv.2006.02.004.
- [70] G. M. Sisk, J. C. Miles, and C. J. Moore, “Designer Centered Development of GA-Based DSS for Conceptual Design of Buildings,” *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 3, pp. 159–166, 2003, doi: 10.1061/(asce)0887-3801(2003)17:3(159).
- [71] P. Geyer, “Component-oriented decomposition for multidisciplinary design optimization in building design,” *Adv. Eng. Informatics*, vol. 23, no. 1, pp. 12–31, 2009, doi: 10.1016/j.aei.2008.06.008.
- [72] R. Choudhary, A. Malkawi, and P. Y. Papalambros, “Analytic target cascading in simulation-based building design,” *Autom. Constr.*, vol. 14, no. 4, pp. 551–568, 2005, doi: 10.1016/j.autcon.2004.11.004.
- [73] J. Xu, J. H. Kim, H. Hong, and J. Koo, “A systematic approach for energy efficient building design factors optimization,” *Energy Build.*, vol. 89, pp. 87–96, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.12.022.
- [74] R. Z. Scott Bucking, Andreas Athienitis, “An Optimization Methodology To Evaluate the Effect Size of Incentives on Energy-cost Optimal Curves,” no. C, pp. 1844–1851, 2008.
- [75] N. A. D’Cruz and A. D. Radford, “A multicriteria model for building performance and design,” *Build. Environ.*, vol. 22, no. 3, pp. 167–179, 1987, doi: 10.1016/0360-1323(87)90005-9.
- [76] W. Yu, B. Li, H. Jia, M. Zhang, and D. Wang, “Application of multi-objective genetic algorithm to optimize energy efficiency and thermal comfort in building design,” *Energy Build.*, vol. 88, pp. 135–143, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.11.063.
- [77] D. A. Coley and S. Schukat, “Low-energy design: Combining computer-based optimisation and human judgement,” *Build. Environ.*, vol. 37, no. 12, pp. 1241–1247, 2002, doi: 10.1016/S0360-1323(01)00106-8.
- [78] A. T. Nguyen and S. Reiter, “Passive designs and strategies for low-cost housing using simulation-based optimization and different thermal comfort criteria,” *J. Build. Perform. Simul.*, vol. 7, no. 1, pp. 68–81, 2014, doi: 10.1080/19401493.2013.770067.
- [79] F. Flager, B. Welle, P. Bansal, G. Soremekun, and J. Haymaker, “Multidisciplinary process

- integration and design optimization of a classroom building,” *Electron. J. Inf. Technol. Constr.*, vol. 14, no. August, pp. 595–612, 2009.
- [80] H. Jedrzejuk and W. Marks, “Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilization. Basic theory,” *Build. Environ.*, vol. 37, no. 12, pp. 1379–1383, 2002, doi: 10.1016/S0360-1323(01)00101-9.
- [81] H. Jedrzejuk and W. Marks, “Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilization. Partial problems solution,” *Build. Environ.*, vol. 37, no. 12, pp. 1379–1383, 2002, doi: 10.1016/S0360-1323(01)00101-9.
- [82] H. Jedrzejuk and W. Marks, “Optimization of shape and functional structure of buildings as well as heat source utilization example,” *Build. Environ.*, vol. 37, no. 12, pp. 1379–1383, 2002, doi: 10.1016/S0360-1323(01)00101-9.
- [83] Y. Zou, Q. Zhan, and K. Xiang, “A comprehensive method for optimizing the design of a regular architectural space to improve building performance,” *Energy Reports*, vol. 7, pp. 981–996, 2021, doi: 10.1016/j.egyr.2021.01.097.
- [84] L. G. Caldas and L. K. Norford, “Genetic algorithms for optimization of building envelopes and the design and control of HVAC systems,” *J. Sol. Energy Eng. Trans. ASME*, vol. 125, no. 3, pp. 343–351, 2003, doi: 10.1115/1.1591803.
- [85] A. M. Malkawi, R. S. Srinivasan, Y. K. Yi, and R. Choudhary, “Decision support and design evolution: Integrating genetic algorithms, CFD and visualization,” *Autom. Constr.*, vol. 14, no. 1, pp. 33–44, 2005, doi: 10.1016/j.autcon.2004.06.004.
- [86] R. De Janeiro, “INTERACTIVE TOOL AIDING TO OPTIMISE THE BUILDING ENVELOPE Jean-Marie HAUGLUSTAINE and Sleiman AZAR LEMA – University of Liège AND OBJECTIVES,” *Simulation*, 2001.
- [87] B. Kiss and Z. Szalay, “Modular approach to multi-objective environmental optimization of buildings,” *Autom. Constr.*, vol. 111, no. November 2019, p. 103044, 2020, doi: 10.1016/j.autcon.2019.103044.
- [88] F. Ascione, N. Bianco, G. M. Mauro, and G. P. Vanoli, “A new comprehensive framework for the multi-objective optimization of building energy design: Harlequin,” *Appl. Energy*, vol. 241, no. October 2018, pp. 331–361, 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.03.028.
- [89] S. Yigit, “A machine-learning-based method for thermal design optimization of residential buildings in highly urbanized areas of Turkey,” *J. Build. Eng.*, vol. 38, no. January, p. 102225, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102225.
- [90] B. Lin *et al.*, “MOOSAS – A systematic solution for multiple objective building performance optimization in the early design stage,” *Build. Environ.*, vol. 200, no. May, p. 107929, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107929.
- [91] S. Wang, Y. K. Yi, and N. Liu, “Multi-objective optimization (MOO) for high-rise residential buildings’ layout centered on daylight, visual, and outdoor thermal metrics in China,” *Build. Environ.*, vol. 205, no. August, p. 108263, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.108263.
- [92] H. Design and I. Contexts, “A Grammar for the Patio Houses of the Medina of Marrakech,” 2001.
- [93] C. Guerritore and J. Duarte, “Rule-based systems in adaptation processes: a methodological framework for the adaptation of office buildings into housing,” *Des. Comput. Cogn. '18*, no. January, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-05363-5.
- [94] D. Tuhus-Dubrow and M. Krarti, “Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings,” *Build. Environ.*, vol. 45, no. 7, pp. 1574–1581,

- 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.01.005.
- [95] Y. Bichiou and M. Krarti, “Optimization of envelope and HVAC systems selection for residential buildings,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 12, pp. 3373–3382, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.08.031.
- [96] T. Ullrich, N. Silva, E. Eggeling, and D. W. Fellner, “Generative modeling and numerical optimization for energy efficient buildings,” *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 4756–4761, 2013, doi: 10.1109/IECON.2013.6699904.
- [97] J. H. Kämpf and D. Robinson, “Optimisation of building form for solar energy utilisation using constrained evolutionary algorithms,” *Energy Build.*, vol. 42, no. 6, pp. 807–814, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.11.019.
- [98] J. P. Duarte, J. M. Rocha, and G. D. Soares, “Unveiling the structure of the Marrakech Medina: A shape grammar and an interpreter for generating urban form,” *Artif. Intell. Eng. Des. Anal. Manuf. AIEDAM*, vol. 21, no. 4, pp. 317–349, 2007, doi: 10.1017/S0890060407000315.
- [99] J. J. Michalek, R. Choudhary, and P. Y. Papalambros, “Architectural layout design optimization,” *Eng. Optim.*, vol. 34, no. 5, pp. 461–484, 2002, doi: 10.1080/03052150214016.
- [100] L. Junghans and N. Darde, “Hybrid single objective genetic algorithm coupled with the simulated annealing optimization method for building optimization,” *Energy Build.*, vol. 86, pp. 651–662, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.10.039.
- [101] B. Si, Z. Tian, X. Jin, X. Zhou, P. Tang, and X. Shi, “Performance indices and evaluation of algorithms in building energy efficient design optimization,” *Energy*, vol. 114, pp. 100–112, 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.07.114.
- [102] E. G. Vakalo, A. M. Malkawi, and S. S. Emdanat, “AI-based shell for linking thermal and form-making considerations,” *Autom. Constr.*, vol. 8, no. 4, pp. 455–462, 1999, doi: 10.1016/S0926-5805(98)00092-2.
- [103] M. Wetter, “BuildOpt - A new building energy simulation program that is built on smooth models,” *Build. Environ.*, vol. 40, no. 8, pp. 1085–1092, 2005, doi: 10.1016/j.buildenv.2004.10.003.
- [104] S. M. C. Magalhães, V. M. S. Leal, and I. M. Horta, “Modelling the relationship between heating energy use and indoor temperatures in residential buildings through Artificial Neural Networks considering occupant behavior,” *Energy Build.*, vol. 151, pp. 332–343, 2017, doi: 10.1016/j.enbuild.2017.06.076.
- [105] A. I. Dale, “Thomas bayes, an essay towards solving a problem in the doctrine of chances (1764),” *Landmark Writings West. Math. 1640-1940*, vol. 53, no. April 2003, pp. 199–207, 2005, doi: 10.1016/B978-044450871-3/50096-6.
- [106] M. Krarti and R. Ouarghi, “Building Shape Optimization Using Neural Network and Genetic Algorithm Approach,” *ASHRAE Trans.*, vol. 112, Jan. 2006.
- [107] F. Ascione, N. Bianco, C. De Stasio, G. M. Mauro, and G. P. Vanoli, “A new methodology for cost-optimal analysis by means of the multi-objective optimization of building energy performance,” *Energy Build.*, vol. 88, pp. 78–90, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.11.058.
- [108] B. M. Adams *et al.*, “DAKOTA, A Multilevel Parallel Object Oriented Framework for Design Optimization, Parameter Estimation, Uncertainty Quantification, and Sensitivity Analysis,” *Manual*, no. December 2009, p. User Manual, 2010.
- [109] T. Hemker, K. R. Fowler, M. W. Farthing, and O. von Stryk, *A mixed-integer simulation-based optimization approach with surrogate functions in water resources management*, vol. 9, no. 4 SPEC. ISS. 2008.

- [110] L. Magnier and F. Haghghat, “Multiobjective optimization of building design using TRNSYS simulations, genetic algorithm, and Artificial Neural Network,” *Build. Environ.*, vol. 45, no. 3, pp. 739–746, 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.08.016.
- [111] B. Eisenhower, Z. O’Neill, S. Narayanan, V. A. Fonoberov, and I. Mezić, “A methodology for meta-model based optimization in building energy models,” *Energy Build.*, vol. 47, pp. 292–301, 2012, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.12.001.
- [112] J. Chen, X. Gao, Y. Hu, Z. Zeng, and Y. Liu, “A meta-model-based optimization approach for fast and reliable calibration of building energy models,” *Energy*, vol. 188, p. 116046, 2019, doi: 10.1016/j.energy.2019.116046.
- [113] R. A. Lara *et al.*, “Optimization Tools for Building Energy Model Calibration,” *Energy Procedia*, vol. 111, no. September 2016, pp. 1060–1069, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.269.
- [114] R. D. Judkoff *et al.*, “Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs,” *ASHRAE Stand.*, vol. 8400, no. 140.2004, 2004.
- [115] R. Judkoff, “BESTEST: Test Procedures ‘Building Energy Simulation’ Tools,” *2014 Build. Technol. Off. Peer Rev.*, 2014, [Online]. Available: https://energy.gov/sites/prod/files/2014/10/f18/emt62_Judkoff_042214.pdf.
- [116] A. P. Ramallo-González and D. A. Coley, “Using self-adaptive optimisation methods to perform sequential optimisation for low-energy building design,” *Energy Build.*, vol. 81, no. September 2012, pp. 18–29, 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.05.037.
- [117] F. Kheiri, “A review on optimization methods applied in energy-efficient building geometry and envelope design,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 92, no. March, pp. 897–920, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.04.080.
- [118] F. Goia, M. Haase, and M. Perino, “Optimizing the configuration of a façade module for office buildings by means of integrated thermal and lighting simulations in a total energy perspective,” *Appl. Energy*, vol. 108, pp. 515–527, 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.02.063.
- [119] V. Ž. Leskovar and M. Premrov, “An approach in architectural design of energy-efficient timber buildings with a focus on the optimal glazing size in the south-oriented façade,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 12, pp. 3410–3418, 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.09.003.
- [120] P. Heiselberg, H. Brohus, A. Hesselholt, H. Rasmussen, E. Seinre, and S. Thomas, “Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings,” *Renew. Energy*, vol. 34, no. 9, pp. 2030–2036, 2009, doi: 10.1016/j.renene.2009.02.016.
- [121] N. Zhang, W. Jin, and J. He, “Experimental Study on the Influence of Ventilated Window on Indoor Air Quality and Energy Consumption,” *Procedia Eng.*, vol. 146, pp. 296–302, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.394.
- [122] F. Friedler, K. Tarján, Y. W. Huang, and L. T. Fan, “Graph-theoretic approach to process synthesis: axioms and theorems,” *Chem. Eng. Sci.*, vol. 47, no. 8, pp. 1973–1988, 1992, doi: 10.1016/0009-2509(92)80315-4.
- [123] H. Cabezas, I. Heckl, B. Bertok, and F. Friedler, “Use the P-graph framework to design supply chains for sustainability,” *Chem. Eng. Prog.*, vol. 111, no. 1, pp. 41–47, 2015.
- [124] Z. Ercsey, “Process network solution of a clothing manufacturer’s problem,” *Pollack Period.*, vol. 12, no. 1, pp. 59–67, 2017, doi: 10.1556/606.2017.12.1.5.
- [125] B. Bertok and A. Bartos, “Renewable energy storage and distribution scheduling for microgrids by exploiting recent developments in process network synthesis,” *J. Clean. Prod.*, vol. 244, p. 118520, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118520.

- [126] A. Nagy, Z. Ercsey, J. Tick, and Z. Kovács, “Bus transport process network synthesis,” *Acta Polytech. Hungarica*, vol. 16, no. 7, pp. 25–43, 2019, doi: 10.12700/APH.16.7.2019.7.2.
- [127] T. Holczinger, O. Ósz, and M. Hegyháti, *Scheduling approach for on-site jobs of service providers*, vol. 32, no. 4. Springer US, 2020.
- [128] S. Moret, M. Noro, and K. Papamichael, “Daylight harvesting: A multivariate regression linear model for predicting the impact on lighting, cooling and heating,” *Build. Simul. Appl.*, vol. 2013-Janua, pp. 39–48, 2013.
- [129] J. Lee, M. Boubekri, and F. Liang, “Impact of building design parameters on daylighting metrics using an analysis, prediction, and optimization approach based on statistical learning technique,” *Sustain.*, vol. 11, no. 5, 2019, doi: 10.3390/su11051474.
- [130] N. Kwon, Y. Ahn, B. Son, and H. Moon, “Developing a machine learning-based building repair time estimation model considering weight assigning methods,” *J. Build. Eng.*, vol. 43, no. January, p. 102627, 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102627.
- [131] M. Sajjad *et al.*, “Towards efficient building designing: Heating and cooling load prediction via multi-output model,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 22, pp. 1–19, 2020, doi: 10.3390/s20226419.
- [132] N. Aghdaei, G. Kokogiannakis, D. Daly, and T. McCarthy, “Linear regression models for prediction of annual heating and cooling demand in representative Australian residential dwellings,” *Energy Procedia*, vol. 121, pp. 79–86, 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.07.482.
- [133] J. C. Lam, K. K. W. Wan, D. Liu, and C. L. Tsang, “Multiple regression models for energy use in air-conditioned office buildings in different climates,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 12, pp. 2692–2697, 2010, doi: 10.1016/j.enconman.2010.06.004.
- [134] L. Danza, L. Belussi, and F. Salamone, “A multiple linear regression approach to correlate the Indoor Environmental Factors to the global comfort in a Zero-Energy building,” *E3S Web Conf.*, vol. 197, 2020, doi: 10.1051/e3sconf/202019704002.
- [135] V. S. K. V Harish and A. Kumar, “A review on modeling and simulation of building energy systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 1272–1292, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.040.
- [136] K. Peippo, P. D. Lund, and E. Vartiainen, “Multivariate optimization of design trade-offs for solar low energy buildings,” *Energy Build.*, vol. 29, no. 2, pp. 189–205, 1999, doi: 10.1016/s0378-7788(98)00055-3.
- [137] B. Baranyai, B. Póth, and I. Kistelegdi, “Planning and research of smart buildings and constructions with the ‘energydesign roadmap’ method,” *Pollack Period.*, vol. 8, no. 3, pp. 15–26, 2013, doi: 10.1556/Pollack.8.2013.3.2.
- [138] S. Russel and P. Norvig, *Artificial Intelligence A Modern Approach Third Edition*, vol. 56, no. 1. 1995.
- [139] A. Saltelli, S. Tarantola, F. Campolongo, and M. Ratto, *Sensitivity analysis in practice: a guide to assessing scientific models (Google eBook)*. 2004.
- [140] P. Heiselberg, H. Brohus, A. Hesselholt, H. Rasmussen, E. Seinre, and S. Thomas, “Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings,” *Renew. Energy*, vol. 34, no. 9, pp. 2030–2036, 2009, doi: 10.1016/j.renene.2009.02.016.
- [141] M. D. Morris, “Factorial sampling plans for preliminary computational experiments,” *Technometrics*, vol. 33, no. 2, pp. 161–174, 1991, doi: 10.1080/00401706.1991.10484804.
- [142] R. D. ’ Agostino and E. S. Pearson, “Tests for Departure from Normality . Empirical Results for the Distributions of b_2 and $\sqrt{b_1}$,” *Oxford Univ. Press behalf Biometrika Trust Stable*, vol.

60, no. 3, pp. 613–622, 2016, [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/2335012>.

- [143] M. A. Stephens, “EDF statistics for goodness of fit and some comparisons,” *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 69, no. 347, pp. 730–737, 1974, doi: 10.1080/01621459.1974.10480196.
- [144] E. Ostertagová, “Modelling using polynomial regression,” *Procedia Eng.*, vol. 48, pp. 500–506, 2012, doi: 10.1016/j.proeng.2012.09.545.

9.3. Az értekezés témaköréhez kapcsolódó publikációk

Közvetlen publikálás előtt álló lektorált cikk világnyelven:

István Kistelegdi, Kristóf Roland Horváth, Tamás Storcz, Zsolt Ercsey, Building geometry as a variable in energy, comfort and environmental design optimization - a review from the perspective of architects, *Buildings*, 2021 – under major review

Zsolt Ercsey, Kristóf Horváth, István Kistelegdi, Energy Design Synthesis: algorithmic generation of the building configurations, várható megjelenés: 2022

Storcz Tamás, István Kistelegdi, Kristóf Roland Horváth, Zsolt Ercsey, Applicability of multivariate linear regression in building physics optimization, várható megjelenés: 2022

Nemzetközi konferencia absztrakt

Kristóf, Horvath; István, Kistelegdi

Active House certification of the first Hungarian Active House under consideration of comfort, energy and environmental criteria system

In: Fülöp, Attila; Iványi, Péter (szerk.) Abstractbookforthe 14th Miklós Iványi International PhD & DLA Symposium: Architectural, Engineering and Information Sciences

Pécs, Magyarország: Pollack Press (2018) pp. 80-81. , 2 p.

10. Köszönetnyilvánítás

Ez a kutatás a Szentágothai János Kutatóközpont, a Pécsi Tudományegyetem Energia Design Kutatócsoportjának támogatásával készült.

Köszönöm témavezetőmnek, Dr. Kistelegdi István Professzor Úrnak a kutatómunkám végzéséhez szükséges feltételek, a megfelelő tudományos fórumokon való publikálási lehetőségek biztosítását és a szakirodalmi áttekintés megfogalmazásában nyújtott segítségét.

Köszönöm témavezetőmnek, Dr. Háber Istvánnak szakmai támogatását.

Köszönettel tartozom Dr. Ercsey Zsoltnak, Storcz Tamásnak és Vincze Nándornak a különféle szakmai támogatást, mely nélkül nem jöhetett volna létre ez a dolgozat. Storcz Tamásnak köszönöm a regressziós modellek létrehozásában nyújtott segítséget. Ercsey Zsoltnak külön köszönöm az

algoritmikus geometriagenerálásban nyújtott szakmai támogatását. Vincze Nándornak köszönöm az érzékenységvizsgálat lépéseinek feltérképezésében nyújtott segítséget.

Külön köszönettel tartozom Modar Alinak és Basma Nailinak a szimulációs modellek kiértékelésénél nyújtott segítségükért.

Pécs, 2021. december 6.

Horváth Kristóf Roland