



PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM

Breuer Marcell Doktori Iskola

TÉZISFÜZET

Horváth Kristóf Roland

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

című Ph.D. értekezéséhez

Témavezetők:

Prof. Dr. Kistelegdi István

kutató professzor

PTE, MIK

Dr. Háber István Ervin

adjunktus

PTE, MIK

Pécs, 2021

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	3
A kutatási probléma azonosítása	3
Kutatási célok.....	7
Hipotézis.....	8
Alkalmazott módszertan.....	8
A kutatás eredményei	10
Építészeti szabályrendszer megalkotása.....	10
A geometriai konfigurációk előállítása	11
Épületfizikai szimulációk elvégzése, értékelése és adatbázis megalkotása.....	11
Érzékenységvizsgálat elvégzése.....	11
Szimulációkat helyettesítő modellek tesztelése és értékelése	12
Új tudományos eredmények.....	12
Az értekezés kutatási és tudományos eredményeinek felhasználhatósága.....	13
Főbb szakirodalmi források.....	14
A szerző témával kapcsolatban megjelent publikációi.....	17

Bevezetés

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 burokok 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 energiaoptymalizálás nélkül, vagy több burkolat paramétert számol (pl. A falak és az ablakok termodinamikai és fometriai 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 megteremttem a feltételeit többcélú optimalizációs algoritmusok alkalmazására és egy későbbi öntanuló folyamat elindítására, mely tökéletesíteni fogja remélhetőleg eddigi megfigyeléseinket.

A kutatási probléma azonosítása

Az építőipar, a világ legnagyobb energiafogyasztó ágazata a világ energiafogyasztásának több mint 40%-áért felelős [3]. 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 [4]. 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 [4],[5], és az irodai és lakóépületek üzemeltetési fogyasztásának kb. 50%-át fűtésre, hűtésre, szellőzésre és légkondicionálásra fordítják [3], [6]. 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 klímaszemponutú 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 architektúra közötti interaktivitás a szükséges minimumra csökken, és a minimális iteratív tervbeállítások nem tudják biztosítani a forma, az anyagok és a rendszerek optimális kialakítását [7]. 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 [8], [9]. A későbbi döntéseket az építész a további tervezési munka fázisában hozza meg, figyelembe véve a burkolatszerkezeteket, anyagokat. Amelyek szintén erősen meghatározó tényezők az energiatervezésnél. Ennél fogva elengedhetetlen, hogy az építészmérnökök 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[10],[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[11],[12],[13]) 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 [14], [15]. **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"[16], 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.

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 [17] 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 [18]. 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[17].

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[19], de a publikációk számának jelentős növekedése csak 2000 után alakult ki [20], [17], [21]. 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 [22]. A mindennapi ipari rutinban az energiahatékony épülettervezésben az optimalizálás még mindig csak marginálisan alkalmazható: a tanulmányok kb. 30%-a alkalmazta technikáját valós épületeken [17]. 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.

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[17].

Ugyanakkor az épületforma a épületenergetikai, komfort és környezettudatos tervezési optimalizáció során lényeges, teljesítményt befolyásoló tervezési változó [8], [9], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35]. Az energiahatékony épületgeometriáról és épületburkolat tervezéséről szóló átfogó áttekintés [21] 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[21]. 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[36]. C. R. Lemke könyvében [7] 64 különböző épületgeometriát vizsgáltak építészeti formanyelvük és a szoláris nyereség szempontjából a maximalizált napenergia-termelő felület vs. a burkolaton keresztüli hővesztés minimalizálása (min-max antagonista probléma) viszonylatában. A formahatékony 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 [37] rámutat az épületgeometria korlátozott kihasználására az energiahatékony tervezés kutatásában. Hangsúlyozza, hogy míg egyes optimalizálási vizsgálatok túl messzire mennek a formai vizsgálatban azáltal, hogy nem praktikus összetett formákat generálnak [24], más tanulmányok rendkívül egyszerű formák megközelítését alkalmazzák, alig érintve a lehetőségek mélységét [36]. Arra a következtetésre jut a cikk szerzője, 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. 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 jelenlegi 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 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 szakirodalomban nem tulajdonítanak kellő szerepet ennek a tervezési aspektusnak, azaz további kutatásokra van szükség ezen a területen.

Kutatási célok

A doktori disszertációmban fel kívánom tárnai az építészeti tervezési folyamat során az energetikai és komfort (és ökológiai) optimum garantálásának feltételeit. Az Energia Design módszer [38] nem tudja biztosítani a garantált optimális épület megtalálását, mert korlátozott idő- és munkaráfordítás 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.

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

Hipotézis

Az értekezésben a kutatási célkitűzésekkel összhangban az alábbi hipotézist és annak elemeit vizsgáltam:

- a) Az Energia Design módszer nem tudja biztosítani a garantált optimális épület megtalálását, mert korlátozott idő- és munkaráfordítás mellett nem lehetséges az összes potenciális épületeset vizsgálata.
- b) 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 tényezők az energiával kapcsolatos épületfejlesztés tekintetében. Ezt esetlegesen egy érzékenységvizsgálat tudja alátámasztani.
- c) Érzékenységvizsgálat elvégzésére van szükség, ahhoz, hogy a meghatározott paraméterek közül kiválasztásra kerüljenek az adatbázis meghatározó változói.
- d) Az adott építészeti probléma moduláris megoldást igényel az összes potenciálisan megvalósítható épületkonfiguráció létrehozásához. Ennek a követelménynek az eléréséhez egy építészeti szabályrendszer szükségességét határoztam meg. A jelenlegi kutatás a szabályok és a geometriák generálásának kapcsolatára összpontosít, hogy az összes szabályoknak megfelelő geometriai konfigurációt elérjük. Ez az eredmény lehetővé teszi a javasolt módszer integrálását egy átfogó rendszerbe, mint szintézislépés.
- e) Az adatbázis létrehozása elengedhetetlen a bemeneti és kimeneti paraméterek összekapcsolásával összefüggések és azok hatéértékeinek felderítéséhez. Egy adatbázis építése döntő fontosságú az érzékenység vizsgálat vagy egy neurális hálózat kidolgozása szempontjából is. Egy másik cél az automatizálás és az érzékenységvizsgálat egyes lépéseinek felfedezése, és meghatározása, hogy ezen eljárások számára a megfelelő formában, megfelelő felbontással készítsünk adatbázist.
- f) Létezik olyan regressziós modell, mely alkalmas az épületszimulációs eredmények megfelelő pontosságú becslésére, hogy ily módon helyettesítse az adott épületszimulációs számításokat.

Alkalmazott módszertan

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 energiatakarékosság alapját képezi a passzív tervezési elemek felhasználásával [39], [40], [41]. 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.

1. A szakirodalom alapos áttekintése és vizsgálata után megállapításra került a megoldandó feladatok köre. Megállapítható volt az átfogó épület optimalizációs módszertan hiánya, mely a passzív építészeti eszközöket helyezi előtérbe, továbbá az épület geometria meghatározó szerepe. ezért egy többlépcsős optimalizációs módszertan kidolgozását tűztem ki célul.
2. A keresési tér meghatározásához egy építészeti szabályrendszert állítottam felállítása szükséges

3. Biztosítani kell a generáló módszer működését szabályokkal, és a generálási mód meghatározásával garantálni a megtalált geometriai esetek számát.
Az optimális épület megtalálásához nagyméretű adatbázis felépítésére van szükség.
4. A geometriákhoz módosító paraméterek meghatározása után elkészülnek az épületmodellek, melyek alkalmasak dinamikus épületfizikai szimulációk elvégzésére. A szimulációk során kapott különböző kimeneti értékek kiértékelését és összehasonlítását elvégeztem a bemeneti értékek rájuk gyakorolt hatásai alapján.
5. Az érzékenység vizsgálat alkalmas arra is, hogy kiválasztásra kerüljenek a legfontosabb bemeneti paraméterek. Az említett adatbázis elengedhetetlen a helyettesítő modellek megalkotásához. A helyettesítő modellekkel lehetséges a vizsgálandó épületesetek számának nagymértékű növelése. Az érzékenységvizsgálat alapján megállapítható, hogy a geometriai konfigurációk szerepe meghatározó a kimenetek szempontjából.
6. A szimulációs folyamatok elvégzését helyettesítő regressziós modellek megalkotása lehetővé teszi az adott tervezési feladat keretein belüli, de az adatbázison kívül eső értékekre való következtetést, jelentős számítási kapacitás csökkentésével. Így az optimum megtalálásának valószínűsége jelentősen növelhető.

A kutatás eredményei

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.

Építészeti szabályrendszer megalkotása

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 stratégiai 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.**

A geometriai konfigurációk előállítása

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 megfelelő 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.**

Épületfizikai szimulációk elvégzése, értékelése és adatbázis megalkotása

1. 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 többért: 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.**

Érzékenységvizsgálat elvégzése

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.**

Szimulációkat helyettesítő modellek tesztelése és értékelése

Egy nagyszámú épületesetet 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.

Új tudományos eredmények

Az Energia Design módszertan kiterjesztését vizsgáló értekezésem az alábbi új tudományos eredményeket tartalmazza:

Létrehoztam egy építészeti szabályrendszert az összes potenciálisan megvalósítható épületkonfiguráció létrehozásához. Egy koordináta rendszer alapú moduláris rendszert határoztam meg, melyben könnyen elhelyezhetőek az azonos méretű elemek/kötegek, melyek egymás mellé rendelve képesek egy épület tömegformáját képezni.

Előállítottam a kellő számú geometriai variációt egy backtracking elvű generáló algoritmussal. A geometriai konfigurációk algoritmikus generálása során az összes építészeti szabályoknak megfelelő konfigurációt azonosítottam és nem többet, nem kevesebbet. A bemutatott

módszerrel az összes lehetséges geometriai esetek számát 99%-al csökkentette - összesen 167 konfigurációt generált.

Épületeket definiáltam a geometriák alapján, majd szimulációs modelleket hoztam létre a geometriai esetekből és a peremfeltételek és bemeneti változók meghatározása után **végrehajtottam a szimulációs folyamatokat** és kiértékeltem azokat.

Igazoltam a geometria meghatározó szerepét az érzékenységvizsgálattal. A megvalósult adatbázis segítségével egy globális érzékenységvizsgálatot végeztem el, a tervezési változók és a kimeneti változók (komfort és energetikai eredmények) közötti összefüggések feltérképezése céljából.

Létrehoztam másod és harmad fokú lineáris regressziós modelleket, melyek képesek a szimulációs eredménynek megfelelő pontosságú előrejelzésére.

Az értekezés kutatási és tudományos eredményeinek felhasználhatósága

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 50.000 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 felülbíráltása 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.

Főbb szakirodalmi források

- [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.jobe.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] 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.
- [4] IEA and UNEP, *2019 Global Status Report for Buildings and Construction*, vol. 224. 2019.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] C. R. Lemke, *ArchitecturForm & Solarenergie*. 2009.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.jobe.2017.05.017.

- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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>.
- [19] 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.
- [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] 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.
- [22] 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.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] K. Javanroodi, V. M. Nik, and M. Mahdavinjad, "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.
- [27] 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.

- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] C. Hausladen, Gerhard; Saldanha, Michael; Liedl, Petra; Sager, *Climate Design*. 2005.
- [40] 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.
- [41] 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.

A szerző témával kapcsolatban megjelent publikációi

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

Storz 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.