

ÉRZÉKENYSÉGVIZSGÁLAT AZ ÉPÍTÉSZETI TERVEZÉS TÁMOGATÁSÁBAN

SENSITIVITY ANALYSIS SUPPORTING BUILDING DESIGN

Vincze Nándor^{0000-0001-6792-9664 1,2}, Storc Tamás^{0000-0003-1656-5463 3}, Kistelegdi István^{0000-0001-6212-7582 4},
Ercsey Zsolt^{0000-0002-7536-3688 3*}

¹ Szegedi Tudományegyetem, Juhász Gyula Pedagógusképző Kar, Informatika Alkalmazásai Tanszék

² Neumann János Egyetem, GAMF Műszaki és Informatikai Kar, Alaptudományi Tanszék

³ Pécsi Tudományegyetem, Műszaki és Informatikai Kar, Rendszer- és Szoftvertechnológiai Tanszék, Autonóm technológiák és Drón kutatócsoport

⁴ Óbudai Egyetem, Ybl Miklós Építéstudományi Kar, Építésmérnöki Intézet, Szimulációs Design Tanszék
<https://doi.org/10.47833/2023.2.CSC.011>

Kulcsszavak:

épületszimuláció
érzékenységelemzés
Morris Elementary Effect módszer
Enhanced Sampling for Uniformity
módszer
EE_Sampler_Mapper csomag

Keywords:

building design simulation
sensitivity analysis
Morris Elementary Effect method
Enhanced Sampling for Uniformity
method
EE_Sampler_Mapper package

Cikktörténet:

Beérkezett 2023. július 26.
Átdolgozva 2023. október 31.
Elfogadva 2023. november 8.

Összefoglalás

Az *Energia Design Synthesis (EDS)* módszer részeként épületszimulációs adatbázis készült egy feladatosztály minden családi ház építészeti konfigurációjához. Ebben a cikkben az éves hőenergia-igény kibocsátási paramétert tekintjük. A kimeneti paraméter érzékenységvizsgálatának eredményeként azonosítjuk a legfontosabb bemeneti paramétereket, amelyek befolyásolják az épületek energiahatékonyágát, és amelyek támogatják a további épülettervezést.

Abstract

Az part of the Energia Design Synthesis (EDS) method a building simulation database was set up for all family house building configurations within a class of problems. In this paper the annual heating energy demand output parameter is considered. Sensitivity analysis is performed to identify the most important input parameters that influence the buildings' energy efficacy and may support future building design.

1. Bevezetés

Európa elsődleges energia felhasználásának több, mint 40%-a épületeink létrehozására és üzemeltetésére vezethető vissza [1]. Az épített környezetünk energiaigénye drámai mértékben növekedett az elmúlt évtizedekben [2]. Nyilvánvaló, hogy mindez változásokat is indukált: releváns elvárások megjelenését hozta magával a gazdasági és a környezetvédelmi szempontok körében is. Így, az építőipar által okozott negatív környezeti hatások enyhítése és kiküszöbölése érdekében az utóbbi időben egyre gyakrabban kerülnek előtérbe a fenntartható épületek is. Ebben a vonatkozásban az épületek energia- és klímaérzékeny tervezésének folyamata kulcsfontosságú tényező, hiszen már maga a tervezési technika is felelős egy-egy megépítendő épület leendő teljesítményéért.

Számos tanulmány koncentrálna egyes részrendszerekre, az üzemeltetésre, a vezérlés optimalizálására, vagy rendszerezi az energiahatékony épülettervezési kutatást az alkalmazható

* Kapcsolattartó szerző.
E-mail cím: ercsey.zsolt@mik.pte.hu

optimalizálási algoritmusok, az építési területek, a tervezési változók valamilyen választott szempontjából. A szakirodalomban található megközelítések döntő többsége az optimális megoldást az alkalmazott hűtő, fűtő, légcserélő rendszereknek (Heating, Ventilation, Air Conditioning - HVAC), továbbá az épület falszerkezetének és a felhasználás jellegének változtatásával igyekszik elérni. Ugyanakkor jelenleg nincs olyan kutatási irány, amely az épületgeometriát, mint tervezési változót tekintené és annak hatásait vizsgálná az épületenergia-tervezés optimalizálásában [3]. Ez a helyzet azért is visszás, mert az épülettervezés területeit (forma/konfiguráció, burkolat, térszervezés stb.) átfogó passzív tervezési koncepció alkalmazásával jelentős, közel 80%-os energia megtakarítás is elérhető lehet [4]. Kutatócsoportunk ezen hiányosságból adódó problémák kezelésére, továbbá a bizonyíthatóan optimális épületformák vizsgálata céljából alakult.

Sajnos a hagyományos épülettervezési módszer az ipari gyakorlatban a korábbi tapasztalatok alapján csak egy, vagy nagyon korlátozott számú koncepciót generál. Ezt gyakran alátámasztja az is, hogy az építészek a tervezés művészi oldalát fontosabbnak tartják, mint a komplex épületfizikai szimulációkat és a bonyolult matematikai modelleket, amelyeket a tervezés kezdetétől értékelni kell. Így az építészeti terv elkészítése során, azaz a legalapvetőbb tervezési jellemzőként készül el az épület alakja a térszervezéssel vagy elrendezéssel együtt, és ehhez a formához tartozóan, ezt követően készül el a műszaki apparátus. Mindez azt is jelenti, hogy az általános épülettervezési eljárások valódi optimalizálást nem tartalmaznak, csupán néhány lehetőség közüli választás alapján folytatnak vizsgálatokat, így eleve sem garantálhatják az optimális közeli megoldás megtalálását és alkalmazását.

A 2010-es évek elejéről származó Energia Design tervezési módszer [5] egyesít néhány magas szintű mérnöki számítást a fenntartható építészeti tervezés megvalósítása érdekében, egyszerre figyelembe véve az energia igényeket és a humán komfort értékeket. A gyakorlatba is már bevezetett módszer korlátozott számú heurisztikus épuletszimulációt tartalmaz. Az iteratív tervezési folyamat előrehaladtával a választott tervezési koncepciók egyre nagyobb részletességgel kerülnek számszerűsítésre. A módszer 2015-ben megkapta a rangos Gábor Dénes-díjat a tudományos mérnöki innovációért és annak gyakorlati megvalósításáért. Elmondható, hogy az Energia Design módszer alkalmazása nagymértékben javítja a megtervezett épületek energiaigényét és komfort szintjét, de nem foglalkozik az optimalítás kérdéskörével.

Kutatócsoportunkkal az Energia Design kiterjesztéseként tekinthető Energia Design Synthesis (EDS) módszerrel dolgozunk. Az eredeti tervezési módszert a szintézis lépéssel kiegészítve, szigorú matematikai eszközökkel vizsgálunk feladatosztályokat, gyártási folyamatoknál már széles körben alkalmazott módszertanokhoz hasonlóan [6]. Az EDS egy egyedülálló technika, amely optimális épületeket biztosít a legmagasabb energiahatékonyság és a legjobb komfortérzet mellett adott feladatok tekintetében. Első lépéseként egy családi ház geometriai eseteit vizsgáltuk, ahol a családi ház 6 egyforma építőelemből, ún. blokkból épül fel [7]. Az első geometriai generálási szabályokat úgy határoztuk meg, hogy azok alapján létre lehessen hozni az összes építészeti megvalósítható és potenciálisan optimális épületformát, amely a vizsgált családi ház osztályba esik. Ehhez a moduláris térszerkezet kialakítása után (amely meghatározta a keresési teret) alapvető építészeti szabályrendszert dolgoztunk ki, amely szabályok minden lakható családi házra vonatkoztathatók axiomatikus szigorúsággal (pl. a 6 blokkból álló épület ne legyen 3 blokknál magasabb, mivel egy toronyház nem felelhet meg a családi ház kritériumainak). A generálás és építészeti egybevághóság vizsgálata után 167 elfogadott épületformáig jutott, amely geometriákat konfigurációnak neveztük. A kiválasztott 167 épületkonfiguráció felhasználásával két épületburkolati szerkezet-alternatívát, három padló-ablak aránytér arányt (FWR) és fal-ablak arányt (WWR), valamint kelet és nyugat között öt tájolási irányt alkalmaztunk, létrehozva összesen 5010 épületmodell esetet. A két szerkezetet tekintve az egyik megfelel egy családi ház hatósági előírások és szabályok szerinti minimumkövetelményeknek, míg a másik tulajdonságait tekintve közel van egy passzív házhoz. Az 5010 modellel dinamikus hőszimulációs számításokat végeztünk IDA ICE 4.8 szoftver segítségével (részletes időfüggő komfort és energetikai viselkedés elemzés, mely a helyi éghajlati viszonyokat is figyelembe veszi).

A jelen tanulmányban ezt a szimulációs adatbázist tekintjük vizsgálatunk tárgyának. Az éves fűtési hőenergiaigényt, mint vizsgált kimeneti paramétert választottuk. Bemeneti paraméterként a fent bemutatott épületkonfigurációk leírói, továbbá a szerkezet, WWR és tájolási irányok, mint input

változók szolgáltak a jelen vizsgálatokhoz. Hasonlóan a [8], a szimulációk eredményeiből kiindulva a jelen vizsgálata alapján azonosíthatóak a leginkább befolyásoló paraméterek és azok függőségei.

2. Érzékenységvizsgálat

2.1. Megközelítések

Az érzékenységelemzés módszereit általában akkor alkalmazzák, amikor a bemeneti paraméterek közül fontosabbak és azok összefüggéseinek azonosítása fontos szerepet játszik, azaz mérni és értékelni szükséges bizonyos változók egyedi fontosságát, illetve a változók együttes hatását. Más szóval, ez annak tanulmányozása, hogy a modell kimenetében lévő bizonytalanság hogyan osztható fel a modell bemenetében lévő bizonytalanság különböző forrásaival. Építészeti szempontból az érzékenységi elemzés meghatározza az egyes tervezési változók hozzájárulását a tervezési megoldás teljes teljesítményéhez. Ennek eredményeként a változók dinamikája vizsgálható. Érdemes megjegyezni, hogy a hatások nagyon eltérőek lehetnek, ezért a fontossági sorrend is jelentős lehet, továbbá egyéni és összesített hatás is előfordulhat. Az épülettervezés szempontjából ez azért érdekes, mivel az eredmények kiértékelése során az építészek megérthetik az épületek bemeneti paraméterei és az éves fűtési energiaigény közötti lehetséges összefüggéseket. Ezért már az első épületforma- és alaprajz készítési lépésben olyan szakértői döntések is szülehetnek, amelyek közvetlenül jelentős hatással lesznek a megépülő épületek energiafogyasztására és fenntarthatóságára.

Az érzékenységelemzési (továbbiakban SA) módszerek oszthatóak például a következőképpen: i) a globális érzékenységi módszerek több tervezési paramétert vesznek figyelembe, ii) a lokális érzékenységi módszerek egyetlen tervezési paraméter változása alapján értékelik a kimeneti variabilitást, és iii) a szűrés. A módszerek általában két szélső értéket vesznek figyelembe a kiválasztott tervezési paraméterek standard értékének mindkét oldalán annak értékelésére, hogy az épület teljesítménye mely tervezési paraméterekre lehet érzékeny.

Egyes helyi SA-alkalmazások a modellparamétereket változó bemenetnek tekintik, és céljuk annak felmérése, hogy ezek bizonytalansága hogyan befolyásolja a modell teljesítményét, lásd [9]. Az alkalmazások gyakran alkalmazzák az egyszeri megközelítést (One-At-a-Time vagy One-[faktor]-at-a-Time, rövidítve OAT), ahol a minta úgy van felépítve, hogy két mintavételi pont között csak egy bemeneti változó hatása érvényesüljön, míg az összes többi változó állandó marad; azaz a kimeneti változó egyéni hatásait vizsgáljuk. Más szóval OAT tervezésnek nevezzük, ha csak egy paraméter változtat értéket az egymást követő szimulációk között, azaz a kérdés az, hogy hogyan változik a kimeneti érték abban az esetben, ha csak az egyik bemeneti változó változott, a többi változó pedig állandó maradt vagy állandónak tekinthető. Más SA alkalmazások gyakran figyelembe veszik a bemeneti változók közötti interakciókat a bemeneti változók kimenetre gyakorolt hatásának vizsgálatokor is. Általánosságban elmondható, hogy a globális SA mintavételezést gyakrabban All-At-a-Time (vagy All-[factors]-At-a-Time, rövidítve AAT) megközelítéssel hajtják végre, ahol az összes vizsgált bemeneti tényezőt egyidejűleg változtatják. Következésképpen az egyes bemeneti változókra vonatkozó érzékenység figyelembe veszi az adott tényező közvetlen hatását, valamint azok együttes hatását is.

2.2. Alkalmazott módszerek

A modellek egyik legfontosabb eleme a bemeneti változók eloszlásának figyelembevétele, hiszen a bemeneti változók megfelelő típusának kiválasztása a mintavétel szempontjából kulcsfontosságú. A Morris módszer [10] egyenletes eloszlást igényel a $[0,1]$ intervallumon, de a gyakorlatban ez többnyire nem teljesíthető. Gyakran jól ismert eloszlások írják le a bemeneti változókat, például egységes, normál, lognormális vagy Weibull-eloszlás. Sok esetben a változók diszkrétnek, eloszlásuk nem ismerhető. Ennek a problémának a kiküszöbölésére speciális mintavételi módszereket alkalmaznak, és a kiválasztott módszer szolgál a későbbiekben az érzékenységvizsgálat alapjául. Például egyes eljárások a latin hiperkocka mintavételi technikákon alapulnak; mások távolságmértéken és egyenletességen alapulnak. Egy lehetséges megoldás az, ha a paraméterek szintjeit az eloszlásának kvantilisok adják, hogy a mintákban elérjük a változók egyenletes eloszlását; lásd például [11].

Vannak más eljárások is az egyenletesség elérésére. Ilyen például a [12], amelyet Sampling for Uniformity módszernek hívnak, és továbbfejlesztése a [13], amely az Enhanced Sampling for Uniformity módszerként ismert. Ez a Morris féle elemi effektusok (Elementary Effect) módszeren alapul, amikor is a változók megfelelő skálája mentén mérjük a változás hatását úgy, hogy egyszerre egy változó lép a mintában. Ez jól alkalmazható nagyobb számú változó esetén is, tekintettel a módszer kis számításigényére. Ez a módszer kombinálja a trajektóriák közti „spread” távolság mérték maximalizálásának elvét és az egyenletes eloszlás elvét a mintavételben. Ezt használjuk a továbbiakban a vizsgálatainkhoz.

Ha $y(x_1, x_2, \dots, x_k)$ egy kimeneti paraméter, az x_1, x_2, \dots, x_k bemeneti paraméterek függvényében, akkor az elemi effektusok az egyes változókra differenciahányadosként definiáltak a változók mintabeli változásának mértékével meghatározva. Az érzékenység Morris által javasolt mértékét az elemi effektusok μ_i mintaátlagja és szórása adja, illetve az elemi effektusok abszolút értékének μ_i^* mintaátlagja, amelyet Campolongo és munkatársai vezettek be [14] a μ_i mintaátlag korrekciójaként.

Az abszolút várható érték magas értéke a bemeneti változónak a kimenetre gyakorolt jelentős hatását mutatja. Az alacsony szórás azt jelenti, hogy a hatások állandóak, vagyis a kimenet ezen a változón monoton. A szórás magas értéke azt mutatja, hogy nem lineáris a hatás, vagy szignifikáns a kölcsönhatás a bemeneti változó és a többi bemeneti változó között. Ezért a jelentős paramétereket a $\mu^* - \sigma$ diagram azon része ábrázolja, ahol mindkét érzékenységi mérték magas. Továbbá, ha az elemi hatások eloszlása pozitív és negatív elemeket is tartalmaz, egyes hatások kiolthatják egymást, így még egy fontos változó esetén is alacsony μ értéket adnak. Ebben az esetben a modellt nem monotonnak tekintjük, lásd [15].

3. Eredmények

3.1. Modell input paraméterek

Jelen vizsgálatunk során 15 épülettervezési változót vettük figyelembe. Épülettervezési paraméterekként a szerkezetet, a fal ablak arányát, a tájolást választottuk. További, a különböző épületkonfigurációkhoz kapcsolódó bemeneti paramétereket választottunk, úgy mint tetőfelület (r), talajhoz kapcsolódó felület (g), erkély (b), külső falak (w); meghatározott élekkel és csúcsokkal együtt. Ezen túlmenően, az építészek által kiválasztott összetett leíró, nevezetesen a burkolófelület / padlófelület (A/S arány) is bemeneti változónak számított.

3.2. Számítások

Az érzékenységi elemzés célja itt az volt, hogy meghatározzuk a kiválasztott egyedi épülettervezési változók hozzájárulását a teljes energiateljesítményhez. Vagyis az éves energiaigényt leginkább befolyásoló változók sorrendjét kell meghatározni a hatékony vagy optimális épülettervezés támogatása érdekében.

Az eredményeket egy általunk írt Octave eljárás adja, mely meghívja az Enhanced Sampling for Uniformity módszert mintavételi stratégiaként, majd pedig az érzékenységi mértékek meghatározásához az elemi effektusok értékeket határozza meg minden input változóra.

A meghívott eljárások paraméterezését a meghívott eljárás által, javasolt irodalmi értékek alapján határoztuk meg. Ily módon az Enhanced Sampling for Uniformity (eSU) mintavételi stratégiát $p=6$ -os szinttel vettük figyelembe, azaz a változómodellek esetében a trajektóriák számára hat szint lett meghatározva. Megjegyezzük, hogy a szakirodalomban a minimális szint 4. A mintavétel 30 trajektóriával történt, mely szintén a meghívott eljárás által javasolt érték. A változóink diszkréték és a minta pontjai esetében minden koordináta érték a változók valamely értéke. Egy mintapont azonban nem lesz feltétlenül valós szimulációs eset, mert bár a változók értékei a véges értelmezési tartományuk valamely olyan értéke, mely a szimuláció során előfordulhat, a mintabeli értékek kombinációja nem feltétlenül ad olyan esetet, melyek kombinációja a szimulációban előfordulhat.

Az eSU mintavételi stratégiában minden lépésben egyetlen változó változik; ez a változók sorrendjében balról jobbra történik, ezáltal minden lépésben a változók sorrendjében következő lesz az a változó, mely a rácson lép egyet a trajektóriában. Egy trajektória tehát az alábbi szerint épül fel: 15 változó esetén egy kiindulópont és minden változó egy lépése ad összesen 16 mintapontot

Esetünkben 30 trajektória adja a mintát. A trajektóriák irodalom szerinti javasolt értéke 10 és 20 között van azonban az adatbázistól és a változóktól függően ettől eltérő trajektóriaszám is javasolt lehet. Az Enhanced Sampling for Uniformity eljárás Matlab/Octave implementációja javasolja az adatbázistól függően a trajektóriák minimális számát, ezért került sor 30 trajektória vételére. Mivel 15 változónk van, így $(15+1) \cdot 30 = 480$ mintaelemünk adódik. A mintaelemekhez az építészeti szimulációs elemekhez viszonyított hasonlóság alapú mértéket kerestük, ami alapján output értéket kaphatnak. Ilyen mérték lehet például a távolság alapú modell, melyhez meghatározzuk a mintaelemeknek a szimulációs adatbáziselemektől vett távolságát. Ezt a távolság alapú output érték hozzárendelést az általunk írt Octave kód adja meg. A használt távolságfogalomra nincs általános érvényű szabály, használható az Eduklidészi, a Manhattan távolság, vagy bináris változókra a Hamming távolság is. Ha különböző típusú távolságfogalmakkal dolgozunk akkor egyetlen aggregált értéket kell rendelni minden mintaelemsor adott adatbázis szimulációs esetétől vett távolságra. Erre sincs sztenderd eljárás, de az adatbányászatban területén láthatunk olyan eljárásokat, melyek megoldják ezt a problémát. A legközelebbi adatbázis szimulációs esetek output változói szolgálhatnak kiindulópontul a mintaelemekhez adandó output változó értékekhez. A távolság alapú modell az eredeti output változókból az adott mintaelemhez legközelebbi n szimulációs eset output értékeit veszi alapul számításaiban. Itt n értékének a megválasztása nagy körültekintést igényel, mivel ahhoz az adatbázis és a minta kapcsolatának alapos vizsgálata is szükséges. Ki kell küszöbölni ugyanis azt, hogy több mintaelemhez ugyanazok a legközelebbi szimulációs esetekből számolt értékek kerüljenek hozzárendelésre, mivel ekkor több mintaelem esetében azonos output értéket kapnánk, ami ahhoz vezetne, hogy zérus elemi effektus értékek szerepelnének, ami a változhatóság mérésének eredményeiben okozhat problémát. Az elemi effektus értékek egy véletlen változó értékeiből vett mintaelemek, így ennek elemszáma fontos az érzékenységi mértékek meghatározásánál. A mintaelemekhez output értékeket rendelve kapjuk azt az adatmátrixot, melyből kiindulva meghatározhatjuk az elemi effektusokat. Az 1. táblázat tartalmaz egy mintarészletet hozzátartozó output változók értékeivel. Az elemi effektusok táblázat egy részletét a 2. táblázat mutatja.

1. táblázat. A mintarészlet a hozzátartozó, output változó értékekkel.

	r_positive_edge	r_negative_edge	a_positive_edge	a_negative_edge		he
...	14	0	9	2	...	12325
	11	0	9	2		11809
	11	2	9	2		12365
	11	2	16	2		12203
...	11	2	16	1	...	12119

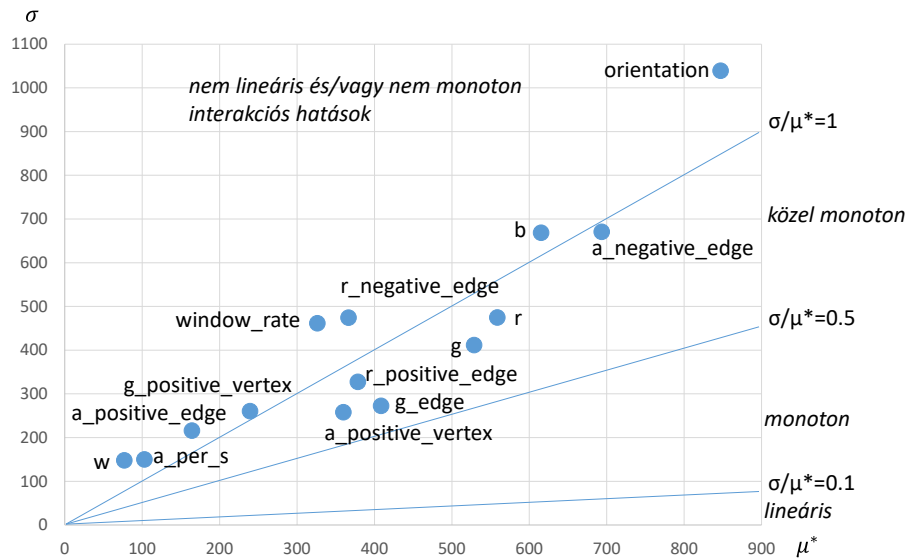
2. táblázat. Az elemi effektusok táblázat részlete.

r_positive_edge	655	891	778	539
r_negative_edge	-147	-389	414	436
a_positive_edge	427	483	209	214
a_negative_edge	814	237	920	1205

Az elemi effektusok táblázat az alapja az érzékenységi mértékek meghatározásának, melynek eredményét a 1. ábrán szemléltetjük. A táblázatban σ az elemi effektus valószínűségi változók szórása az egyes input változókra nézve, μ a várható érték, μ^* pedig az elemi effektusok abszolút értékeivel definiált valószínűségi változók várható értéke. Monoton kapcsolat esetén egy input és az output változó között $\mu = \mu^*$.

A változókat hatásuk szerint osztályozzuk a [15] cikkben javasolt szegmentációs elv alapján, ezt mutatja be az 1. ábra. Az osztályozás alapja az hogy a kis szórás monoton hatást jelez az input változó részéről az output változóra, mivel az elemi effektus értékek az elemi hatásértékek ekkor közel állandóak. Az ábrán az arányos ábrázolhatóság miatt nem tüntettük fel az ún. „structure” változót amire igaz, hogy monoton és közel lineáris a hatása, $\frac{\sigma}{\mu^*} = 0.12$ értékkel. A nagy szórás azt jelzi, hogy az output változó, azaz az éves energiaigény és az input változó kapcsolata nem lineáris.

Vagyis az elemi hatás értéke a bemeneti változó értékétől függően lehet kisebb vagy nagyobb, és/vagy a változást nagymértékben befolyásolják más bemeneti változók változásai, azaz interakciós hatás van a bemeneti változók között.



1. ábra. A bemeneti változók osztályozása hatásuk szerint.

Következtetés

A bemutatott tanulmány μ^* érzékenységi mértéke azt mutatja, hogy az energiateljesítmény szempontjából egyértelműen a structure paraméter hatása a legerősebb. A többi változó fontossági sorrendjét az 1. ábra szemlélteti. Itt meg kell említeni, hogy az alkalmazott módszertan screening módszertan, azaz a legfontosabb paraméterek kiszűrésére alkalmazzák. A modellben kimutatott kölcsönhatások pontos kimutatása is lehetséges a Morris módszer továbbfejlesztett változatával.

Köszönetnyilvánítás

Many thanks for Drs. Yogesh Khare and Rafael Muñoz-Carpena for development of the Matlab/Octave packages for Morris' Elementary Effect methods using enhanced Sampling for Uniformity.

Irodalomjegyzék

- [1] European Communities, "Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings," Official Journal of the European Communities, vol. 46, no. L1, pp. 65–71, Jan. 2003.
- [2] 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, pp. 198–213, Sep. 2016, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2016.06.089.
- [3] Kistelegdi, I.; Horváth, K.R.; Storcz, T.; Ercsey, Z. Building Geometry as a Variable in Energy, Comfort, and Environmental Design Optimization—A Review from the Perspective of Architects. Buildings 2022, 12, 69. <https://doi.org/10.3390/buildings12010069>
- [4] G. Hausladen, M. de Saldanha, P. Liedl, and C. Sager, Climate Design : Solutions for Buildings that Can Do More with Less Technology. Basel: Birkhäuser Verlag, 2005.
- [5] B. Baranyai, B. Póth, and I. Kistelegdi, "Planning and research of smart buildings and constructions with the 'Energydesign Roadmap' method," Pollack Periodica, vol. 8, no. 3, pp. 15–26, Dec. 2013.
- [6] Frits, Marton; Bertok, Botond. "Routing and scheduling field service operation by P-graph," Computers & Operations Research vol. 136, pp. 105472, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.cor.2021.105472
- [7] Storcz, T.; Ercsey, Z.; Horváth, K.R.; Kovács, Z.; Dávid, B.; Kistelegdi, I. Energy Design Synthesis: Algorithmic Generation of Building Shape Configurations. Energies 2023, 16, 2254. <https://doi.org/10.3390/en16052254>
- [8] N. Vincze, K. R. Horváth, I. Kistelegdi, T. Storcz, Z. Ercsey, "Morris method supporting building optimisation" Pollack Periodica, accepted for publication.
- [9] F. Pianosi et al., "Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow," Environmental Modelling & Software, vol. 79, pp. 214–232, May 2016, doi: 10.1016/j.envsoft.2016.02.008.

- [10] M. D. Morris, "Factorial sampling plans for preliminary computational experiments," *Technometrics*, vol. 33, no. 2, pp. 161–174, 1991.
- [11] Saltelli et al., *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. John Wiley & Sons, Ltd, 2007
- [12] Y. P. Khare, R. Muñoz-Carpena, R. W. Rooney, and C. J. Martinez, "A multi-criteria trajectory-based parameter sampling strategy for the screening method of elementary effects," *Environmental Modelling & Software*, vol. 64, pp. 230–239, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.envsoft.2014.11.013.
- [13] J. Chitale, Y. Khare, R. Muñoz-Carpena, G. S. Dulikravich, and C. Martinez, "An Effective Parameter Screening Strategy for High Dimensional Models," Nov. 2017. doi: 10.1115/IMECE2017-71458.
- [14] F. Campolongo, J. Cariboni, and A. Saltelli, "An effective screening design for sensitivity analysis of large models," *Environmental Modelling & Software*, vol. 22, no. 10, pp. 1509–1518, Oct. 2007, doi: 10.1016/J.ENVSOFT.2006.10.004.
- [15] D. Garcia Sanchez, B. Lacarrière, M. Musy, and B. Bourges, "Application of sensitivity analysis in building energy simulations: Combining first- and second-order elementary effects methods," *Energy Build*, vol. 68, pp. 741–750, Jan. 2014, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.08.048