



HI-SMART: BALÍK VYŠŠIEHO VZDELÁVANIA PRE TAKMER NULOVÚ SPOTREBU
ENERGIE A NÁVRH INTELIGENTNÝCH BUDOV

MODULE # 7

ČASŤ 1: ZÁKLADY ENERGETICKEJ SIMULÁCIE BUDOV (BES)

Spolufinancované
Európskou úniou
cez program Erasmus+



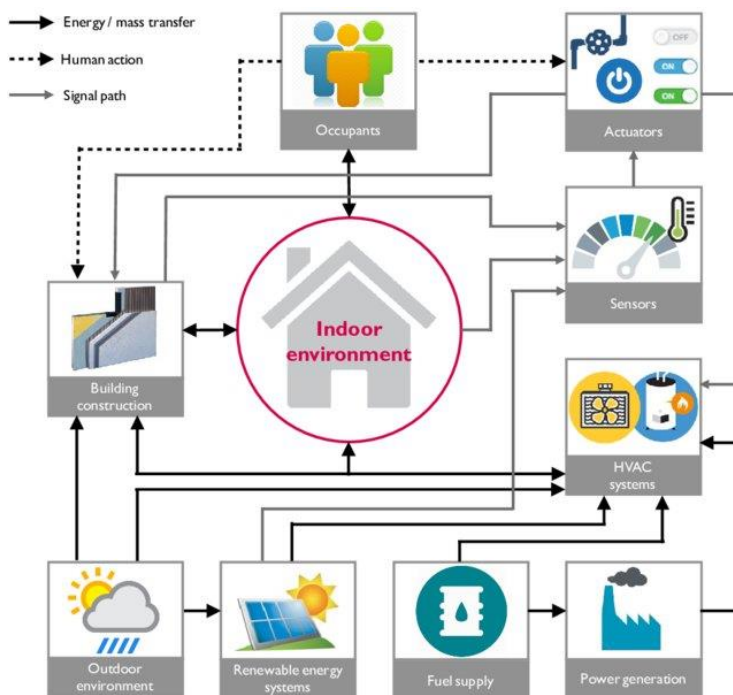
SLOVAK UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY IN BRATISLAVA



7.1 ZÁKLADY ENERGETICKEJ SIMULÁCIE BUDOV (BES)

7.1.1 PRINCÍPY BES

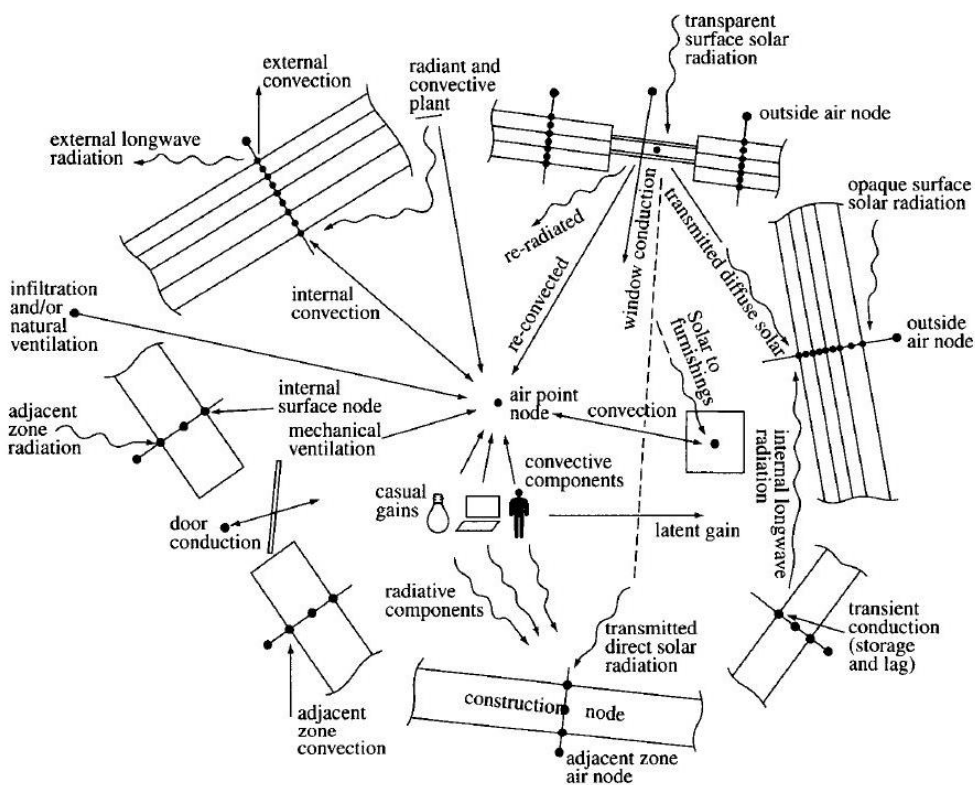
Energetické simulácie budov - BES (building energy simulation) je výpočtový modelovací a simulačný nástroj, ktorý v podstate pracuje so zjednodušeným popisom zložitých systémov a procesov. Hlavná úloha spočíva v optimalizácii stavebného systému počas rôznych fáz, od predbežného návrhu cez uvedenie do prevádzky až po prevádzku. Zahŕňa širokú škálu aspektov (obr. 1.) a má potenciál znížiť environmentálny vplyv prostredia budovy, zlepšiť kvalitu a produktivitu interiéru, ako aj uľahčiť budúce inovácie a technologický pokrok v stavebníctve. Okrem toho hrá dôležitú úlohu pri vývoji nových alebo renovovaných vysokovýkonných trvalo udržateľných budov a ich komponentov.



1. obrázok - Dynamické interakcie subsystémov v budovách. Zdroj: Hensen and Lamberts (2019)

Budova je z fyzikálneho hľadiska veľmi zložitý systém, ktorý je ovplyvňovaný širokou škálou parametrov. Pre jasné pochopenie simulačného prístupu je užitočné vizualizovať takýto systém ako elektrickú sieť časovo závislých odporov a kapacít vystavených časovo závislým potenciálnym rozdielom. Konštrukčné prvky (obsah miestnosti, zasklievacie systémy, súčasti závodu, zariadenia na obnoviteľnú energiu atď.) možno považovať za sieťové „uzly“ a charakterizovať ich kapacitou, pričom medziuzlové spojenia charakterizuje vodivosť. Cesty prúdenia, ktoré sa vyskytujú v budove a mimo nej, a ktoré sa dynamicky vzájomne

ovplyvňujú, aby určili pohodlie v interiéri a energetickú náročnosť budovy (obr. 2) (Clarke, 2001).



2. obrázok – Energetické toky v budove. Zdroj: Clarke (2001)

Simulačný model je abstrakciou reálnej budovy, ktorá umožňuje zväžiť vplyvy na vysokú úroveň detailov a analyzovať kľúčové ukazovatele výkonnosti bez nákladných meraní. Používateľ by mal pracovať so značným množstvom vstupných údajov podľa požadovanej úrovne detailov a prístupov k modelovaniu. Rôzne typy vstupných údajov je možné zadávať podľa kategórií (Tab. 1). Množstvo požadovaných detailov určuje rozlíšenie modelu a malo by sa riadiť cieľom simulačnej štúdie, aj keď je potrebné zdôrazniť, že nie všetky nástroje poskytujú predpovede pre všetky domény.

Tabuľka 1. Typy vstupných údajov požadovaných od používateľa. Zdroj: Beausoleil-Morrison (2021)

Kategória	Vstup
Geometria	Stavebný plán a nadmorská výška Dispozícia vnútorného priestoru Veľkosti okien, umiestnenie a odtiene Tienenie susednými budovami a objektmi
Materiály	Vlastnosti konštrukčných a izolačných materiálov

	Sálavé vlastnosti zasklenia
HVAC (TZB)	Energetická konverzácia a distribučné systémy Vetracie systémy Komponentné a dozorné kontroly
Prúdenie vzduchu	Okenné a iné zámerné otvory Trhliny, diery a defekty vzduchovej bariéry Dráhy prúdenia vzduchu medzi vnútornými priestormi
Vnútorne zisky	Elektrické spotrebiče a osvetlenie Zdroje vlhkosti, ako je varenie a rastliny
Užívatelia	Hustota a rozvrh obyvateľov Činnosti, ktoré vytvárajú teplo a vlhkosť Ovládanie spotrebičov a osvetlenia Interakcia s oknami a termostatmi
Počasia	Slnčné žiarenie Teplota a vlhkosť vzduchu Rýchlosť a smer vetra Podmienky na oblohe Prízemná snehová pokrývka Účinky mikroklimy

Vo všeobecnosti sa BES často používa na výskum nových systémov premeny a skladovania energie pre budovy v mnohých fázach ich životného cyklu. Je to užitočné pri určovaní tvaru, veľkosti a usporiadania budovy (fázy predbežného návrhu a schematickeho návrhu), ako aj pri detailnom návrhu plášťa budovy, HVAC a osvetľovacích systémov. Okrem toho sa často používa po návrhu na preukázanie súladu so stavebnými alebo energetickými predpismi alebo ako požiadavka programov energetického označovania. Aj keď je to menej bežné, môže sa použiť aj na pomoc nástrojom a používateľom BES pri uvádzaní budovy do prevádzky a na zlepšenie prevádzky budovy (kontrola budovy, detekcia porúch). Tabuľka 2 poskytuje čiastočný zoznam aplikácií BES.

Aplikácie BES využívajú svoju schopnosť odpovedať na otázky, na ktoré sa nedá ľahko odpovedať inými prostriedkami. Medzi hlavné prípady použitia patria nasledujúce [energy.gov]:

- **Architektonický dizajn:** Architekti používajú BES na navrhovanie energeticky efektívnych budov, konkrétne na informovanie o kvantitatívnych kompromisoch medzi počiatočnými nákladmi na výstavbu a prevádzkovými nákladmi na energiu. V mnohých prípadoch môže BES znížiť náklady na energiu aj počiatočné náklady na výstavbu.
- **Návrh a prevádzka HVAC:** Systémy HVAC v komerčných budovách môžu byť veľké a zložité. BES pomáha strojným inžinierom navrhovať systémy HVAC, ktoré efektívne zvládajú tepelné zaťaženie budov. Pomáha tiež navrhovať a testovať riadiace stratégie pre tieto systémy.
- **Hodnotenie výkonnosti budovy:** BES je možné použiť na posúdenie inherentnej výkonnosti budovy pri kontrole špecifického použitia a prevádzky. Vlastné hodnotenie

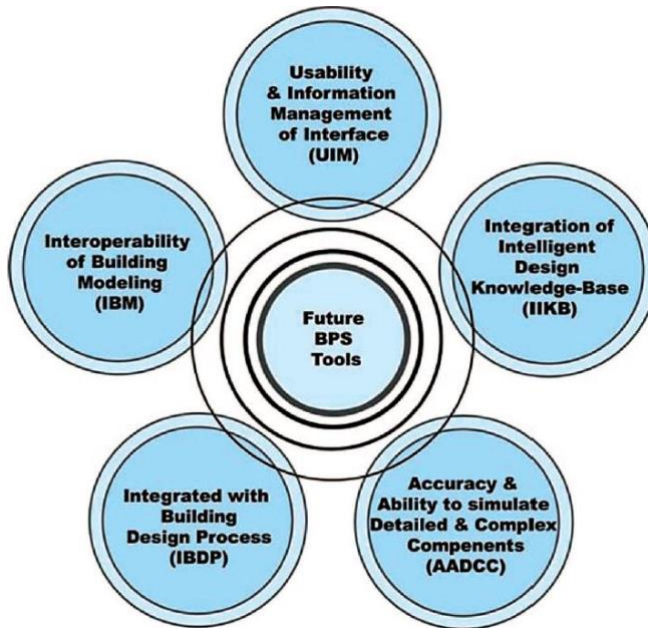
výkonnosti je základom pre procesy, ako je dodržiavanie kódexu, zelená certifikácia a finančné stimuly.

- **Analýza stavebného fondu:** Analýza BES na prototypových modeloch podporuje vývoj energetických predpisov a noriem a pomáha organizáciám, ako sú verejné služby a miestne samosprávy plánovať rozsiahle programy energetickej účinnosti.

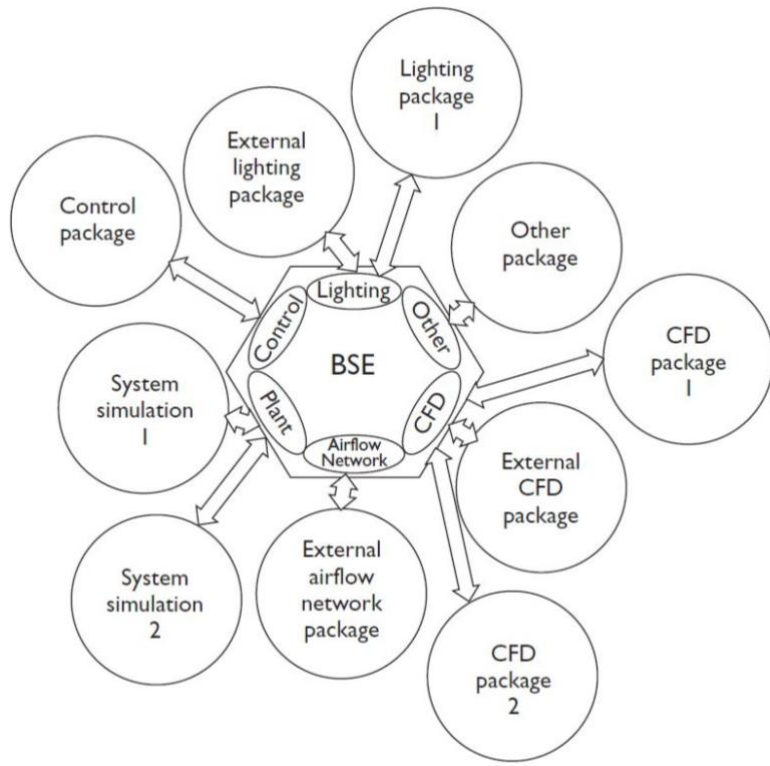
Tabuľka 2. Aplikácie BES. Zdroj: Beausoleil-Morrison (2021)

Katégoria	Predpoved'
Tepelná technika	Predpovedanie spotreby energie Odhad špičkového vykurovacieho a chladiaceho zaťaženia Dimenzovanie HVAC zariadení Posúdenie formy a štruktúry budovy Skúmanie vonkajšieho tienenia Určenie rizík prehriatia Porovnanie HVAC systémov Hodnotenie prirodzeného a hybridného vetrania Skúmanie nových energetických systémov
Vnútorne prostredie	Účinnosť vetrania Distribúcia prúdu vzduchu Kvalita vnútorného vzduchu Denné osvetlenie Kvalita osvetlenia Tepelná pohoda
Operácie	Detekcia porúch Prediktívne riadenie modelu Porovnanie možností ovládania
Iné	Správanie a pohyb cestujúcich Spojený prenos tepla, vzduchu a vlhkosti Akustika Šírenie požiaru Evakuácia budovy Vonkajšie prúdenie vzduchu

Komunita BES nemá jasné kritériá na klasifikáciu a hodnotenie zariadení, ktoré nástroje ponúkajú. Zatiaľ neexistujú jednotné definície požiadaviek a špecifikácií nástrojov na základe formálnych konzultácií s používateľmi, odborníkmi a vývojármi nástrojov. Okrem toho neexistuje jasná metodika na porovnanie nástrojov BES. Na posúdenie a definovanie špecifikácií nástrojov a kritérií pre vývojárov, odborníkov a používateľov nástrojov bolo navrhnutých päť výberových kritérií Obr. 3. (Attia et al., 2011). Softvér BES nedokáže podrobne pokryť všetky fyzické domény. Integrované prostredie BES založené na pokročilom multizónovom simulačnom systéme budovy, ktorý je za chodu spojený s externými softvérovými balíkmi, sa neustále vyvíja Obr. 4 (Malkawi a Augenbroe, 2004).



3. obrázok – Päť výberových kritérií. Zdroj: Attia et al. (2011)

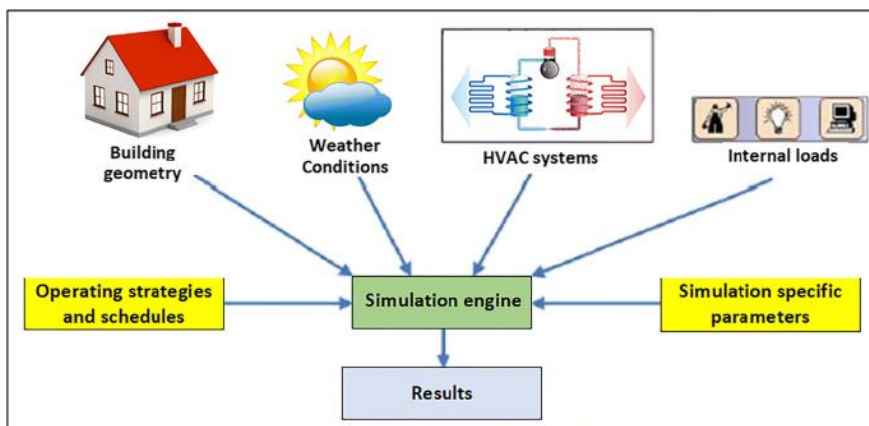


4. obrázok – Integrované prostredie BES. Zdroj: Malkawi and Augenbroe (2004)

7.1.2 BES SOFTWARE

V súčasnosti je k dispozícii množstvo aplikácií energetického modelovania (DesignBuilder, IDA-ICE, EnergyPlus, TRNSYS, eQUEST, Autodesk Green Building Studio, Ecotect atď.) s rôznou úrovňou zložitosti a odozvou na rôzne predpokladané parametre návrhu a prevádzkové podmienky. Na trhu je dostupný rastúci počet softvéru BPS, ktorý je aktualizovaný a uvedený tu (buildingenergysoftwaretools.com). Rôzne simulačné nástroje vyžadujú rôzne úrovne vstupných detailov. Čím je softvér zložitejší, tým je potrebná väčšia používateľská skúsenosť. Výber softvéru, ktorý by sa mal použiť, závisí od osobných preferencií a cieľa výskumu. Povaha dostupných nástrojov BES a prístupov k modelovaniu je pomerne rôznorodá, siaha od základnej fyziky prenosu tepla po komplikovanú vedu o materiáloch, od jednoduchých životných plánov po sofistikované ľudské správanie, od typických meteorologických údajov po vplyvy globálneho otepľovania (Wang a Zhai, 2016). Napriek tomu majú všeobecnú štruktúru toku údajov (obr. 5) (Al Ka'bi, 2020). Programy BES vyžadujú v podstate tri hlavné kroky v procese simulácie:

- podrobné vstupy súvisiace s geometriou budovy, orientáciou budovy, umiestnením budovy (údaje o počasí), stavebnými materiálmi, systémami.
- špecifikácia činnosti a hodín prevádzky budovy (osobné činnosti, existujúce vybavenie, parametre komfortu, rôzne druhy harmonogramov a pod.).
- spustenie simulácie, kontrola chýb a výsledkov.



5. obrázok - Všeobecný tok údajov aplikácií na simuláciu energie. Zdroj: Al Ka'bi, (2020).

Programy využívajú údaje o počasí a vypočítavajú požiadavky na vykurovanie a chladenie, podmienky denného svetla a spotrebu energie za rok alebo za určité obdobie. Je to dobrý nástroj na organizovanie viacerých alternatív budov alebo systémov. Všetky zariadenia musia byť navrhnuté tak, aby spĺňali kapitálové rozpočty, ale musia byť navrhnuté aj s ohľadom na budúce prevádzkové náklady. Energetická účinnosť sa dosiahne prostredníctvom plne

navrhnutého systému s vhodne zvolenými zariadeniami a riadiacimi systémami. Energetické modelovanie vyžaduje aj niekoľko krajín a musí sa vykonávať správne, aby bolo možné včas získať stavebné povolenia (michaudcooley.com). Špeciálnou kategóriou v simulačnom prístupe je uplatňovanie princípov validácie, overovania a kalibrácie, ktoré sa používajú na zabezpečenie kvality BES. Simulačné programy používajú rôzne metódy a modely na určenie výsledkov simulácie. Vo všeobecnosti existuje mnoho spôsobov, ako zoskupiť prístupy a nástroje simulácie budov, pričom všetky majú svoje výhody. Môžu predstavovať malú časť budovy, ako napríklad jednorozmerný rez stenou, alebo zložitú kombináciu geometrie, materiálov a systémov, ktoré predstavujú celú budovu. Jedným z bežných spôsobov klasifikácie modelov simulácie budov je ich časový rozmer a rozlišovanie medzi stacionárnymi, semi-dynamickými a prechodnými modelmi (P. de Wilde, 2018). Mnohé zo široko používaných nástrojov BPS využívajú techniky faktora odozvy na riešenie diferenciálnych rovníc, ktorými sa riadi prenos tepla a hmoty cez nepriehľadné stavebné prvky, alebo používajú metódy konečných rozdielov alebo konečných objemov na modelovanie prechodového vedenia. Nástroje BES majú rôzne schopnosti a charakteristiky s ohľadom na predikciu výkonnosti pokročilých stavebných systémov (Tab. 3) (R.C.G.M. Loonen et al., 2017).

Tabuľka 3. Charakteristika nástrojov energetickej simulácie celej budovy. Zdroj: Beausoleil-Morrison (2021)

	Conduction solution method	User Interface	Source code access and modification	Control simulation capabilities	Physical domain integration
EnergyPlus v8.3	Conduction transfer function, Finite difference	IDF editor, DesignBuilder, Comfen, OpenStudio, Simergy, Sefaira, DIVA, AECOSim	X	Presets, Time-scheduled, Energy Management System (EMS)	Thermal, visual, airflow
ESP-r	Finite volume	Grafic and text mode	X	Presets, time-scheduled	Thermal, airflow
IDA ICE v4.7	Finite difference	Standard and advanced level	X	Presets, time-scheduled	Thermal, visual, airflow
IES v2015	Finite difference	IES VE, SketchUp and Revit plug-ins		Presets, time-scheduled, formula profile (APpro)	Thermal, visual, airflow
TRNSYS v17.1	Conduction transfer function	TRNBuild, SketchUp plug-in	X	Presets, time-scheduled, user-defined equations in Simulation Studio, W-editor (Type 79)	Thermal, airflow

Pred procesom simulácie stojí za to zvážiť „desať dôvodov, prečo nesimulovať“ (J. Banks a R. R. Gibson, 1997), ktoré možno zhrnúť takto:

1. Problém možno vyriešiť pomocou „analýzy zdravého rozumu“;
2. Úlohu možno riešiť analyticky (pomocou uzavretého formulára);
3. Je jednoduchšie zmeniť alebo vykonať priame experimenty na skutočnej veci;
4. Náklady na simuláciu presahujú možné úspory;

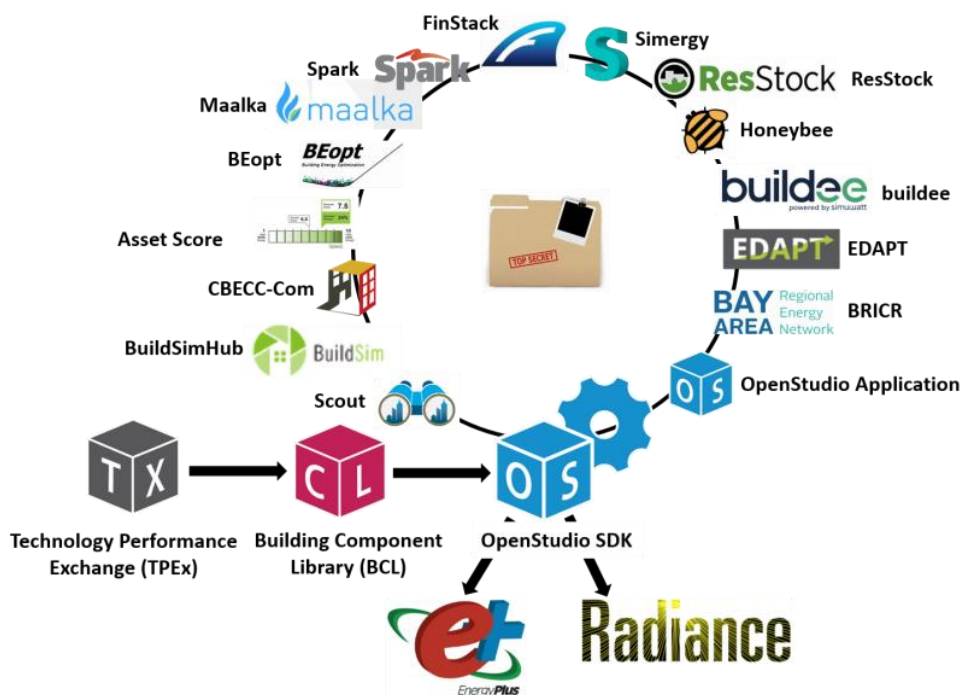
5. Pre projekt nie sú k dispozícii vhodné zdroje;
6. Nie je dostatok času na to, aby boli výsledky modelu užitočné;
7. Neexistujú žiadne údaje – dokonca ani odhady;
8. Model nie je možné overiť ani validovať;
9. Očakávania projektu nemožno splniť;
10. Správanie systému je príliš zložitá alebo ho nemožno definovať.

7.1.3 ENERGYPLUS

The U.S. Department of Energy (DOE) podporuje výskum, vývoj a nasadenie BES a samo je aktívnym používateľom BES od 70. rokov minulého storočia. DOE vyvíja dva významné softvérové balíky BES (energy.gov).

- **EnergyPlus** je program schopný okrem konvenčnejších budov modelovať aj návrhy nízkoenergetických budov a systémov HVAC.
- **OpenStudio** je súprava na vývoj softvéru, ktorá znižuje námahu pri vývoji aplikácií založených na EnergyPlus. Súčasťou je aj grafická aplikácia.

EnergyPlus je modulárny, štruktúrovaný kód založený na najobľúbenejších vlastnostiach a schopnostiach dvoch existujúcich a dobre fungujúcich programov (BLAST a DOE-2). OpenStudio softvérový vývojový kit (SDK) stojí za už aj tak veľkým a rastúcim počtom aplikácií a služieb verejného a súkromného sektora (obr. 6).



EnergyPlus je jedným zo známych nástrojov BPS. Ide o program simulácie energie celej budovy na modelovanie spotreby energie – na vykurovanie, chladenie, vetranie, osvetlenie a záťaže z elektrickej siete a procesov – a spotrebu vody v budovách. Niektoré z pozoruhodných funkcií a schopností EnergyPlus zahŕňajú (energyplus.net):

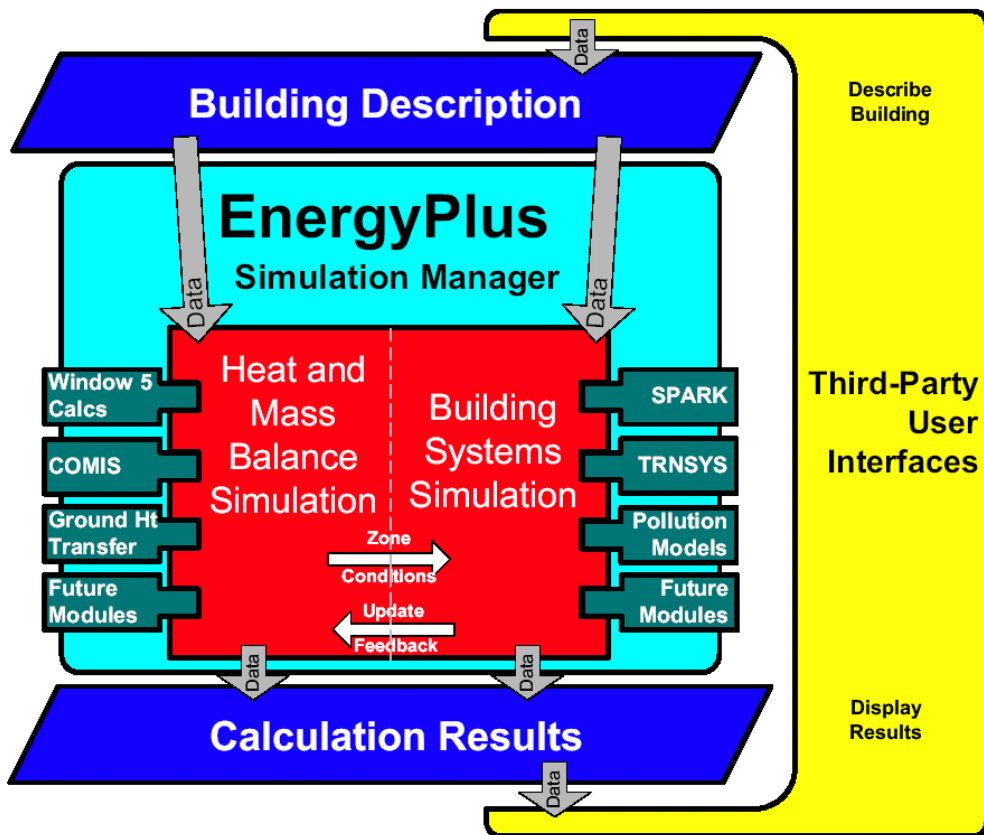
- Integrované, simultánne riešenie teplotných zónových podmienok a odozvy VZT systému, ktoré nepredpokladá, že VZT systém zvládne zónové zaťaženie a dokáže simulovať neklimatizované a neklimatizované priestory.
- Riešenie na báze tepelnej bilancie sálavých a konvekčných efektov, ktoré vytvárajú povrchové teploty, tepelnú pohodu a výpočty kondenzácie.
- Podhodinové, užívateľom definované časové kroky pre interakciu medzi tepelnými zónami a prostredím; s automaticky menenými časovými krokmi pre interakcie medzi tepelnými zónami a HVAC systémami. Tie umožňujú EnergyPlus modelovať systémy s rýchlou dynamikou a zároveň meniť rýchlosť simulácie za presnosť.
- Kombinovaný model prenosu tepla a hmoty, ktorý zohľadňuje pohyb vzduchu medzi zónami.
- Pokročilé modely okien vrátane ovládateľných okenných žalúzií, elektrochromických skiel a tepelných bilancií po vrstvách, ktoré počítajú slnečnú energiu absorbovanú okennými tabuľami.
- Výpočty osvetlenia a oslnenia na hlásenie vizuálneho komfortu a ovládanie osvetlenia pri jazde.
- HVAC na báze komponentov, ktoré podporuje štandardné aj nové konfigurácie systému.
- Veľké množstvo vstavaných stratégií riadenia HVAC a osvetlenia a rozšíriteľný runtime skriptovací systém pre užívateľom definované riadenie.
- Import a export funkčného mockupového rozhrania pre spoločnú simuláciu s inými motormi.
- Štandardné súhrnné a podrobné výstupné správy, ako aj užívateľsky definovateľné správy s voliteľným časovým rozlíšením od ročného po podhodinové, všetky s multiplikátormi zdroja energie.

Energy Plus bol vyslovene navrhnutý ako simulačný motor a neexistuje vizuálne rozhranie, ktoré by užívateľom umožnilo vidieť a poňať budovu. V tomto prípade je potrebné použiť softvérové nástroje tretích strán, t. j. Design Builder, OpenStudio. Simulácia budovy je rozdelená do dvoch etáp (J. Sousa, 2012):

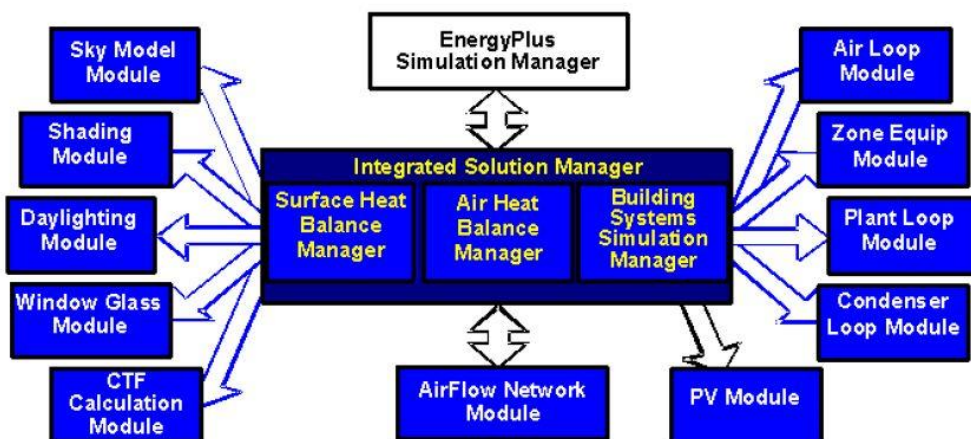
- Výstavba budovy.
- Zavedenie údajov, ako sú environmentálne aspekty, vplyvy tienenia, chladiaci systém, vnútorné zisky atď.

Celková programová štruktúra EnergyPlus má tri základné komponenty: manažér simulácie, modul simulácie tepelnej a hmotnostnej bilancie a modul simulácie systémov budov (obr. 7).

Integrovaný manažér riešení EnergyPlus spravuje moduly tepelnej bilancie povrchu a vzduchu a pôsobí ako rozhranie medzi tepelnou bilanciou a manažérom simulácie systémov budovy (obr. 8).



7. obrázok – Štruktúra EnergyPlus. Zdroj: Crawley et al. (2004).



8. obrázok – Integrated simulation manager. Zdroj: EnergyPlus Engineering Reference (2020).

7.1.4 LITERATÚRA

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

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

I. Beausoleil-Morison: Fundamentals of building performance simulation. Routledge, 2021, ISBN: 9780367518066.

J.A. Clarke: Energy Simulation in Building Design. 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, 2001, ISBN: 0750650826.

S. Attia, J.L.M. Hensen, L. Beltrán, A. De Herde: Selection criteria for building performance simulation tools: contrasting architects' and engineers' needs. Journal of Building Performance Simulation, Vol. 5, No. 3, May 2012, 155–169.

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

H. Wang, Z. Zhai: Advances in building simulation and computational techniques: A review between 1987 and 2014. Energy and Buildings, 128, (2016), 319–335.

A. H. Al Ka'bi: Comparison of energy simulation applications used in green building. Annals of Telecommunications (2020) 75:271–290.

R.C.G.M. Loonen, F. Favoino, J.L.M. Hensen, M. Overend: Review of current status, requirements and opportunities for building performance simulation of adaptive facades. *Journal of Building Performance Simulation*, 2017 Vol. 10, No. 2, 205–223.

J. Banks and R.R. Gibson, R.R.: Don't Simulate When: Ten Rules for Determining When Simulation Is Not Appropriate. Institute of Industrial Engineers, 1997, IIE Solutions.

J. Sousa: Energy Simulation Software for Buildings : Review and Comparison. Engineering, Computer Science, 2012.

D.B. Crawley, et al.: EnergyPlus: creating a new-generation building energy simulation program. *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 (Winter, 2004), 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/>

Financované Európskou úniou. Vyjadrené názory a postoje sú názormi a vyhláseniami autora(-ov) a nemusia nevyhnutne odrážať názory a stanoviská Európskej únie alebo Európskej výkonnej agentúry pre vzdelávanie a kultúru (EACEA). Európska únia ani EACEA za ne nepreberajú žiadnu zodpovednosť.

Spolufinancované
Európskou úniou
cez program Erasmus+



SLOVAK UNIVERSITY OF
TECHNOLOGY IN BRATISLAVA

