



## HI-SMART: HIGHER EDUCATION PACKAGE FOR NEARLY ZERO ENERGY AND SMART BUILDING DESIGN

# 7. MODUL

### 1. FEJEZET: AZ ÉPÜLETENERGETIKAI SZIMULÁCIÓ ALAPJAI

Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union

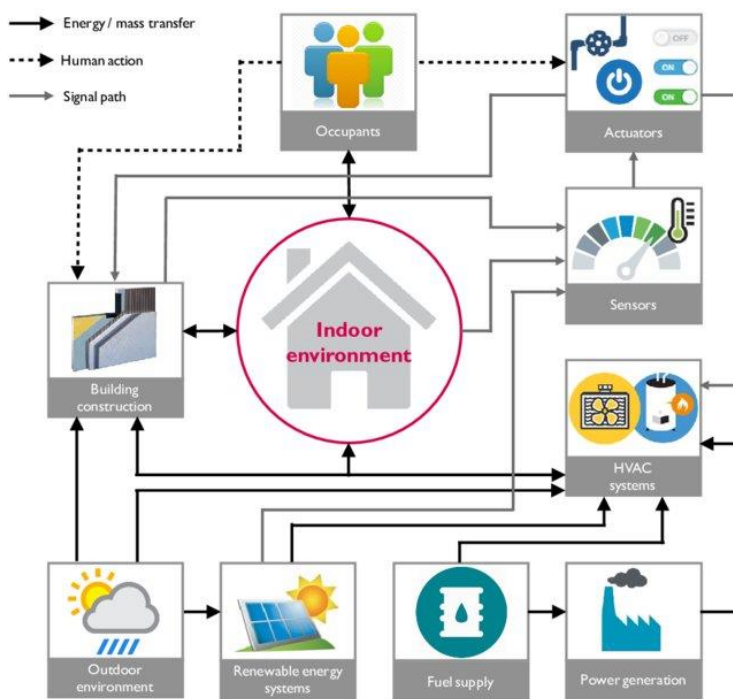


SLOVAK UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY IN BRATISLAVA



## 7.1.1 AZ ÉPÜLETENERGETIKAI SZIMULÁCIÓ ALAPELVEI

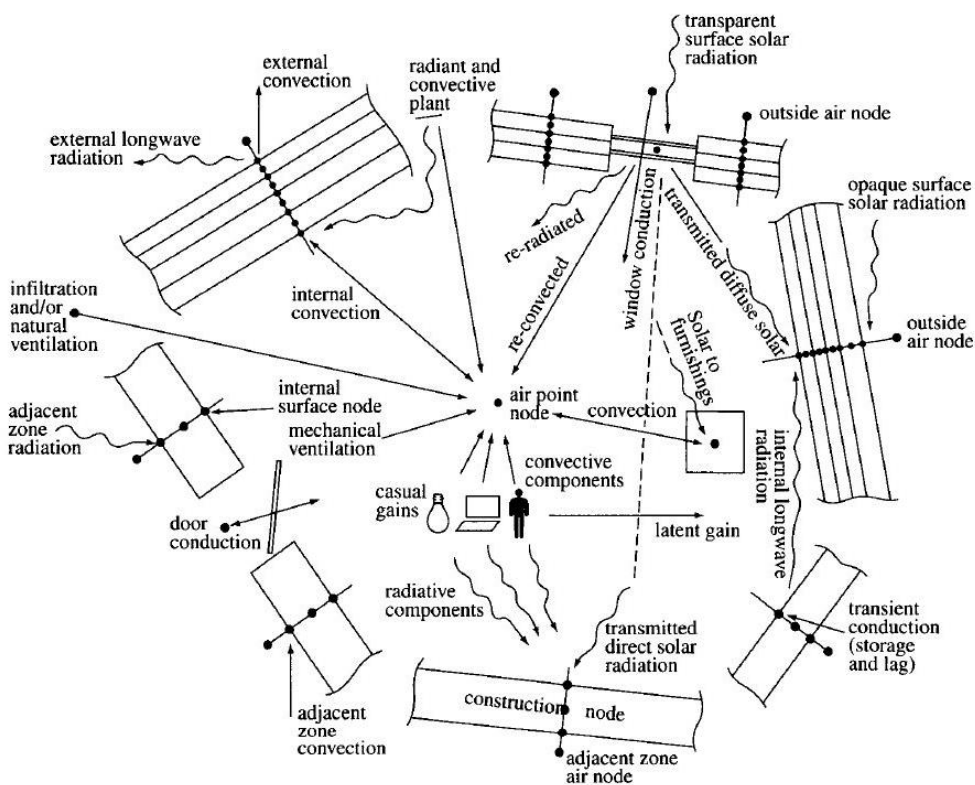
Az épületenergetikai szimuláció (building energy simulation, BES) egy olyan számítógépes modellező és szimulációs eszköz, amely alapvetően komplex rendszerek és folyamatok egyszerűsített leírásával dolgozik. Fő szerepe az épületrendszer optimalizálásában van a különböző fázisok során, az előzetes tervezéstől az üzembe helyezésen át az üzemeltetésig. Számos szempontot lefed (7.1.1. ábra), és potenciálisan hozzájárulhat az építési környezet környezeti hatásainak csökkentéséhez, a beltéri minőség és a termelékenység javításához, valamint az építőiparban a jövőbeni innováció és technológiai fejlődés elősegítéséhez. Ezenkívül fontos szerepet játszik az új vagy felújított, nagy teljesítményű, fenntartható épületek és alkotóelemeik fejlesztésében.



7.1.1. ábra - Az épületek alrendszereinek dinamikus kölcsönhatásai. Forrás: Hensen és Lamberts (2019)

Egy épület (fizikai szempontból) nagyon összetett rendszer, amelyet számos paraméter befolyásol. A szimulációs megközelítés világos megértéséhez hasznos egy ilyen rendszert időfüggő ellenállások és kapacitások elektromos hálózatoként megjeleníteni, amelyek időfüggő potenciálkülönbségeknek vannak kitéve. Az építőelemek (helyiségek tartalma, üvegezési rendszerek, növények, megújuló energiát hasznosító eszközök stb.) a hálózat "csomópontjaiként" kezelhetők és kapacitással jellemezhetők, a csomópontok közötti kapcsolatok pedig vezetőképességgel jellemezhetők. Az épületen belüli és az épületen kívüli áramlási útvonalak, amelyek dinamikus kölcsönhatásban vannak egymással, és

meghatározzák a belső komfortérzetet és az épület energiaigényét (7.1.2. ábra) (Clarke, 2001).



7.1.2. ábra. - Épületenergia-áramlási útvonalak. Forrás: Clarke (2001)

A szimulációs modell a valós épület absztrakciója, amely lehetővé teszi a hatások részletes figyelembevételét és a kulcsfontosságú teljesítménymutatók elemzését költséges mérések nélkül. A felhasználónak a kívánt részletességi szintnek és modellezési megközelítésnek megfelelően jelentős mennyiségű bemeneti adattal kell dolgoznia. A bemeneti adatok különböző típusai adhatók meg a kategóriáknak megfelelően (7.1.1. táblázat). A szükséges részletesség mértéke határozza meg a modell felbontását, amely a szimulációs vizsgálat céljától függ, bár hangsúlyozni kell, hogy nem minden eszköz biztosít előrejelzéseket minden területre.

7.1.1. táblázat. A felhátólól kért bemeneti adatok típusai. Forrás: Beausoleil-Morrison (2021)

Kategória	Input
Geometria	Épület alaprajza és nézete Belső tételrendezés Ablakméretek, helyek és árnyék

	Árnyékolás a szomszédos épületek és tárgyak által
Anyagok	A szerkezeti és szigetelőanyagok tulajdonságai Az üvegezések sugárzási tulajdonságai
HVAC	Energiabeszélgetés és elosztórendszerek Szellőztető rendszerek Komponens- és felüyeleti ellenőrzések
Légáramlás	Ablakok és egyéb szándékos nyílások Repedések, lyukak és hibák a légzáró rétegben Belső terek közötti légáramlási útvonalak
Belső nyereség	Elektromos készülékek és világítás Nedvességforrások, például főzés és növények
Lakók	Lakó sűrűség és időrend Hőt és nedvességet termelő tevékenységek A készülékek és a világítás vezérlése Interakciók az ablakokkal és a termosztátokkal
Időjárás	Napsugárzás A levegő hőmérséklete és páratartalma Szélesebesség és -irány Égbolt Földi hótakaró A mikroklíma hatásai

A BES-t gyakran használják az épületek életciklusának számos szakaszában az újszerű energiaátalakító és -tároló rendszerek kutatására. Hasznos az épület alakjának, méretének és elrendezésének meghatározásához (a tervezés előtti és vázlatos tervezési fázisokban), valamint az épületburkolat, a HVAC és a világítási rendszerek részletes tervezéséhez. Emellett gyakran használják a tervezés után is az építési vagy energetikai előírásoknak való megfelelés bizonyítására, vagy az energiacímkezési programok követelményeiként. Bár kevésbé elterjedt, de az épület üzembe helyezése során a BES-eszközök és a felhasználók támogatására, valamint az épületüzemeltetés javítására (épületvezérlés, hibaérzékelés) is használható. A 7.1.2. táblázat a BES-alkalmazások részleges felsorolását tartalmazza.

A BES-alkalmazások kihasználják a BES azon képességét, hogy olyan kérdésekre adjon választ, amelyekre más eszközökkel nem lehet könnyen választ adni. A főbb felhasználási esetek közé tartoznak a következők [energy.gov]:

- **Építészeti tervezés:** Az építészek a BES-t energiahatékony épületek tervezéséhez használják, különösen az előzetes építési költségek és az üzemeltetési energiaköltségek közötti mennyiségi kompromisszumok megismeréséhez. Sok esetben a BES mind az energiaköltségeket, mind az építési költségeket csökkentheti.
- **HVAC tervezés és üzemeltetés:** A kereskedelmi épületek HVAC-rendszerei nagyok és összetettek lehetnek. A BES segít a gépészmérnököknek az épületek hőterhelését hatékonyan kielégítő HVAC-rendszerek tervezésében. Segít továbbá e rendszerek vezérlési stratégiáinak tervezésében és tesztelésében is.

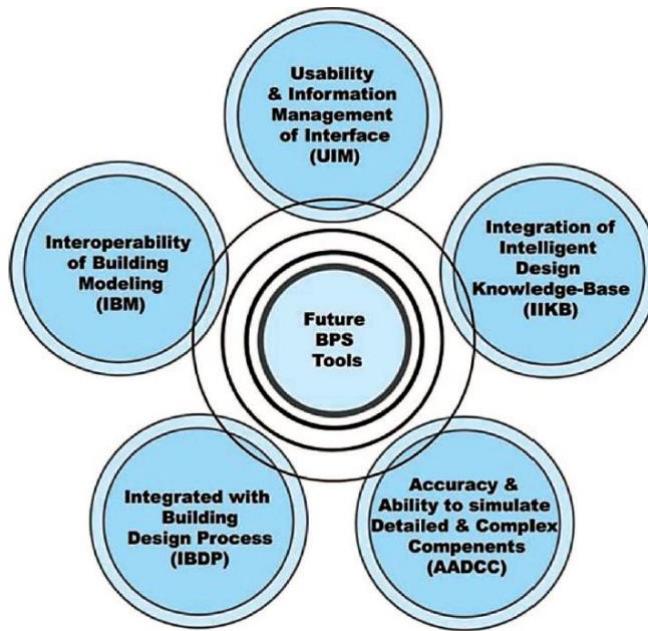
- **Épületteljesítmény-besorolás:** BES: A BES egy épület teljesítményének értékelésére használható, miközben az egyedi használatot és működést ellenőrzik. A belső teljesítményértékelés képezi az alapját olyan eljárásoknak, mint az előírásoknak való megfelelés, a zöld minősítés és a pénzügyi ösztönzők.
- **Épületállomány-elemzés:** A prototípusmodelleken végzett BES-elemzés támogatja az energetikai szabályzatok és szabványok kidolgozását, és segít az olyan szervezeteknek, mint a közműszolgáltatók és a helyi önkormányzatok, nagyszabású energiahatékonysági programok tervezésében.

7.1.2. táblázat. A BES alkalmazásai. Forrás: BES: Beausoleil-Morrison (2021).

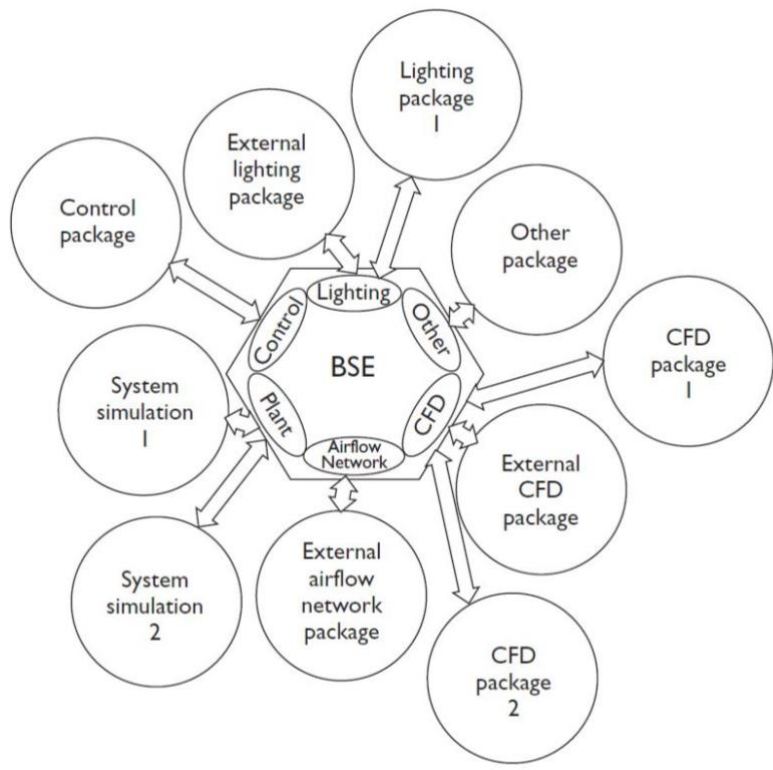
Kategória	Előrejelzés
Termikus	Az energiafogyasztás előrejelzése A fűtési és hűtési csúcsterhelés becslése HVAC berendezések méretezése Az épület formájának és szerkezetének értékelése Külső árnyékolás vizsgálata A túlmelegedési kockázatok meghatározása HVAC rendszerek összehasonlítása A természetes és hibrid szellőzés értékelése Újszerű energiarendszerek felkutatása
Beltéri környezet	A szellőzés hatékonysága Légáramlás eloszlása A beltéri levegő minősége Nappali világítás A világítás minősége Hőkomfort
Műveletek	Hibaérzékelés Modell prediktív szabályozás Az ellenőrzési lehetőségek összehasonlítása
Egyéb	A lakók viselkedése és mozgása Összekapcsolt hő-, levegő- és nedvességátvitel Akusztika A tűz terjedése Az épület kiürítése Külső légáramlás

A BES-közösség nem rendelkezik egyértelmű kritériumokkal az eszközök által kínált lehetőségek osztályozására és értékelésére. Nem alakítottak ki felhasználókkal, a gyakorlati szakemberekkel és az eszközfejlesztőkkel folytatott hivatalos konzultációkon alapuló követelményeket és specifikációkat. Ezenkívül nincs egyértelmű módszertan a BES-eszközök összehasonlítására. Öt kiválasztási kritériumot javasoltak az eszközspecifikációk és kritériumok értékelésére és meghatározására a fejlesztők, a gyakorlati szakemberek és az eszközhasználók számára 7.1.3. ábra. (Attia et al., 2011). A BES-szoftverek nem képesek minden fizikai területet részletesen lefedni. Folyamatosan fejlesztik az integrált BES-környezetet, amely egy fejlett, többzónás épületteljesítmény-szimulációs rendszeren alapul,

amely futásidőben külső szoftvercsomagokkal van összekapcsolva 7.1.4. ábra (Malkawi és Augenbroe, 2004).



7.1.3. ábra. - Az öt kiválasztási kritérium. Forrás: Attia et al. (2011)



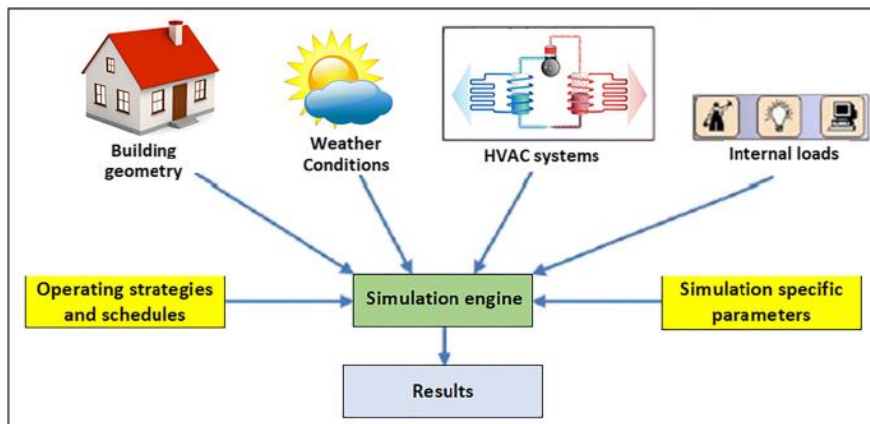
7.1.4. ábra. - Az integrált BES-környezet. Forrás: BES: Malkawi és Augenbroe (2004).

## 7.1.2 BES SZOFTVER

Napjainkban számos energetikai modellező alkalmazás (DesignBuilder, IDA-ICE, EnergyPlus, TRNSYS, eQUEST, Autodesk Green Building Studio, Ecotect stb.) áll rendelkezésre, amelyek különböző komplexitás szintekkel rendelkeznek, és különböző feltételezett tervezési paraméterekre és működési feltételekre reagálnak. A piacon egyre több BPS-szoftver érhető el, amelyeket itt ([buildingenergysoftwaretools.com](http://buildingenergysoftwaretools.com)) frissítünk és sorolunk fel. A különböző szimulációs eszközök különböző szintű bemeneti adatokat igényelnek. Minél összetettebb egy szoftver, annál több felhasználói tapasztalatra van szükség. Annak kiválasztása, hogy melyik szoftvert érdemes használni, a személyes preferenciáktól és a kutatás céljától függ. A rendelkezésre álló BES-eszközök és modellezési módszerek jellege meglehetősen változatos, az alapvető hőátviteli fizikától a bonyolult anyagtudományig, az leegyszerűsített életvitel típusoktól a kifinomult emberi viselkedésig, a tipikus meteorológiai adatoktól a globális felmelegedés hatásaiig terjed (Wang és Zhai, 2016). Mindazonáltal általános adatáramlási struktúrájuk van (7.1.5. ábra) (Al Ka'bi, 2020). A BES programok alapvetően három fő lépést igényelnek a szimulációs folyamat során:

- az épület geometriájával, tájolásával, elhelyezkedésével (időjárás adatok), építőanyagokkal, rendszerekkel kapcsolatos részletes bemeneti adatok.

- az épületüzemeltetés tevékenységeinek és idejének meghatározása (a személyes tevékenységek, a meglévő berendezések, a kényelmi paraméterek, a különböző napi rutinok stb.)
- a szimuláció futtatása, a hibák és az eredmények ellenőrzése.



7.1.5. ábra. - Az energiaszimulációs alkalmazások általános adatáramlása. Forrás: Al Ka'bi, (2020).

A programok időjárás adatokat használnak, és kiszámítják a fűtési és hűtési igényeket, a nappali fényviszonyokat és az éves vagy bizonyos időszaki energiafelhasználást. Ez megfelelő eszköz az épületek és rendszerek alternatíváinak tervezéséhez. Minden létesítményt úgy kell megtervezni, hogy megfeleljen a tőkeelvetésnek, de a jövőbeni üzemeltetési költségeket is szem előtt kell tartani. Az energiahatékonyságot a megfelelően kiválasztott berendezésekkel és vezérlőrendszerekkel rendelkező, teljes körűen megtervezett rendszerrel lehet elérni. Az energetikai modellezést több ország is előírja, és azt megfelelően kell elvégezni, hogy az építési engedélyeket időben megkaphassák (michaudcooley.com). A szimulációs megközelítés speciális kategóriája a validálás, az ellenőrzés és a kalibrálás elveinek alkalmazása, amelyeket a BES minőségének biztosítására használnak. A szimulációs programok különböző módszereket és modelleket használnak a szimulációs eredmények meghatározásához. Általánosságban elmondható, hogy az épületszimulációs megközelítéseket és eszközöket sokféleképpen lehet csoportosítani, amelyek mindegyikének megvan a maga előnye. Ábrázolhatják az épület egy kis részét, például egy fal egydimenziós metszetét, de akár a geometria, az anyagok és a rendszerek összetett kombinációját is, a teljes épületre vonatkozóan. Az épületszimulációs modellek osztályozásának egyik gyakori módja az időbeli dimenziójuk alapján történő osztályozás, és a stacionárius, féldinamikus és tranziens modellek megkülönböztetése (P. de Wilde, 2018). A széles körben használt BPS-eszközök közül sokan választényező módszert alkalmaznak az átláthatatlan épületelemek keresztüli hő- és tömegátadást szabályozó differenciálegyenletek megoldására, vagy véges differenciál- vagy véges térfogatmódszereket használnak a tranziens vezetés modellezésére. A BES-eszközök különböző képességekkel és jellemzőkkel rendelkeznek a fejlett



épületrendszerek teljesítményének előrejelzése tekintetében (7.1.3. táblázat) (R.C.G.M. Loonen et al., 2017).

7.1.3. táblázat. Az egész épületet átfogó energetikai szimulációs eszközök jellemzői. Forrás: Beausoleil-Morrison (2021)

	Vezetési megoldási módszer	Felhasználói felület	Forráskódhoz való hozzáférés és módosítás	Vezérlési szimulációs képességek	Fizikai terület integrációja
EnergyPlus v8.3	Vezetési átviteli függvény (conduction transfer function), véges differencia	IDF szerkesztő, DesignBuilder, Comfen, OpenStudio, Simergy, Sefaira, DIVA, AECOSim	X	Előbeállítások, időzített, energiagazdálkodási rendszer (EMS)	Termikus, vizuális, légáramlás
ESP-r	Véges térfogat	Grafikus és szöveges mód	X	Előbeállítások, időzített	Termikus, légáramlás
IDA ICE v4.7	Véges differencia	Standard és haladó szint	X	Előbeállítások, időzített	Termikus, vizuális, légáramlás
IES v2015	Véges differencia	IES VE, SketchUp és Revit plug-in-ek		Előbeállítások, időzített, formula profil (APpro)	Termikus, vizuális, légáramlás
TRNSYS v17.1	Vezetési átviteli függvény (conduction transfer function)	TRNBuild, SketchUp plug-in	X	Előre beállított, időzített, felhasználó által definiált egyenletek a Simulation Studio-ban, W-editor (79. típus)	Termikus, légáramlás

A szimulációs folyamat előtt érdemes megfontolni a "tíz okot, amiért nem szabad szimulálni" (J. Banks és R.R. Gibson, 1997), amelyek a következőkben foglalhatók össze:

1. A probléma megoldható a "józan ész elemzésével";
2. A probléma analitikusan (zárt formában) megoldható;
3. Könnyebb változtatni vagy közvetlen kísérleteket végezni a valódi dolgokon;
4. A szimuláció költségei meghaladják a lehetséges megtakarításokat;
5. A projekthez nem állnak rendelkezésre megfelelő források;
6. Nincs elég idő ahhoz, hogy a modell eredményei hasznosak legyenek;
7. Nincsenek adatok - még becslések sem;
8. A modell nem ellenőrizhető vagy validálható;
9. A projekt elvárásai nem teljesíthetők;
10. A rendszer viselkedése túl összetett, vagy nem definiálható.

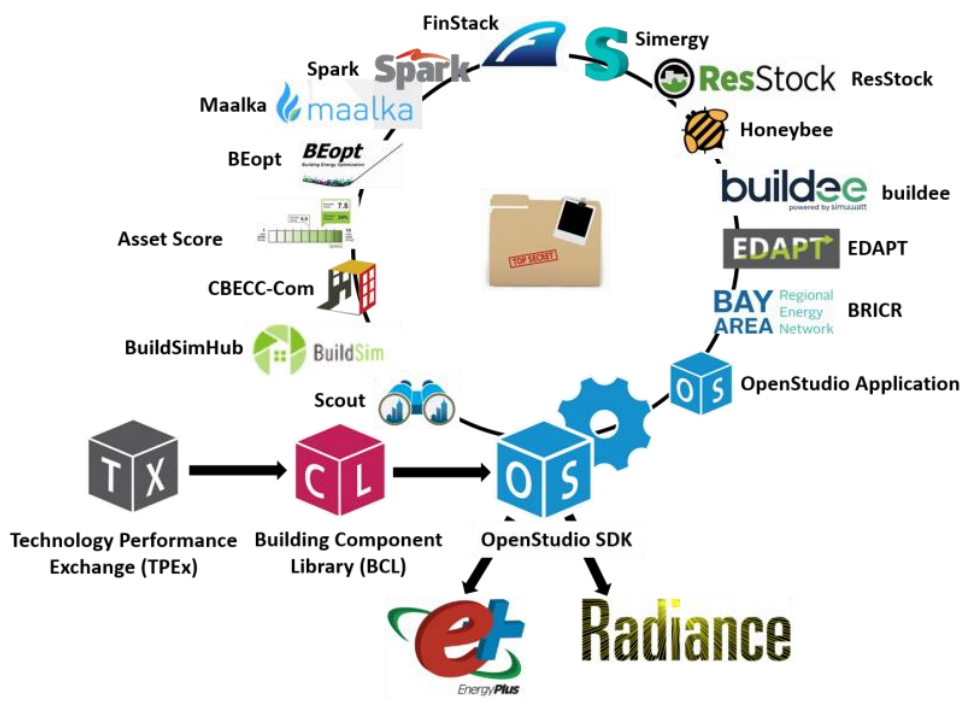
### 7.1.3 ENERGYPLUS

Az Egyesült Államok Energiaügyi Minisztériuma (DOE) támogatja a BES kutatását, fejlesztését és bevezetését, és az 1970-es évek óta maga is aktív felhasználója a BES-nek. A DOE két jelentős BES-szoftvercsomagot fejleszt (energy.gov).

- **Az EnergyPlus** egy olyan motor, amely a hagyományosabb épületek mellett alacsony energiateljesítményű épületek és HVAC-rendszerek modellezésére is képes.

- **Az OpenStudio** egy szoftverfejlesztő készlet, amely csökkenti az EnergyPlus-alapú alkalmazásfejlesztés erőfeszítéseit. Tartalmaz egy grafikus alkalmazást is.

Az EnergyPlus egy moduláris, strukturált kód, amely a két meglévő és jól működő program (BLAST és DOE-2) legnépszerűbb jellemzőire és képességeire épül. Az OpenStudio szoftverfejlesztő készlet (SDK) már most is nagyszámú és egyre növekvő számú köz- és magánszektorbeli alkalmazás és szolgáltatás mögött áll (7.1.6. ábra).



7.1.6. ábra. - Az OpenStudio szoftverfejlesztő készlet (SDK). Forrás: energy.gov.

**Az EnergyPlus** az egyik legismertebb BPS-eszköz. Ez egy egész épületet átfogó energiaszimulációs program, amely az épületek energiafogyasztását - fűtés, hűtés, szellőzés, világítás, konnektor- és technológiai terhelések - és vízfelhasználását egyaránt modellezi. Az EnergyPlus néhány figyelemre méltó jellemzője és képessége a következő (energyplus.net):

- A termikus zónaállapotok és a HVAC-rendszer válaszában **integrált, egyidejű megoldása**, amely nem feltételezi, hogy a HVAC-rendszer képes megfelelni a zónaterheléseknek, és képes szimulálni a klimatizálatlan és aluklimatizált tereket.
- A felületi hőmérsékletet előidéző sugárzási és konvektív hatások **hőmérleg-alapú megoldása**, hőkomfort- és kondenzációs számítások.
- **Óránkénti, a felhasználó által meghatározható időlépések** a hőzónák és a környezet közötti kölcsönhatásokhoz; automatikusan változó időlépések a hőzónák és a HVAC-rendszerek közötti kölcsönhatásokhoz. Ezek lehetővé teszik az EnergyPlus számára, hogy

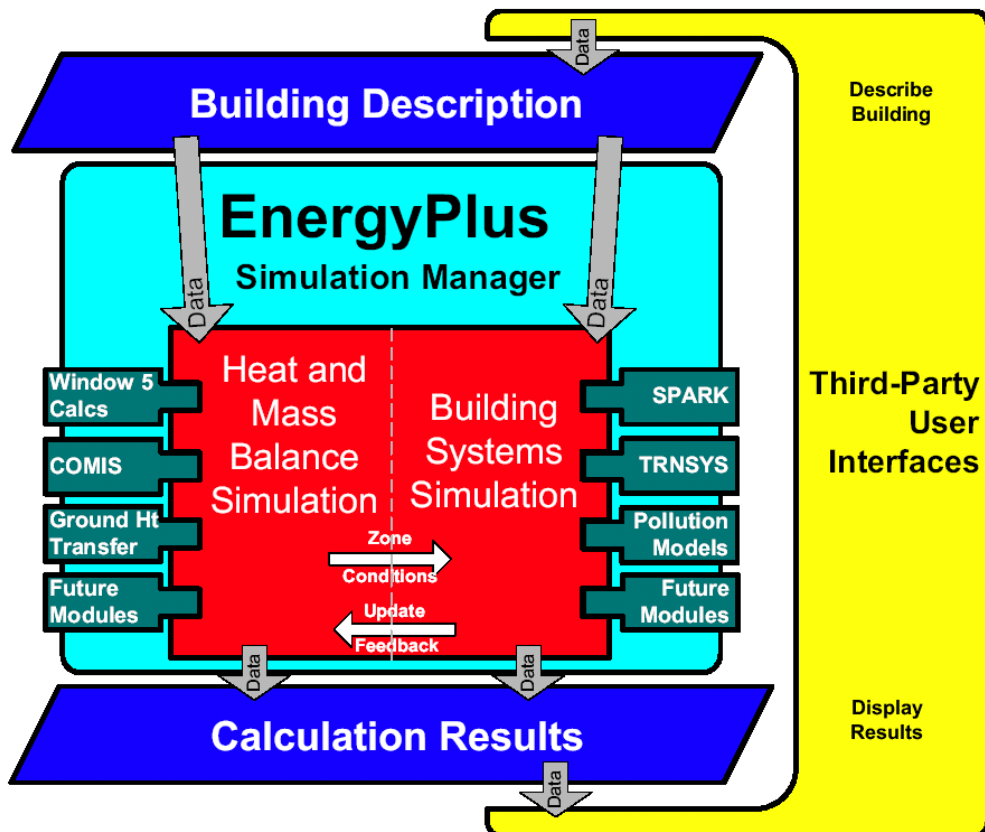
gyors dinamikájú rendszereket modellezzen, miközben a szimulációs sebességet a pontossággal szemben cserélje ki.

- **Kombinált hő- és anyagátviteli** modell, amely figyelembe veszi a zónák közötti légmozgást.
- **Fejlett nyílászáró modellek**, beleértve a szabályozható redőnyöket, az elektrokromatikus üvegezéseket és a rétegenkénti hőmérlegeket, amelyek kiszámítják az ablaküvegek által elnyelt napenergiát.
- **Megvilágítási és káprázási számítások** a vizuális kényelem és a világításvezérlés vezérléséhez.
- **Komponensalapú HVAC**, amely támogatja a szabványos és újszerű rendszerkonfigurációkat egyaránt.
- **Számos beépített HVAC- és világításvezérlési stratégia**, valamint egy bővíthető futásidejű szkriptrendszer a felhasználó által definiált vezérléshez.
- **Funkcionális makett interfész** importálása és exportálása más motorokkal való társ-szimulációhoz.
- **Standard összefoglaló és részletes kimeneti jelentések, valamint a felhasználó által meghatározható jelentések**, amelyek időbeli felbontása az éves és a szubórás felbontás között választható, mindezek energiaforrás-szorzókkal.

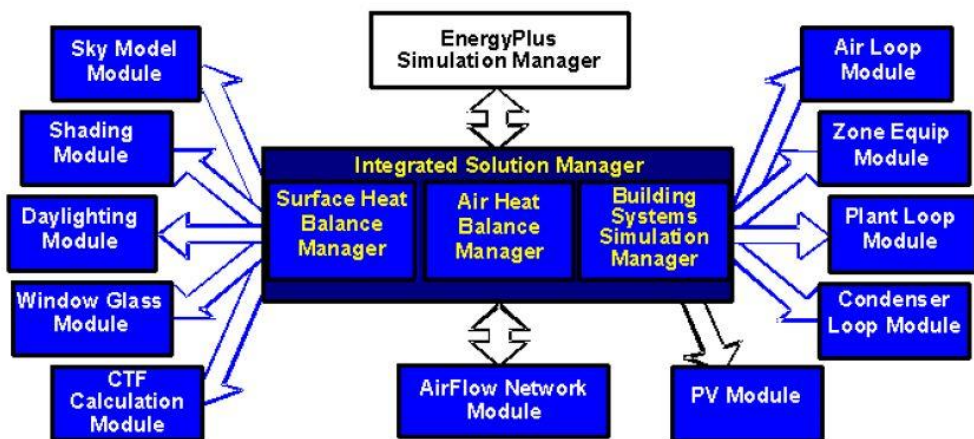
Az Energy Plus-t kifejezetten szimulációs motornak tervezték, és nem létezik olyan vizuális felület, amely lehetővé tenné a felhasználók számára, hogy lássák és koncepciót alkossanak az épületről. Ebben az esetben harmadik féltől származó szoftvereszközöket kell használni, pl. Design Builder, OpenStudios. Az épület szimulációja két szakaszra oszlik (J. Sousa, 2012):

- Az épület építése.
- Adatok bevezetése, például környezeti szempontok, az árnyékolás, a hűtőrendszer, a belső nyereségek stb. hatásai.

Az EnergyPlus program általános felépítése három alapvető komponensből áll: egy szimulációs menedzser, egy hő- és tömegmérleg-szimulációs modul és egy épületrendszer-szimulációs modul (7.1.7. ábra). Az EnergyPlus integrált megoldáskezelője kezeli a felületi és a léghőmérlegmodulokat, és interfészként működik a hőmérleg és az épületrendszer-szimulációkezelő között (7.1.8. ábra).



7.1.7. ábra. - EnergyPlus struktúra. Forrás: Crawley et al. (2004).



7.1.8. ábra. - Integrált szimulációs menedzser. Forrás: EnergyPlus Engineering Reference (2020).

#### 7.1.4 HIVATKOZÁSOK

J.L.M. Hensen, R. Lamberts (szerk.): Building Performance Simulation for Design and Operation. 2. kiadás, Routledge, 2019, ISBN: 9780429402296.

P. de Wilde: Wilde: Building Performance Analysis. Wiley Blackwell, 2018, ISBN: 978-1-119-34192-5.

I. Beausoleil-Morison: Mile-Moleis-Mon-Milonois: Az épületteljesítmény-szimuláció alapjai. Routledge, 2021, ISBN: 9780367518066.

J. A. Clarke: Clarke: Energiaszimuláció az épülettervezésben. 2<sup>nd</sup> Edition, Butterworth-Heinemann, 2001, ISBN: 0750650826.

S. Attia, J.L.M. Hensen, L. Beltrán, A. De Herde: Az épületteljesítmény-szimulációs eszközök kiválasztási kritériumai: az építészek és a mérnökök igényeinek szembeállítás. Journal of Building Performance Simulation, Vol. 5, No. 3, May 2012, 155-169.

A.M. Malkawi és G. Augenbroe (szerk.): Advanced Building Simulation. Taylor & Francis, 2004, ISBN 0-203-07367-3.

H. Wang, Z. Zhai: Wang: Fejlemények az épületszimulációban és a számítási technikákban: A review between 1987 and 2014. Energy and Buildings, 128, (2016), 319-335.

A. H. Al Ka'bi: A zöld épületeknél használt energiaszimulációs alkalmazások összehasonlítása. Annals of Telecommunications (2020) 75:271-290.

R.C.G.M. Loonen, F. Favoino, J.L.M. Hensen, M. Overend: Az adaptív homlokzatok épületteljesítmény-szimulációjának jelenlegi helyzetének, követelményeinek és lehetőségeinek áttekintése. Journal of Building Performance Simulation, 2017 Vol. 10, No. 2, 205-223.

J. Banks és R.R. Gibson, R.R.: Ne szimuláld, ha: Tíz szabály annak meghatározására, hogy mikor nem megfelelő a szimuláció. Institute of Industrial Engineers, 1997, IIE Solutions.

J. Sousa: Jousa Sousa: Energiaszimulációs szoftverek épületekhez : Review and Comparison. Mérnöki tudományok, informatika, 2012.

D.B. Crawley, et al.: EnergyPlus: egy új generációs épületenergetikai szimulációs program létrehozása. Energy and Buildings, 33, (2001), 319-331.

D.B. Crawley, et al.: EnergyPlus: New, Capable and Linked. Journal of Architectural and Planning Research, Vol. 21, No. 4, Theme Issue: Advances in Computational Building Simulation (2004. tél), pp. 292-302.

EnergyPlus™ Version 9.4.0 Documentation, Engineering Reference, U.S. Department of Energy, 2020.

<https://www.michaudcooley.com/services/modeling/>

<https://www.buildingenergysoftwaretools.com/home?page=1>

<https://www.energy.gov/eere/buildings/about-building-energy-modeling>

<https://energyplus.net/>

A projektet az Európai Bizottság támogatta. A kiadványban megjelentek nem szükségszerűen tükrözik az Európai Bizottság nézeteit.

Co-funded by the  
Erasmus+ Programme  
of the European Union



SLOVAK UNIVERSITY OF  
TECHNOLOGY IN BRATISLAVA

