

Základy počítačového modelovania prúdenia a vizualizácií

(Manuscript)

Dušan Kudelas

2017

Obsah

Zoznam použitých značiek

Úvod

Cieľom vysokoškolskej učebnice je odovzdať študentom širšie teoretické a praktické poznatky z počítačovej dynamiky tekutín a numerického modelovania s využitím komerčného softvéru ANSYS – Fluent.

Učebnica je určená predovšetkým pre študentov Fakulty BERG TU v Košiciach, študujúcich študijné programy Baníctvo a geotechnika, Záchranná, požiarne a bezpečnostná technika, Využívanie alternatívnych zdrojov energie a iných technologicky orientovaných zameraní.

Základné pojmy modelovania

Systém je súbor vybraných objektov resp. prvkov sledovaného zariadenia, alebo prostredia medzi ktorými existujú väzby. Za systém možno považovať:

- Prirodzený reálny objekt (spoločnosť, biotop, lokalita atď)
- Umelý reálny objekt (počítač, stroj, zariadenie)
- Proces, alebo komplex procesov (technologický proces)
- Súbor informačných, regulačných a riadiacich aktivít, ktoré sa vzťahujú k istému reálnemu problému, jeho projektu
- Abstraktnú myšlienkovú konštrukciu, výrokovú konštrukciu a konštrukciu matematických výrazov, ktorá je založená na reálnom objekte

Modelovanie prebiehajúcich procesov v systéme je metódou, ktorej cieľom je čo najpresnejšie zachytiť správanie reálneho systému pomocou modelu. Je to proces tvorby a modifikácie modelu. Pomocou modelovania je možné napr. bez meraní na príslušnom priemyselnom zariadení: stanoviť dynamické vlastnosti systému, stanoviť vplyv zmien okrajových podmienok prevádzkovania systému, optimalizovať chemickotechnologické, montážne, metalurgické a iné systémy a stanoviť podmienky ich činnosti, stanovovať rozmery a iné technické parametre zariadení.

Model je napodobenina vybranej časti reality, ktorá má zo svojou predlohou spektrum spoločných vlastností. Primárne je možné modely rozdeliť na fyzikálne experimenty (modely) a matematické modely. Fyzikálny experiment je dej umelo navodený v prirodzených a striktné definovaných podmienkach. Je založený na podobnosti medzi reálnym systémom (dielom) a reprodukovateľným modelom. Cieľom fyzikálneho experimentu je preukázať alebo vyskúšať funkčnosť prírodného deja. Alternatívne je možné vyjadriť, že fyzikálny experiment (model) je umele vytvorený objekt, ktorým je možné objasniť fyzikálny dej alebo nový poznatok. Matematický model je systematický súbor funkčných vzťahov, ktoré po vložení vstupných hodnôt poskytujú výsledky, ktorými je možné vyjadriť podstatu modelovaného deja. Umožňuje teda skúmať reálne systémy, pomocou systémov abstraktných, ktoré sú definované matematickými vzťahmi a konštantami vyjadrujúcimi fyzikálny stav sústavy alebo deja.

Model teda predstavuje fyzikálny systém alebo proces za účelom zlepšenia schopností pochopiť, predpovedať alebo kontrolovať jeho správanie. Koncepčný model pre počítačovú fluidnú dynamiku sa zakladá na pozorovaní, matematickom modelovaní dát a matematických (parciálnych diferenciálnych) rovniciach, ktoré vyjadrujú fyzikálny systém. Sem prislúchajú tiež počiatočné a okrajové podmienky. Počítačový model je počítačový program alebo kód, ktorým sa implementuje koncepčný model. Základ modelu tvorí metóda konečných diferencií, metóda konečných objemov, metóda konečných prvkov alebo iný druh diskretizácie. To zahŕňa algoritmus a stratégiu iteračného postupu. Parametre sú hlavne počet uzlových bodov, vstupné hodnoty algoritmu a pod.

Veličiny získané z modelu sa prepočítavajú na skutočné zariadenie, tzv. dielo. Model (či už experimentálny, alebo topografický) sa zhotovuje často menší ako dielo, pretože je lacnejší, ľahší, je menej náročný na hardvérové nároky počítača. Výsledky na modeli, je nutné prepočítať na dielo, čo sa realizuje na základe poznatkov teórie fyzikálnej podobnosti. Fyzikálna podobnosť stanoví podmienky, za ktorých je skúmaný ja na modeli fyzikálne podobný javu v skutočnosti – na diele. Úplná fyzikálna podobnosť je splnená vtedy, keď sú súčasne splnené nasledovné podmienky :

1. Geometrická podobnosť – pomer odpovedajúcich dĺžok na modeli a na diele má byť konštantný a uhly rovnaké.

$$\left(\frac{l_1}{l_2}\right)_M = \left(\frac{l_1}{l_2}\right)_D = \text{konšt}$$

2. Kinematická podobnosť – pomer odpovedajúcich rýchlostí a zrýchlení na modeli a na diele má byť konštantný

$$\left(\frac{v_1}{v_2}\right)_M = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)_D = \text{konšt}$$

3. Dynamická podobnosť – pomer odpovedajúcich síl na modeli a na diele má byť konštantný

$$\left(\frac{F_1}{F_2}\right)_M = \left(\frac{F_1}{F_2}\right)_D = \text{konšt}$$

Splnenie podmienok geometrickej a kinematickej podobnosti je jednoduchšie, pretože model sa vytvorí v určitej mierke. Zložitejšie to býva s dynamickou podobnosťou. Najdôležitejšie sily, ktoré sú z hľadiska podobnosti prúdenia relevantné sú tlakové sily F_p , trecie F_t , zotrvačné F_z , a tiažová sila F_g .

$$F_p = p \cdot S \approx p \cdot l^2$$

$$F_t = \tau \cdot S \approx \tau \cdot l \cdot v$$

$$F_z = m \cdot a \approx \rho \cdot l^3 \cdot v^2$$

$$F_g = m \cdot g \approx \rho \cdot l^3 \cdot g$$

Po dosadení uvedených vzťahov do vzorca pre dynamickú podobnosť dostaneme:

$$\left(\frac{F_z}{F_t}\right)_M = \left(\frac{F_z}{F_t}\right)_D \rightarrow \left(\frac{\rho \cdot l^3 \cdot v^2}{\tau \cdot l \cdot v}\right)_M = \left(\frac{\rho \cdot l^3 \cdot v^2}{\tau \cdot l \cdot v}\right)_D$$

Po úprave tak dostávame výsledok, že Reynoldsovo číslo na modeli a na diele majú byť rovnaké $Re_M = Re_D$.

Obdobne

$$\left(\frac{F_p}{F_z}\right)_M = \left(\frac{F_p}{F_z}\right)_D \rightarrow \left(\frac{p}{\rho \cdot v^2}\right)_M = \left(\frac{p}{\rho \cdot v^2}\right)_D \rightarrow Eu_M = Eu_D, \text{ čiže Eulerovo číslo na modeli a diela majú byť rovnaké.}$$

A tiež

$$\left(\frac{F_z}{F_g}\right)_M = \left(\frac{F_z}{F_g}\right)_D \rightarrow \left(\frac{\rho \cdot l^3 \cdot v^2}{\rho \cdot l^3 \cdot g}\right)_M = \left(\frac{\rho \cdot l^3 \cdot v^2}{\rho \cdot l^3 \cdot g}\right)_D \rightarrow Fr_M = Fr_D, \text{ Froudovo číslo na modeli a na diele a majú byť rovnaké.}$$

V aplikácii teórie podobnosti a modelovania sú bezrozmerné parametre označované ako kritéria podobnosti (Re , Eu , Fr). V nasledujúcej tabuľke uvedieme aj ďalšie vybrané kritéria podobnosti.

Název kritéria	Označení	Vzorec	Interpretace	Použití
Froudeho	Fr	$\frac{w^2}{g \cdot l}$	Poměr sil setrvačných a tíhových.	Volné proudění tekutiny, vlnění tekutiny. Při vynuceném proudění odpadá.
Galileovo	Ga	$\frac{g \cdot l^3}{\nu^2}$	Poměr sil tíhových a vazkých při volném proudění ($Ga = Re^2 / Fr$).	Gravitační proudění vazké tekutiny.
Homochronismu (Strouhalovo)	Ho (Str)	$\frac{w \cdot \tau}{l}$	Bezrozměrový čas.	Charakterizuje ustálenost pohybu v soustavě.
Machovo	Ma	$\frac{w}{c}$	Poměr rychlosti proudění k rychlosti zvuku.	Průtok plynu vysokými rychlostmi.
Pecletovo dif.	Pe_D	$\frac{w \cdot l}{D}$	Poměr rychlosti konvektivního přenosu hmoty k difúznímu přenosu hmoty ($Pe = Re \cdot Sc$).	Přenos hmoty při proudění tekutin.
Reynoldsovo	Re	$\frac{w \cdot l}{\nu}$	Poměr sil setrvačných a vazkých.	Přenos hybnosti při proudění tekutin.
Schmidtovo	Sc	$\frac{\nu}{D}$	Poměr součinitele difúzního přenosu hybnosti a mol. difuzivity. Míra přenosu rychlosti hybnosti do rychlosti difúze.	Sdílení hmoty v tekutinách při volné a vynucené konvekci. Podobnost rychlostních a koncentračních polí.
Stokesovo	Stk	$\frac{w \cdot d^2 \cdot \rho}{\eta \cdot l}$	Poměr sil setrvačných a sil vazkých působících na pevnou částici v tekutině.	Klesání, sedimentace částic v tekutinách.

V praxi nikdy nie je možné vyhovieť všetkým podobnostným kritériám (čísлам), preto sa vyberajú pre daný problém niektoré z nich, a to podľa toho aké druhy pôsobiacich síl sú pre daný modelovaný dej najdôležitejšie. Podobnostné kritériá by na modeli a na diele mali byť rovnaké, alebo aspoň približné (v závislosti od vybraného kritéria). Pokiaľ ktorékoľvek z uvedených troch podobností nie je splnené, nie je možné považovať za modelovaný dej za fyzikálne podobný svojej predlohe, teda dielu. Výsledky takéhoto modelovania by boli zavádzajúce.

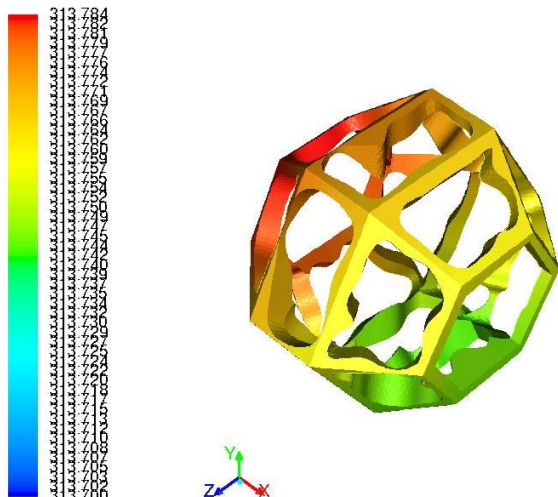
Počítačová dynamika tekutín

Počítačová dynamika tekutín (z anglického Computational Fluid Dynamics – CFD) je moderná metóda spájajúca poznatky najmä z odborov: Mechanika tekutín, Termomechanika, Numerická matematika a vedecko-technické výpočty, ktorej cieľom je pomocou softvéru a výkonných počítačov simulovať fyzikálne javy najrôznejšej komplexnosti.

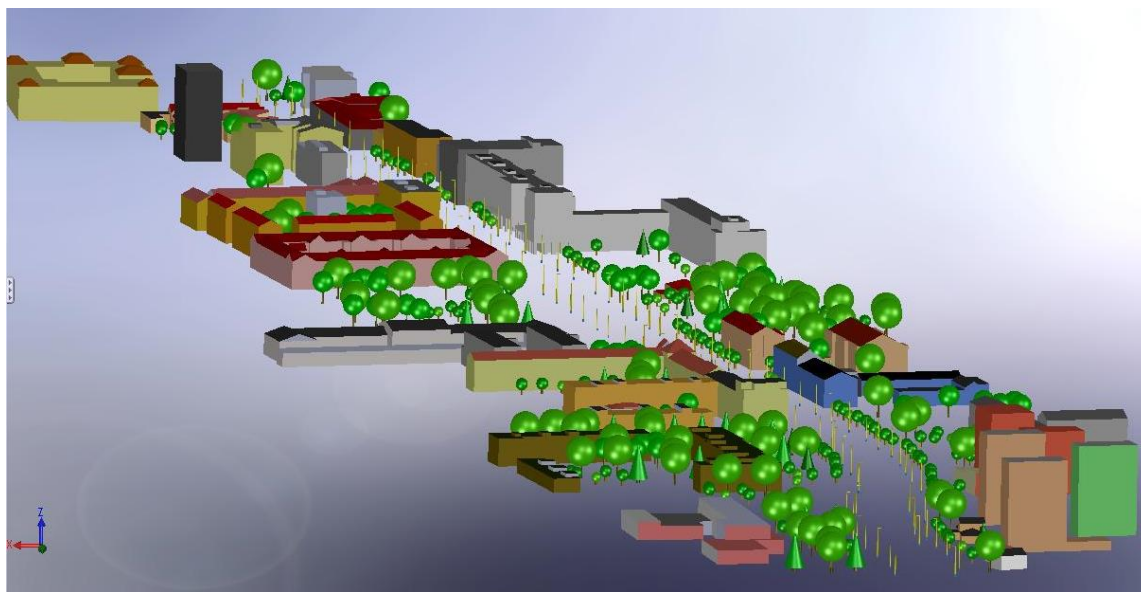
Počítačová dynamika tekutín je založená na numerickom riešení sústavy parciálnych diferenciálnych rovníc, ktoré vyjadrujú zákon zachovania hmotnosti (rovnica kontinuity), zákon zachovania hybnosti (Nvaier-Stokesove rovnice) a zákon zachovania energie (rovnica energie – prenos tepla konvekciou,

kondukciou alebo radiáciou). Tento základný súbor rovníc môže byť rozšírený o ďalšie, ktoré vyjadrujú prenos prímies (plynných kvapalných alebo pevných). Celá sústava je potom riešená niektorou z numerických metód, najčastejšie metódou konečných objemov.

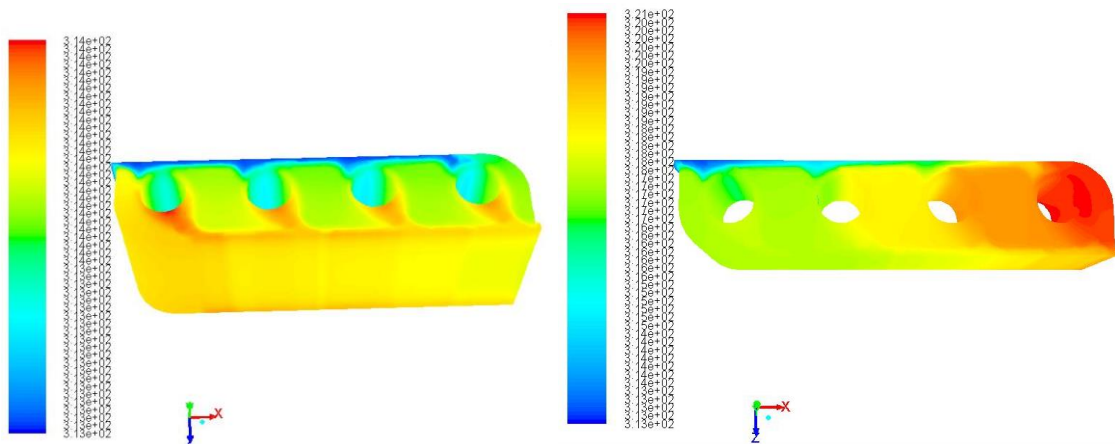
Skôr než sa začneme venovať podstate numerického modelovania fyzikálnych javov, uvedieme si niekoľko príkladov realizácie.



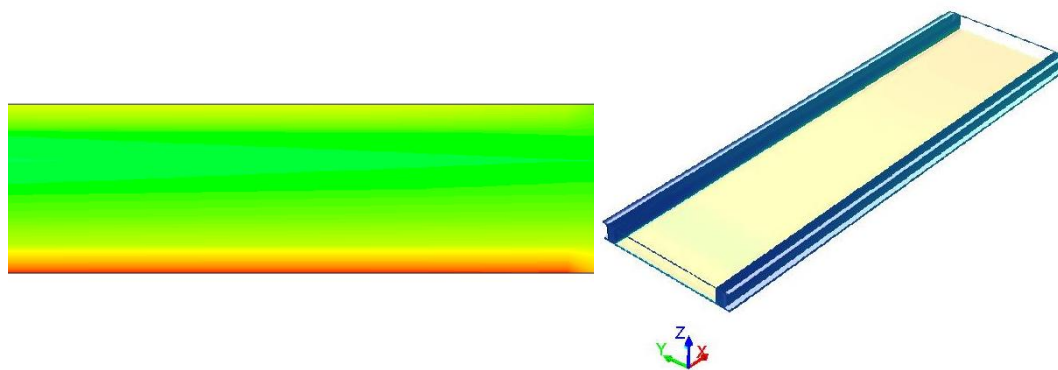
Distribúcia tepla v bunke kovovej peny – Kudelas, 2011



Prúdenie vzduchu v zastavaných oblastiach – Kudelas, 2012



Distribúcia tepla v novo vyvíjaných výmenníkoch tepla – Kudelas 2012



Distribúcia tepla vo vzduchových solárnych kolektoroch – Kudelas 2014

Úplne bežné je používanie CFD v aerodynamike, letectve, strojníckom a automobilovom priemysle, ale aj v baníctve. Numerické modelovanie fyzikálnych javov je úzko spojené s modelovaním určitej formy pohybu matematickými prostriedkami. Pohyb tekutín súvisí s riešením najrôznejších problémov, daných fyzikálnym modelom:

- laminárne a turbulentné prúdenie v jednoduchých i zložitých geometriách,
- stlačiteľné a nestlačiteľné prúdenie,
- stacionárne, nestacionárne a prechodové prúdenie,
- prenos a distribúcia tepla, prirodzená a zmiešaná konvekcia, radiácia,
- prenos chemickej prímеси vrátane chemických reakcií,
- viacfázové prúdenie, prúdenie s voľnou hladinou, prúdenie s pevnými časticami, bublinami, resp. kvapkami,
- horenie a chemické reakcie,
- prúdenie poréznym prostredím, atď.

Metódami numerickej matematiky, formuláciou okrajových a počiatočných podmienok sa z úlohy mechaniky tekutín formuluje matematický problém. Z formulácie určujúcich rovníc (fyzikálny model), ktoré sa spravidla nedajú riešiť analyticky, sa diskretizáciou získajú algebraické rovnice (matematický model). Úloha je určená tiež topológiou (geometrický model). Jedno jednoznačné riešenie sa získa stanovením počiatočných a okrajových podmienok. Cieľom riešenia sú všetky fyzikálne informácie o prúdiacej tekutine v ľubovoľnom mieste v priestore úlohy a v čase.

Na začiatku samotného procesu modelovania je nutné vytvoriť geometrický tvar (2D alebo 3D) výpočtovej oblasti, ktorá zahŕňa predmet modelovania a jeho najbližšie okolie. Veľkosť a tvar by mal umožniť zachytiť modelovaný dej.

Následne sa takáto výpočtová oblasť pokryje sieťou. To znamená, že je rozdelená na konečný počet 2D alebo 3D elementov (buniek) určitého konkrétneho geometrického tvaru, v ktorých budú počítané príslušné fyzikálne veličiny. Tieto sú počítané v geometrickom strede bunky. V ostatných medziľahlých priestoroch je realizovaná interpolácia resp. extrapolácia hodnôt. Druh a kvalita siete majú vplyv na dobu výpočtu a kvalitu výsledku. Kvalitná sieť je taká, ktorá je dostatočne jemná na zachytenie modelovaného deja a jej bunky majú čo najmenšiu tvarovú deformáciu voči svojmu ideálnemu tvaru.

V ďalšom kroku riešiteľ špecifikuje najvhodnejší matematický model a sub-modely pre riešenie danej úlohy. V prípade úloh pohybu a rozptylu plyných polutantov sa najprv volí model turbulencie pre výpočet prúdového poľa vzduchu a potom model prenosu prímiesí.

Ďalej je potrebné nastaviť okrajové a počiatočné podmienky úlohy. Okrajové podmienky sú informácie vyjadrené fyzikálnymi veličinami, ktoré charakterizujú stav na hraniciach výpočtovej oblasti, tj. na vstupe, výstupe alebo na stenách výpočtovej oblasti. Okrajové podmienky sa v priebehu výpočtu nemenia. Môžu byť zadané ako konštanty alebo ako funkcie priestorových súradníc, prípadne funkcie času a to v tvare funkcie polynomickej, funkcie po častiach lineárne alebo periodické. Počiatočné podmienky sú informácie vyjadrené fyzikálnymi veličinami, ktoré charakterizujú počiatočný stav situácie. Na rozdiel od okrajových podmienok, sa v priebehu výpočtu menia s každou iteráciou. Pokiaľ tieto informácie nie sú známe zadávajú sa aspoň približné hodnoty. Počiatočné podmienky majú vplyv na čas dosiahnutia konvergenzie riešenia úlohy, tj. dobu výpočtu.

V predposlednom kroku riešiteľ nastavuje matematické parametre pre výpočet tj. výpočtové schéma, relaxačné parametre, kritériá konvergenzie, atď. V niektorých prípadoch sú v tomto kroku nastavované funkcie pre budúce vyhodnotenie výsledkov. Toto sa týka predovšetkým nestacionárnych úloh.

Nasleduje spustenie samotného výpočtu a jeho priebežná kontrola. Na záver je realizované vyhodnotenie výsledkov pomocou štandardných nástrojov, ktoré softvér ponúka, alebo pomocou vopred nastavených funkcií pre vyhodnotenie (obrázky, grafy, tabuľky, animácie, časové priebehy fyzikálnych veličín)

Postup riešenia numerickej simulácie fyzikálnych javov, sa vlastne skladá z pracovných fáz (pre-processing, processing-solving a post-processing) ktoré by sme mohli tiež zhrnúť nasledovne:

Pre-processing (prípravná fáza)

- definovanie cieľov,
- vymedzenie modelovanej oblasti,
- vytvorenie topografického modelu – CAD,
- generovanie výpočtovej siete - rozdelenie oblasti na diskkrétne časti,
- definovanie okrajových a počiatočných podmienok,

- voľba matematického modelu,
- inicializovanie fyzikálnych veličín,
- nastavenie kontrolných parametrov

Processing – Solving (fáza riešenia)

- numerické riešenie - bilancovanie neznámych veličín

Post –processing (analytická fáza)

- verifikácia výsledkov,
- spracovanie a analýza získaných výsledkov,
- vizualizácia výpočtovej oblasti a siete,
- tvorba vektorových obrázkov,
- vizualizácia skalárnych veličín,
- kvalitatívne výpočty,
- tvorba animácií.

Výsledky získané počítačovou fluidnou dynamikou nezaručujú absolútnu zhodu so skutočnosťou. Je to dané:

- fyzikálnym modelom,
- vstupnými údajmi,
- výpočtovou kapacitou počítača a
- nedostatočným vedeckým poznaním.

Spôľahlivosť predpovede počítačovej dynamiky tekutín pri simulácii reálneho sveta je:

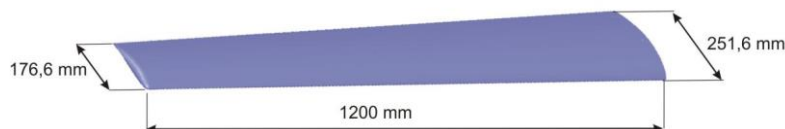
- vyššia pri laminárnom prúdení ako pri turbulentnom prúdení,
- vyššia pri jednofázovom prúdení ako pri viacfázovom prúdení,
- vyššia pri prúdení s jednoduchšími chemickými reakciami ako pri prúdení s komplexnými reakciami
- vyššia pri prúdení jednoduchších tekutín, ako pri prúdení komplexných kompozícií a zmesí.

Spôľahlivosť predpovede a teda dôvera ku výsledkom je kľúčovým problémom počítačovej dynamiky tekutín. Overenie je najspoľahlivejšie experimentálnymi metódami. Experimentálny výskum má predovšetkým potvrdiť správnosť a platnosť rôznych stupňov zjednodušených riešení. Experimenty sa robia napríklad v aerodynamických tuneloch obyčajne v geometricky a fyzikálne podobných, často tiež v modelových podmienkach.

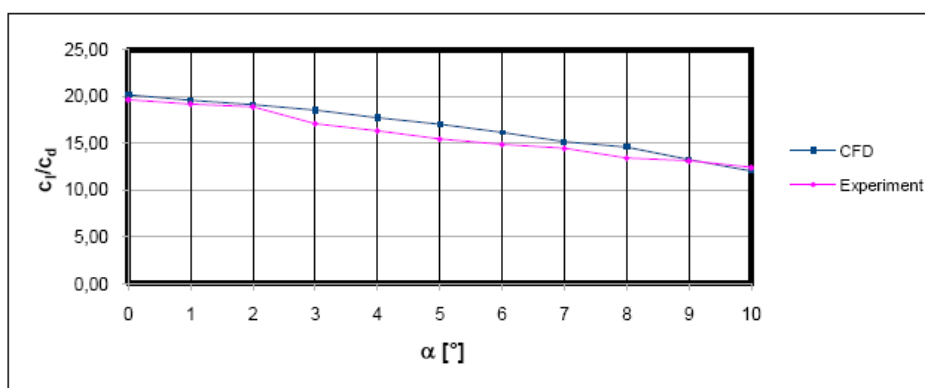
Merania sa musia uskutočňovať i v skutočných podmienkach technického diela napríklad priamo v kompresore, turbíne, alebo počas letu lietadla a pod. Z experimentálneho bádania vyplývajú tiež tzv.

etalóny, ktoré sú veľmi detailne zdokumentované a používajú sa jednak na hodnotenie výpočtov a tiež ako podnet pre rozvoj CFD.

Ako príklad by sa mohol uviesť porovnanie pomeru koeficientov vzlaku a odporu na liste rotora získaného pomocou CFD a testovaním vo veternom tunely. Na profil listu rotora bol použitý Wortmannov profil 63-137. Tento profil bol navrhnutý F.X. Wortmannom pre ľahké lietadlá. Má dobré aerodynamické charakteristiky napr. dosahuje vysoké hodnoty vzlaku a dobrú účinnosť pri rôznych hodnotách uhla nábehu. Je jedným z profilov, ktorý sa využíva pre malé veterné turbíny.



Špička listu rotora - Kudelas, 2010



Porovnanie pomeru koeficientov vzlaku a odporu na liste rotora - Kudelas, 2010.

Predpokladané rozdiely najmä pri uhloch nábehu 2 - 8° boli spôsobené trepotaním krídla v tunely.



Špička listu rotora v aerodynamickom veternom tuneli – Kudelas, 2010

Cieľom je preto dosiahnuť také nastavenie výpočtu, ktoré by spoľahlivo simulovalo experimentálny prípad a ďalšie podobné alternatívy počítané už bez experimentu. Tak sa výrazne zrýchli a zlacní výskum.

Výsledky výpočtov prúdenia na počítači potvrdzujú veľký potenciál počítačovej mechaniky tekutín. Počítačová dynamika tekutín pri porovnaní s experimentálnou mechanikou tekutín má celý rad výhod:

- Významne sa redukuje čas potrebný pre výskum a vývoj.
- Odpadá tradične časovo a finančne najnáročnejšia príprava modelu , testovania v aerodynamickom tuneli a následná rekonštrukcia modelu podľa výsledku experimentu.
- Dobré vyvinuté počítačové programy umožňujú pri vývoji vyžiť optimalizáciu mnohými alternatívnymi modelmi.
- Je možné simulovať reálne prúdenia, ktoré nie sú reprodukovateľné v experimentálnych podmienkach.
- Poskytuje detailnejšie a na druhej strane i všeobecnejšie riešenia.
- Je úspornejšia z hľadiska nákladov na investície.
- Spotrebuje menej energie ako experimentálne zariadenia, ktoré aby umožnili výskum detailov prúdenia, musia pracovať s veľkými modelmi.
- Umožňuje poznať parametre v celom priestore prúdenia
- Vizualizácia procesov

Výsledky počítačovej dynamiky tekutín môže využívať dnes každý a to nasledovným spôsobom:

- zadováži si (kúpi, prenajme) vhodný komerčný softvér, naučí sa jeho fyzikálne, matematické, programátorské princípy
- zadá úlohy do konzultantských inžinierskych kancelárií a kúpi výsledky a prípadne i ich interpretáciu,
- napíše vlastný počítačový kód a využíva ho.

Aby bolo možné zadať konkrétnu úlohu, musí užívateľ rozumieť predovšetkým tomu, aké typy úloh sa dajú riešiť. Úlohy, ktoré sa riešia v rámci počítačovej dynamiky tekutín, možno kategorizovať na tzv. úlohy priame a úlohy nepriame.

Riešením priamej úlohy sa v konkrétnom prípade topológie oblasti prúdenia (konštrukcie) získajú kvantitatívne údaje o prúdení. Zaujíma napríklad rozloženia tlakov, aerodynamické sily, oblasti odtrhnutého prúdenia, tlakové straty, rýchlosti prúdenia a pod. pomocou ktorých vieme rozhodnúť, či je konštrukcia navrhnutá dobre vzhľadom na kvalitu prúdenia.

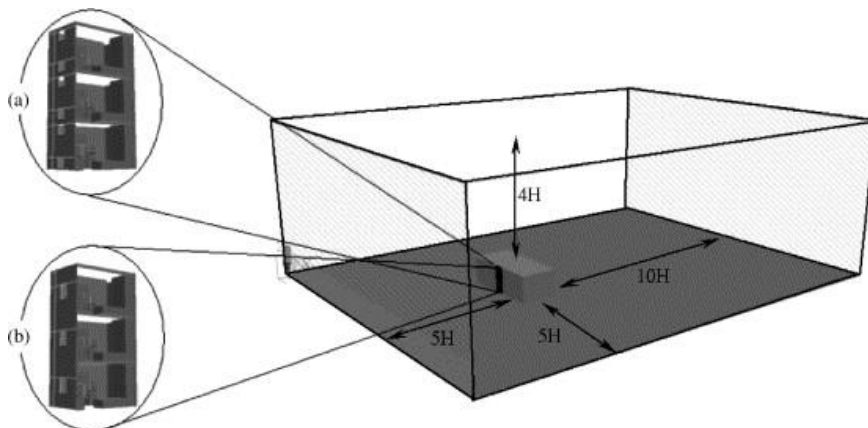
V praxi je však úloha formulovaná i obrátene. Riešením nepriamej (inverznej) úlohy, ktorá je podstatne zložitejšia, sa na základe kvantitatívnych údajov o prúdení vypočíta geometria priestoru konštrukcie pretekanej, alebo obtekanej tekutinou. Takouto technológiou sa navrhujú napríklad lopatky resp. tvary rôznych zariadení.

Základy numerického modelovania

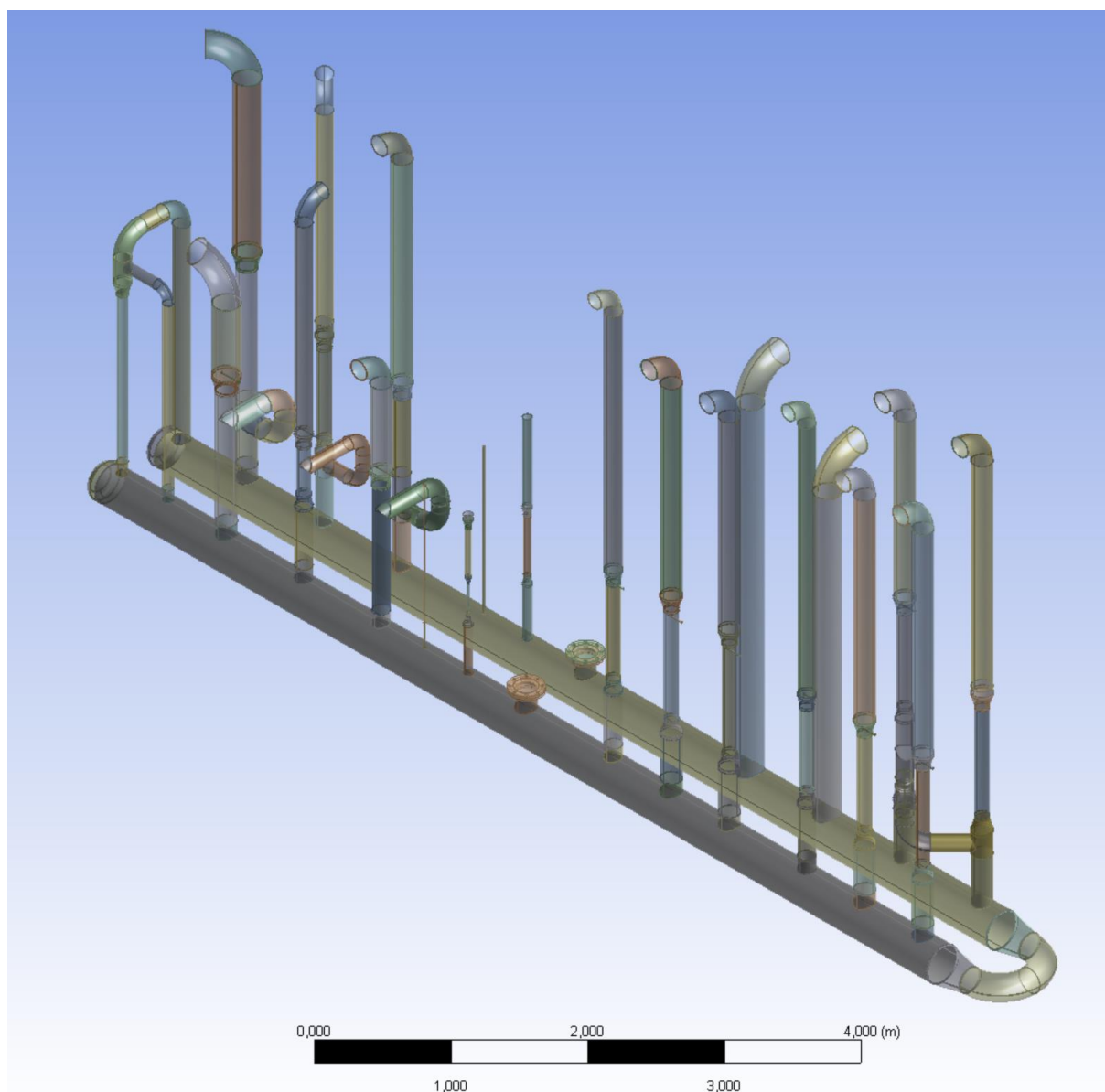
Uvedieme si niekoľko postupov platných pri numerickom modelovaní, ktoré je potrebné dodržať, aby sme dosiahli želaný výsledok

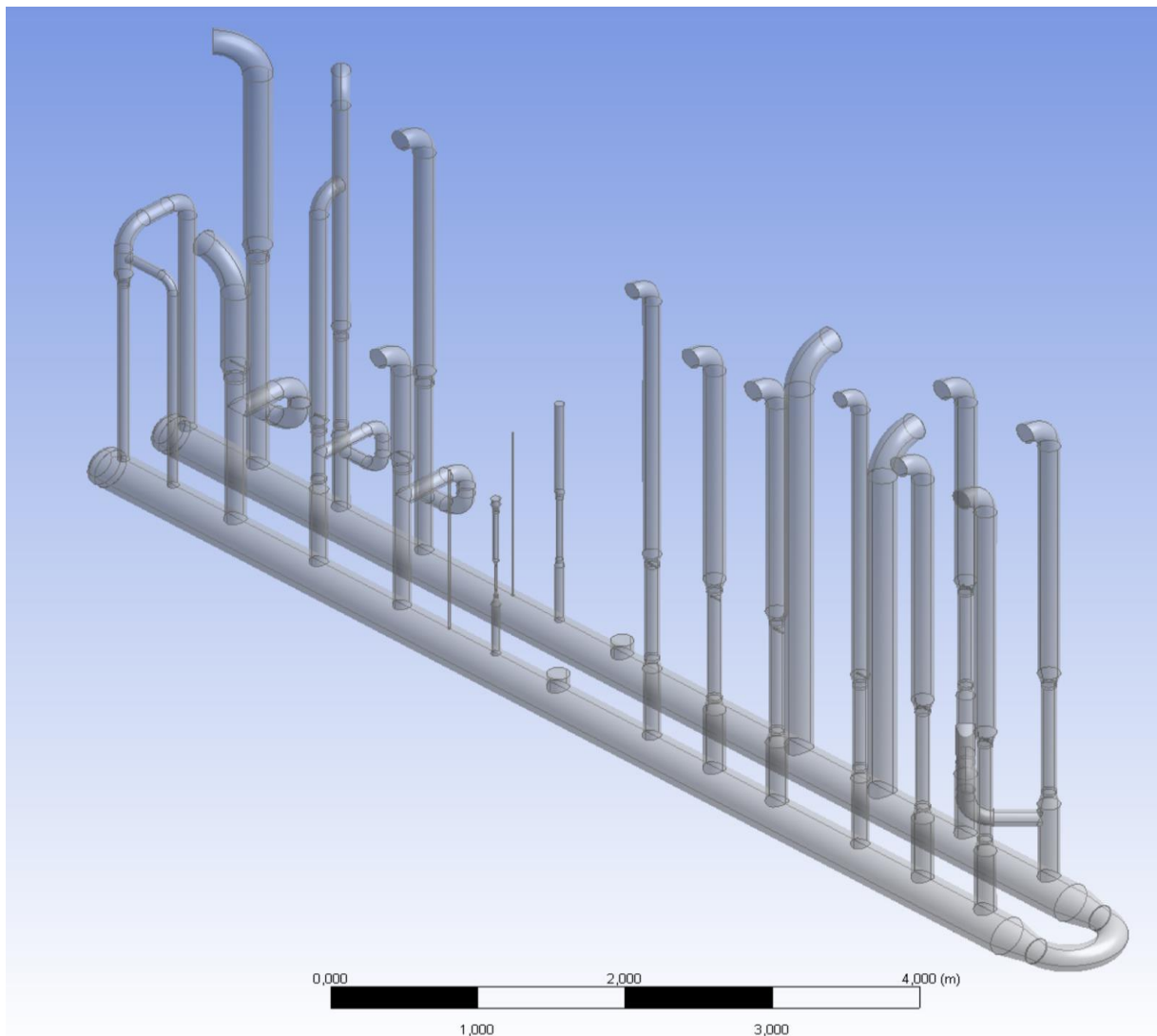
Rozmer a tvar výpočtovej oblasti

Výpočtová oblasť je 2D alebo 3D geometrické teleso príslušného tvaru a rozmerov, ktoré reprezentuje objekt modelovania a jeho blízke okolie. Predmet modelovania by mal byť vystihnutý v čo najjednoduchších rysoch, ktoré majú zásadný vplyv na priebeh a podobu fyzikálneho deja. Zbytočne detailný dizajn má značne zvýšené nároky na jemnosť siete a počet buniek, ktoré potom značne predlžujú čas výpočtu a zvyšujú hardvérové nároky na výpočtovú techniku. Blízkym okolím objektu modelovania je myslená oblasť dostatočne veľká a tvarovo vhodná, aby v nej bolo možné modelovaný dej zachytiť. Príliš malá oblasť napr. pri obtekaní znemožní správny výpočet. Príliš veľká oblasť zas zbytočne predlžuje čas výpočtu a zaťažuje výpočtovú techniku. Kritériá veľkosti výpočtovej oblasti je možné vždy stanoviť iba osobitne pre práve riešenú úlohu a na základe subjektívneho úsudku, znalosti a skúsenosti riešiteľa.



Výpočtová oblasť je definovaná tvarom, hodnotami dĺžok a hodnotami uhlov. Celý topografický model je možné vytvoriť priamo v modelovacom softvéri, alebo v špecializovanom preprocesore. Vytvorenie topografického modelu je možné v programovom balíku ANSYS CFD pomocou softvéru Design Modeler (DM), ktorý je vo WORKBENCH dostupný pod názvom Geometry. Okrem vlastnej tvorby geometrie umožňuje aj načítanie geometrií z iných CAD systémov (CAD, CATIA, I-DEAS, Pro/ENGINEERING, SolidWorks). Dôležité je si uvedomiť, že výpočtová oblasť, resp. niekde sa uvádza aj výpočtový objem predstavuje objem, ktorý nie je súčasťou výkresovej dokumentácie. Tekutina vyplní dutiny obsiahnuté v strojnom celku. Pokiaľ riešiteľ obdrží parametrický model vytvorený v 3D CAD systéme je nutné vždy geometriu upraviť a 3D model vyplniť tekutinou, čím vznikne inverzný 3D objem, ktorý reprezentuje tekutinu. Vonkajšie telesá je potom možné z modelu väčšinou odstrániť. Pokiaľ nie je k dispozícii 3D parametrický model oblasti je nutné samostatne vytvoriť 3D model, je možné začať kresliť inverzný 3D objem, bez toho aby bolo nutné kresliť vonkajšie reálne pevné steny.

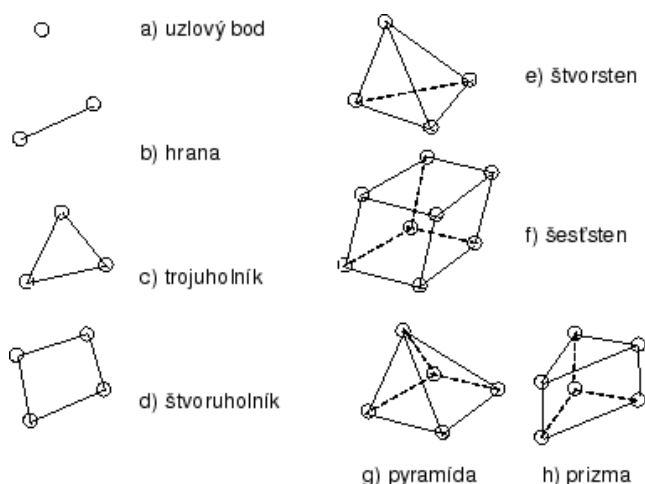




Vnútrotný objem – Kudelas, 2017

Druh a kvalita výpočtovej siete

Počítačové riešenie Navier-Stokesových a Eulerových rovníc CFD vyžaduje, aby fyzikálny priestor v ktorom sa počíta prúdenie bol diskretizovaný. Znamená to, že priestor, kde sa numericky riešia rovnice prúdenia sa najprv pokryje uzlovými bodmi. Spojnica dvoch susedných bodov tvorí hranu. Z hrán sa zostavia rôzne prvky do dvojrozmernej, alebo trojrozmernej siete (bunky).

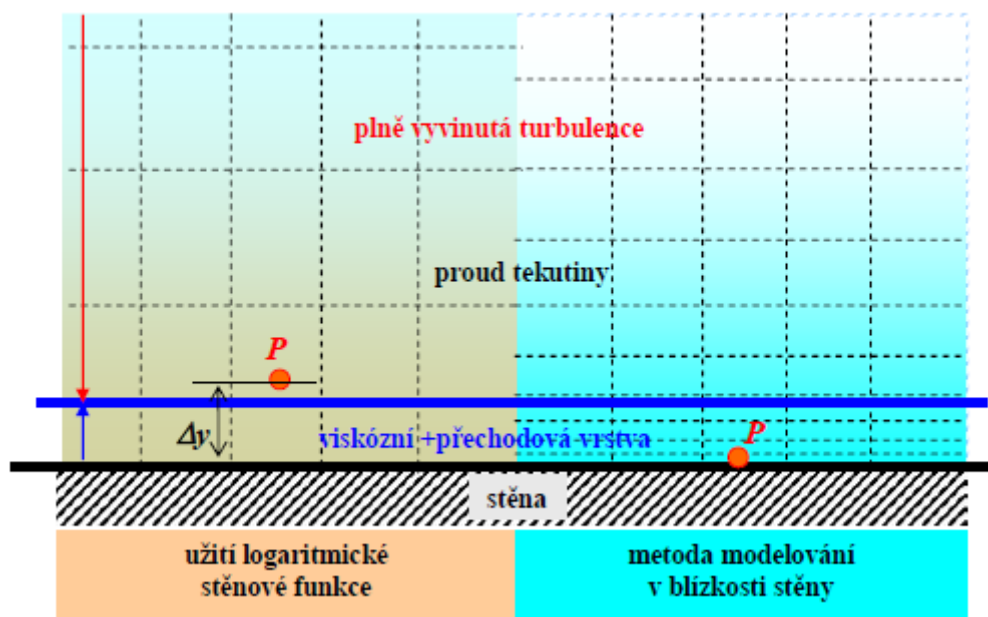


Prvky siete - Molnár

Sieť je charakterizovaná štyrmi parametrami: počtom buniek, veľkosťou buniek, typom buniek (geometrickým tvarom) a kvalitou buniek.

Počet buniek je pre riešiteľa limitujúcim faktorom s ohľadom na hardvérové nároky počítača. Výpočet je o to náročnejší, čím viac má výpočtová oblasť buniek a čím menej kvalitná je sieť výpočtovej oblasti. Cieľom každého riešiteľa s ohľadom na čas výpočtu je redukovať počet buniek na nutné minimum. Z hľadiska počtu buniek predstavuje obrovský nárast napríklad vytváranie tzv. medzných vrstiev. Pri výpočtoch HPC (high performance computing) už problematika počtu buniek ustupuje.

Veľkosť buniek sa odvíja od potreby limitovania ich počtu ale aj od druhu fyzikálneho deja, ktorý je modelovaný. Bunky s ohľadom na svoj celkový počet by mali byť čo najväčšie, ale mali by byť zároveň dostatočne malé na to aby bolo nimi možné zachytiť modelovaný fyzikálny proces. Závisí to vždy od konkrétnej úlohy. Ako príklad by sme mohli uviesť modelovanie prúdenia okolo nosníka. Ak nás zaujíma pôsobiaca sila na nosník stačia bunky väčších rozmerov, ale ak chceme zachytiť vírové štruktúry v medznej vrstve, tak je potrebná veľmi jemná sieť.

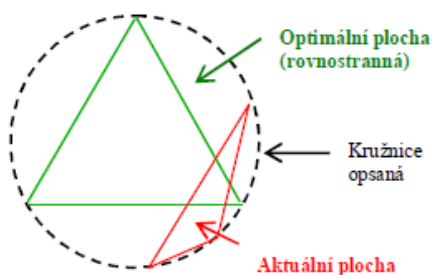


Typ buniek hovorí o ich geometrickom tvare. Bunky na seba musia nadväzovať, bez akýchkoľvek zbytkových priestorov.

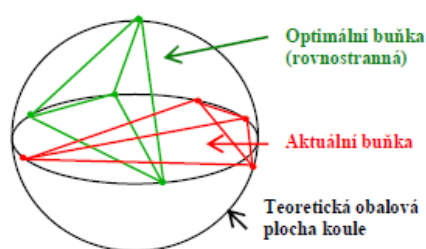
Kvalita buniek vypovedá o miere tvarovej deformácie buniek v porovnaní s jej ideálnou podobou. Kvalitná sieť je taká, ktorá sa skladá z na seba nadväzujúcich geometricky pravidelných približne rovnako veľkých a pravidelne po celej výpočtovej oblasti rozložených elementov (buniek). Čím je deformácia tvaru bunky výraznejšia, tým menej kvalitná je potom sieť. Kvalita siete má vplyv na dĺžku výpočtu a kvalitu výsledku.

Kritériá pre posúdenie kvality siete sú:

- veľkosť buniek (s ohľadom na modelovaný dej a požiadavku na presnosť výpočtu)
- vhodnosť usporiadania buniek v priestore (napríklad zhustenie v miestach zaujímavých z hľadiska prúdenia tekutín) s ohľadom na konkrétny typ úlohy
- nesúmernosť – Skewness, pokiaľ je bunka akokoľvek deformovaná, je jej kvalita horšia. Všeobecne sa kvalita každej bunky vyjadruje bezrozmerným číslom v rozsahu 0 – 1, kde 0 znamená výsledok najlepší a naopak 1 výsledok najhorší, teda problematickú bunku pre výpočty. Tato hodnota sa nazýva „miera skosenia bunky“ (angl. „skewness measure“) alebo tiež miera deformácie. Hraničná hodnota je 0.9. Ak máme bunky s vyššou hodnotou skosenia je potrebné mriežku upraviť
- pomer hrán (plôch) prvkov - Aspect Ratio. V prúde do 5:1, v medznej vrstve do 10:1, nad 35:1 prenos energie neriešiteľný (problém stability)



$$\text{Skewness measure (TRI)} = \frac{S_{\text{optimal}} - S_{\text{real}}}{S_{\text{optimal}}}$$



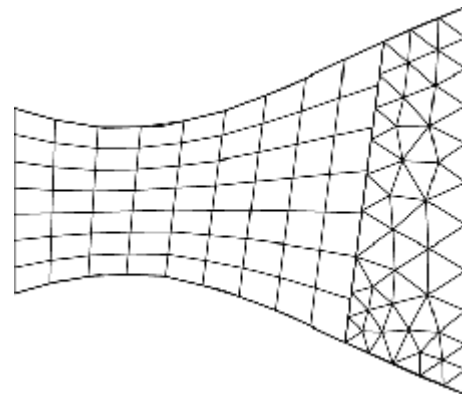
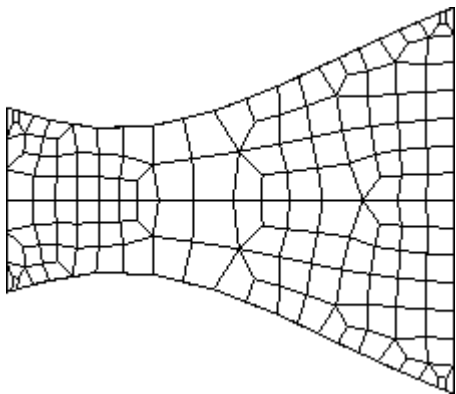
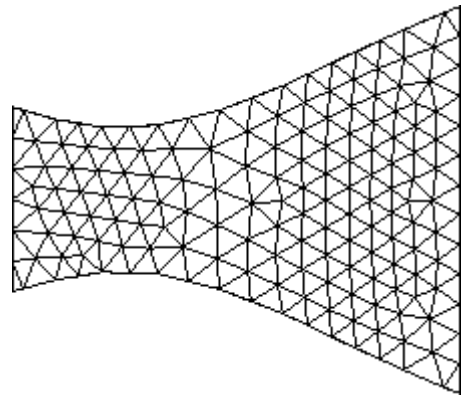
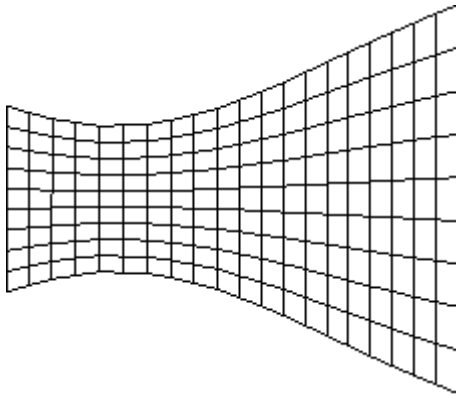
$$\text{Skewness measure (TET)} = \frac{V_{\text{optimal}} - V_{\text{real}}}{V_{\text{optimal}}}$$

Kozubková

Typy sietí

Rozlišujeme niekoľko typov sietí. Sieť v priestore alebo v rovine môže byť:

- štruktúrovaná
- neštruktúrovaná
- hybridná
- zonálna

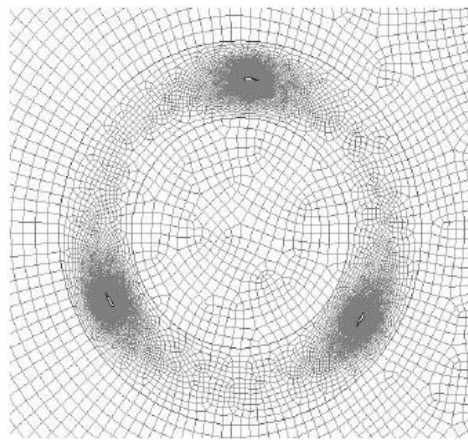
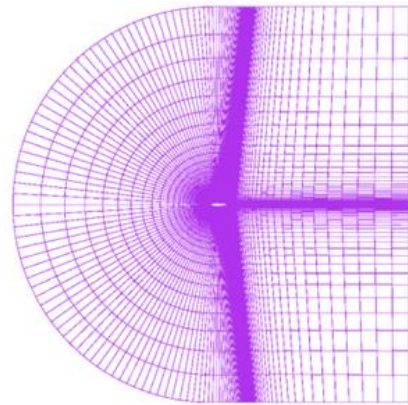
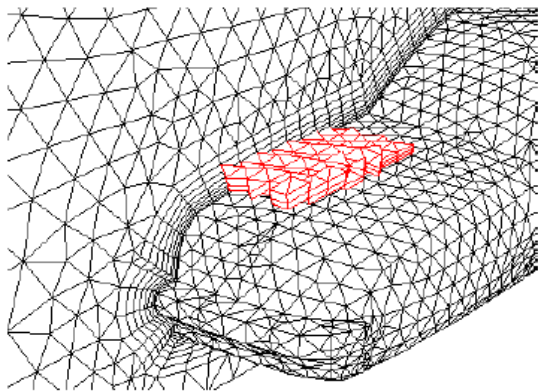


Typy sietí - Molnár

Výhody a nevýhody použitia jednotlivých typov sietí

- Štruktúrovaná – výhody: nižší počet buniek, čo zráchľuje výpočtový čas a znižuje hardvérové nároky počítača, vhodná na modelovanie prúdenia v medznej vrstve
- Štruktúrovaná – nevýhody: komplikované vytvorenie siete pri zložitých geometriách, nemožnosť dodatočne sieť zahustiť,
- Neštruktúrovaná – výhody: jednoduchšie vytvorenie siete, možnosť dodatočného zahustenia siete, výhodné použitie pri zložitých geometriách
- Neštruktúrovaná – nevýhody: vysoký počet buniek, možnosť vytvorenia nekvalitnej siete, na ktorej môže klesať presnosť výpočtov

Príklady sietí



Sieť je možné generovať manuálne alebo automaticky pomocou preddefinovaných schém. Manuálna tvorba siete vždy začína na hranách, pokračuje na plochách a končí na objemoch výpočtových oblastí. Tvorbu siete je možné realizovať v prostredí ANSYS cez softvér Meshing, ktorý je vo WORKBENCH dostupný pod názvom Mesh.

Časová závislosť

Výsledok časovo nezávislej úlohy – stacionárnej, ukazuje stav systému v momente, keď by sa priebeh fyzikálneho deja ustálil natoľko, že by zmeny jednotlivých fyzikálnych veličín neprekračovali danú nastavenú presnosť výpočtu.

Výsledok časovo závislej úlohy – nestacionárnej, ukazuje stav systému v jednotlivých časových úsekoch odpovedajúcich nastavenému časovému kroku. Je možné sledovať dynamický vývoj situácie, ktorú výpočet pokrýva. Výber veľkosti časového kroku je náročný a vyplýva z pozorovaného deja. Je možné prispôbovať veľkosť časového kroku podľa intenzity zmien v počiatočnom štádiu. Časový krok by mal byť prispôbený tak, aby sa dosiahla konvergencia (výsledok) v priebehu 0 – 20 iterácií. Rozhodnutie či úlohu definovať ako stacionárnu alebo nestacionárnu, vyplýva z povahy modelovaného fyzikálneho deja, alebo zo skúseností autora.

Materiálové vlastnosti

Materiálové vlastnosti tj. fyzikálne vlastnosti plyných, kvapalných a pevných látok vystupujúcich do výpočtu, je možné definovať ako konštanty alebo ako funkcie. Ak ide o funkcie jedná sa o závislosť dvoch a viac fyzikálnych vlastností. Tieto funkcie môžu byť lineárne, polynomicke, kvadratické, logaritmické alebo exponenciálne. Najbežnejšie pevné, kvapalné a plyné látky a ich vlastnosti bývajú

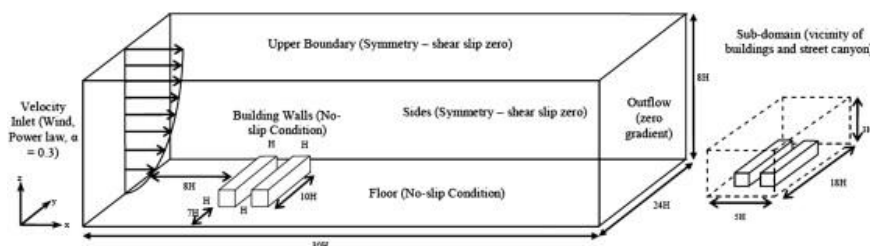
bežne definované v databáze simulačného softvéru. Presnosť a komplexnosť materiálových vlastností sa významne podieľajú na presnosti výsledkov a celého modelovania.

Okrajové podmienky

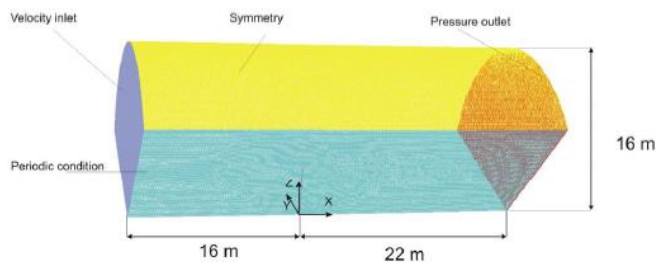
Okrajové podmienky sú fyzikálne veličiny definované na hraniciach výpočtovej oblasti, ktoré vyjadrujú fyzikálnu podstatu modelovaného deja. V priebehu modelovania sa nemenia, ale môžu byť nastavené ako konštanty priestorového funkčného profilu aj ako časovo závislé funkcie. Okrajová podmienka musí byť vždy zrejmalá na začiatku modelovania. Volí sa taká okrajová podmienka, ktorá vystihuje funkčnú podstatu danej časti hranice výpočtovej oblasti. Napr. okrajová podmienka pre vstup sa dáva na vstup, výstup na výstup, stena na stenu atď. Pre vstup a výstup existuje viac typov okrajových podmienok, ktoré sa líšia škálou možností zadania vstupných dát. Správna voľba typu okrajových podmienok má vplyv na kvalitu výpočtu.

Príklady okrajových podmienok:

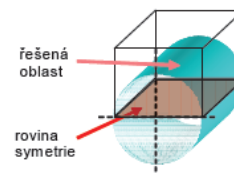
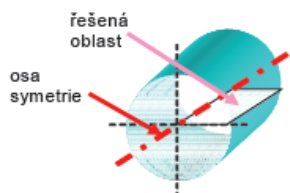
- Pressure Inlet – reprezentuje stenu, ktorou do výpočtovej oblasti vstupuje tekutina. Definuje sa celkový tlak a skalárne vlastnosti toku na vstupe
- Velocity Inlet – reprezentuje stenu, ktorou do výpočtovej oblasti vstupuje tekutina. Definuje sa rýchlosť a skalárne vlastnosti toku na vstupe.
- Mass Flow Inlet – reprezentuje stenu, ktorou do výpočtovej oblasti vstupuje tekutina. Definuje sa hmotnostný tok.
- Inlet Vent – reprezentuje stenu, ktorou do výpočtovej oblasti vstupuje tekutina. Definuje sa vstupný otvor s uvedeným stratového súčiniteľa.
- Intake Fan – reprezentuje stenu, ktorou do výpočtovej oblasti vstupuje tekutina. Definuje sa externý ventilátor s tlakovou stratou
- Pressure Outlet – reprezentuje stenu, ktorou z výpočtovej oblasti vystupuje tekutina. Definuje sa tlak na výstupe
- Pressure Far-Field – Definuje sa tlakové pole?
- Outflow -
- Outlet Vent
- Exhaust Fan
- Wall – reprezentuje pevné steny výpočtovej oblasti.
- Symmetry – reprezentuje stenu, ktorá predstavuje rovinu symetrie v reálnej situácii. Pri prúdení v otvorenom priestore sa zvykne využívať na vymedzenie priestoru prúdenia.



- Periodic – reprezentuje steny výpočtovej oblasti, ktoré cyklicky opakujú výpočtovú oblasť.

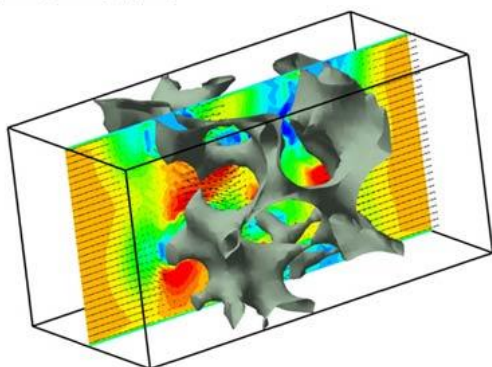


- Axis

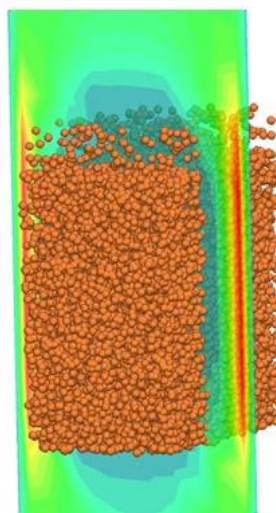


- Fan
- Radiator
- Porous Jump, porous zone

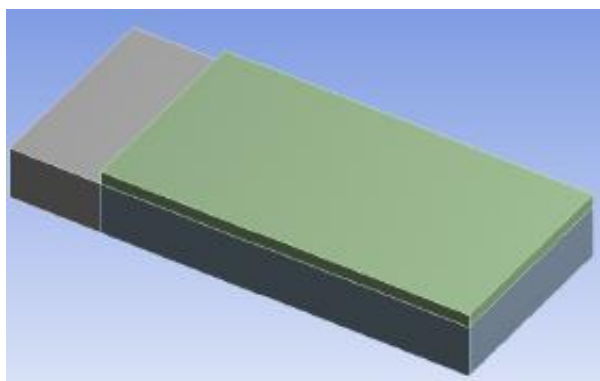
Flow through porous material
(Geometry from tomography data)



ASCOMP GmbH
TransAT TestSuite



- Interior – reprezentuje vnútorný priestor výpočtovej oblasti.
- Interface – reprezentuje stenu rozhrania vo výpočtovej oblasti, ak je táto tvorená viacerými objemami. Neovplyvňuje prúdenie.



Počiatkové podmienky

Počiatkové podmienky sú fyzikálne veličiny, ktoré slúžia ako prvotný odhad výsledkov. Sú to napríklad hodnoty očakávaných hodnôt rýchlostí, tlakov alebo teplôt. Od týchto hodnôt začína iteračný proces numerického výpočtu. Ak tieto nie sú zadane, iteračný proces začína s nulovými hodnotami všetkých určujúcich veličín. Počiatkové podmienky je možné zadať vo forme konštánt fyzikálnych veličín.

Výber modelu

Výber modelu vyplýva z povahy samotného fyzikálneho deja. Je nutné zvoliť si model, ktorý zvládne vyriešiť danú úlohu. Je potrebné poznať modely, pretože jednotlivé modely sú vhodné pre špecifické typy úloh. Už bolo vyššie uvedené že pri numerickom modelovaní sa pre prenos hybnosti prúdenia používa rovnica zachovania hybnosti, rovnica kontinuity. Pokiaľ je prúdenie stlačiteľné, alebo zahrňuje prenos tepla, riešia sa rovnice zachovania energie. Ďalšie bilančné rovnice môžu byť použité, pokiaľ dochádza k zmiešavaniu, chemickým reakciám, či horeniu.

Stabilita a konvergencia riešenia

Konvergencia a stabilita riešenia úzko súvisia. Konvergenciu riešenia diskretizovaných určujúcich rovníc k exaktnému riešeniu možno dosiahnuť iba ak je algoritmus riešenia stabilný. Pre riešenie "dobré formulovaného matematického problému" za podmienky ekvivalencie diskretizácie je stabilita nutnou podmienkou konvergenzie. Nestabilný algoritmus naopak je sprevádzaný výskytom oscilácií riešenia, ktoré nemajú zdôvodniteľnú fyzikálnu podstatu. Oscilácie sa v priebehu riešenia zväčšujú. Logika výpočtu je síce správna, ale počítač, ktorý nie je z hľadiska vykonávaných aritmetických operácií dokonalý nástroj, dáva riešenie, ktoré nekonverguje. Chyba, ktorá vznikne v priebehu jednej aritmetickej operácie sa šíri v celom vyčíslňovanom procese

Dôležitý predpoklad úspešného riešenia diskretizovaných rovníc prúdenia je konvergencia riešenia k exaktnému riešeniu. Konvergenciu ovplyvňuje predovšetkým stabilita algoritmu výpočtu. Na vývoji konvergenzie sa podieľajú nasledovné faktory:

A. iteratívna konvergencia

Vo všeobecnosti CFD metódy sú založené na kráčaní v čase. Simulácia stacionárneho stavu vychádza z odhadnutého prúdového poľa a iteračným postupom sa v čase riešenie ustáli. Pri kráčaní v čase sa sledujú zmeny v riešení počas jednej iterácie (reziduá) v celej oblasti riešenia.

B. časová konvergencia

Transientné (nestacionárne) výpočty kráčaním v čase sa odlišujú v tom, že okrajové podmienky sa menia v čase. Časový interval sa rozdelí na časové úseky, počas ktorých sa okrajové podmienky považujú za stacionárne. Ak sa dosiahne ustálenie riešenia, fyzikálny čas sa posunie o ďalší interval. Konvergencia sa monitoruje z hľadiska dosiahnutia stanoveného fyzikálneho času a či sa v jednotlivých časových krokoch dosiahla požadovaná konvergencia. Časová presná konvergencia vyžaduje analýzu citlivosti na veľkosť časového kroku. Možné chyby sú potom spojené s časovým filtrovaním a nedostatočným rozlíšením časovej mierky v nestacionárnom prúdovom poli

C. konzistencia riešenia

Integrálne veličiny ako hmotnostný tok, vztlak, odporová sila a pod. takisto môžu indikovať dosiahnutie konvergenzie a fyzikálnu správnosť riešenia. Kritérium konvergenzie je založené

na akceptovateľnej chybe týchto veličín. Monitoruje sa, či sa sledovaná veličina počas postupujúcich iterácií už nemení.

D. priestorová (sieťová) konvergencia

Priestorová (sieťová) konvergencia sa monitoruje z hľadiska, či výsledky výpočtu ležia v asymptotickej oblasti konvergenzie. To je predpoklad, aby vypočítané hodnoty boli nezávislé od diskretizácie a aby sa dalo zistiť pásmo chyby vzhľadom na exaktné riešenie, v ktorom ležia výsledky. Základom analýzy sieťovej konvergenzie je výpočet úlohy s rôznym počtom bodov. Najjednoduchší spôsob generovania série sietí uzlových bodov pre overenie asymptotickej oblasti sieťovej konvergenzie je vytvorenie siete bodov s jemným delením, ktoré dosahuje kapacitu možností z hľadiska počtu bodov, alebo trvania výpočtu. Ďalšia sieť v sérii sa získa vynechaním každého druhého bodu v každom smere súradnicových osí. Rovnako dostaneme zo stredne hustej siete vynechaním bodov hrubú sieť.

Neistota výsledku a chyby

Neistota predstavuje deficit v niektorej fáze alebo aktivite procesu modelovania spôsobené nedostatočnými znalosťami. Nedostatočné znalosti predovšetkým fyzikálnych procesov sa prenášajú do modelu. Analýzy citlivosti riešenia na parametre modelu a analýza neistoty výsledku riešenia pomáhajú lepšie ohraničiť neistoty.

Chyba je poznaný deficit v každej aktivite alebo fáze modelovania alebo simulácie, ktorý nemá pôvod v nedostatočných vedomostiach

1) Priznané chyby

- chyby fyzikálnej aproximácie
chyba z fyzikálneho modelu
chyba z geometrického modelu
- chyby zaokrúhľovania v aritmetike počítača
- chyby z iteratívnej konvergenzie
- chyby diskretizácie
chyba priestorovej diskretizácie
chyba časovej diskretizácie

2) Nepriznané chyby

- chyby programovania
- chyby používania programu

Validácia a verifikácia riešenia

Validácia je proces určenia miery presnosti a reprezentatívnosti počítačového modelu reálneho sveta z perspektívy predpokladaného využitia modelu. Validáciou sa skúma, či koncepčný model, spracovaný ako počítačový model implementovaný do CFD kódu a počítačová simulácia zodpovedajú pozorovaniu reálneho sveta. Pritom sa identifikujú a kvantifikujú chyby a neistoty na základe porovnania počítačovej simulácie s experimentálnymi údajmi. Experimentálne údaje majú tiež svoje chyby, ktoré musia byť rovnako kvantifikované a dokumentované. Presnosť s akou sa validácia robí závisí od konkrétnych

prípadoch a musí byť z hľadiska presnosti dostatočne flexibilná, aby sa dali dosiahnuť rôzne úrovne presnosti. My používame výpočtové matematické modely, ktoré sú už validované.

Každá CFD simulácia si však vyžaduje verifikáciu výpočtu. Verifikácia je proces dôkazu, že modelová implementácia presne reprezentuje koncepčný zámer modelu a jeho riešenie. Verifikácia sa tiež vysvetľuje ako správne riešenie rovníc prúdenia. Sústreďuje sa viac na matematiku ako na fyziku. Identifikujú sa chyby programovania a implementácie modelu.

Dokumentácia a prezentácia výsledkov

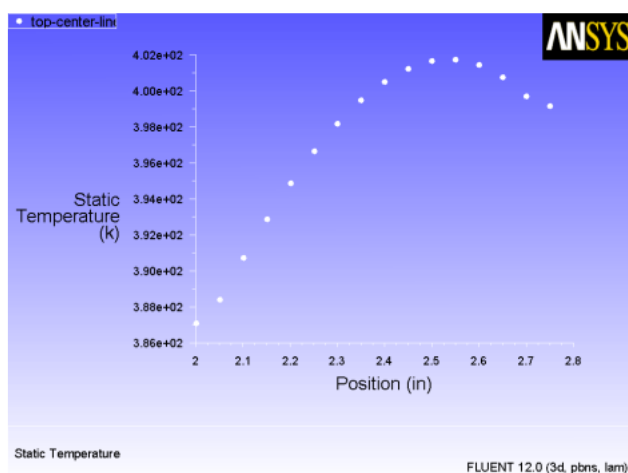
Výsledky, ktoré sa získajú počítačovou simuláciou a majú sa v praxi využívať musia byť predovšetkým dôveryhodné. Dokumentácia a prezentácia výsledkov CFD výpočtu má obsahovať nasledovné údaje:

- Cieľ CFD analýzy
- Zjednodušenia geometrie
- Hustota siete
- Počiatkové a okrajové podmienky
- Rovnice a fyzikálny model
- Nastavenie algoritmu
- Kritériá iteračnej konvergenencie
- Kritériá sieťovej konvergenencie
- Výsledky (hodnoty, grafy, vizualizácie...)
- Kvantifikovateľné chyby
- Citlivosť na parametre a modely (turbulencia, spolupráca rotora a statora, chémia...)

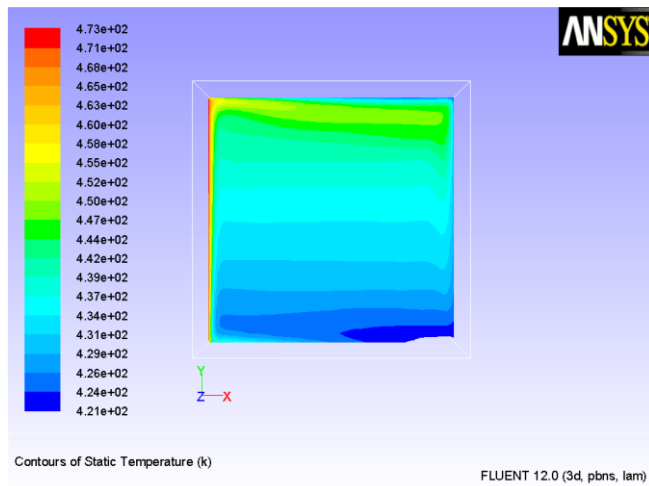
Vizualizácia výsledkov

Vizualizácia výsledkov je dôležitým krokom v procese modelovania. Vypočítané výsledky je potrebné predstaviť a interpretovať aby napomohli riešiť problémy v technickej praxi. Základné spôsoby, akými sa prezentujú údaje v CFD možno zaradiť do niektorých kategórií:

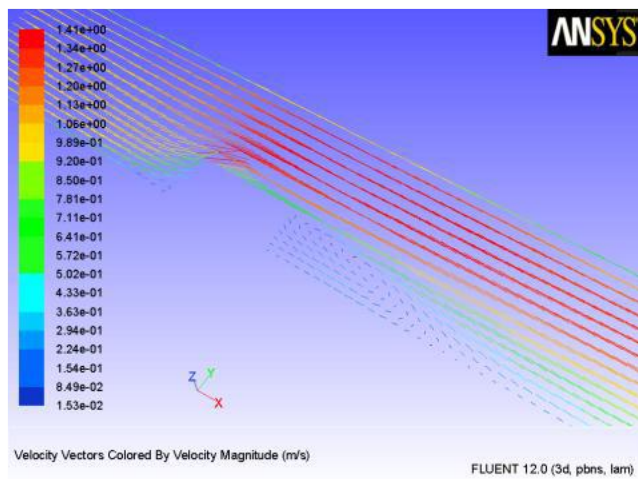
- graf



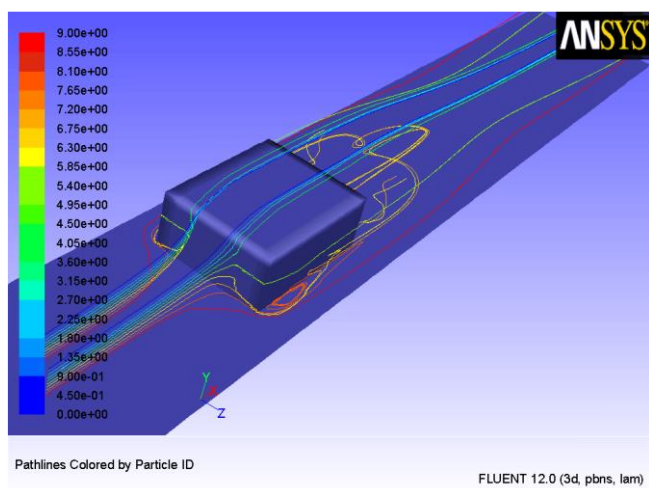
- izočiarly, izoplochy



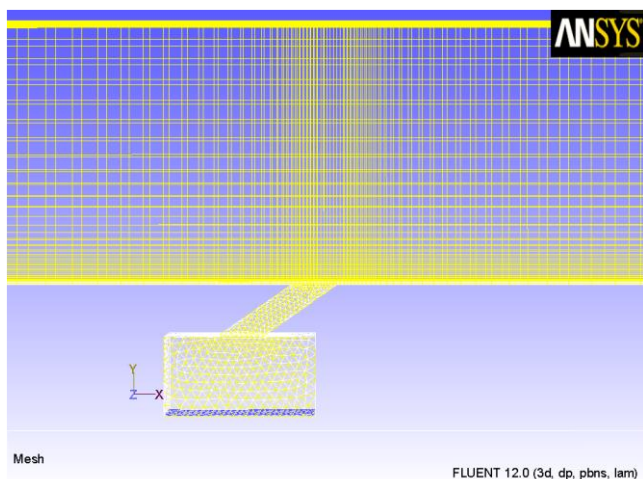
- vektory rýchlosti



- prúdové čiary (prúdnicu, dráha častice, dymová čiara, časová čiara)



- zobrazenia siete

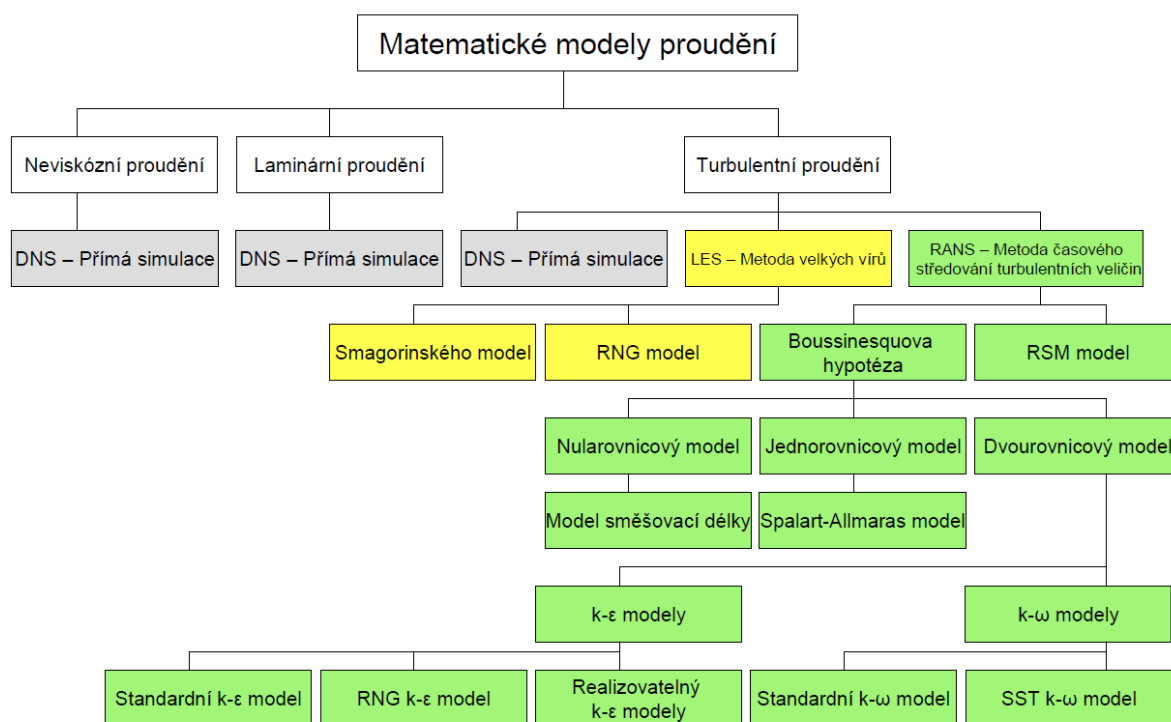


▪ kompozície a animácie

V prípade stacionárnych úloh nie je potrebné vopred nastavovať kritéria vizualizácii pred začiatkom výpočtu. Pre vyhodnotenie výsledkov sú nástroje, ktoré program poskytuje zväčša dostatočné. V prípade nestacionárnych úloh, ktoré prinášajú dynamickú zmenu mnohých fyzikálnych veličín, štandardné nástroje nepostačujú. Je preto potrebné nastaviť záznam jednotlivých veličín a spôsoby vizualizácie dopredu pred spustením numerickej simulácie, tak aby zmena parametrov v požadovanej podobe bola sledovaná a ukladaná v zvolenom časovom kroku. Týmto spôsobom je možné tvoriť rôzne druhy animácií a dynamických grafov.

Modely

Pri modelovaní prúdenia sa rozhodujeme, aký typ prúdenia chceme modelovať (neviskózne, laminárne alebo turbulentné). Modelovanie turbulencie je kľúčovým problémom väčšiny CFD simulácií. Prakticky všetky inžinierske aplikácie sú turbulentné, a preto vyžadujú model turbulencie.

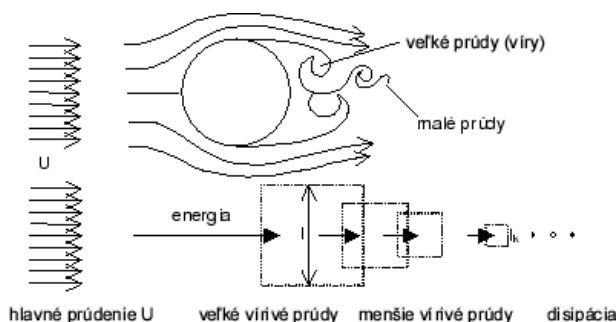


Turbulencia je deterministický náhodný pohyb častíc tekutiny. Vzniká pri obtekaní tuhých stien viskóznou tekutinou a v prúdeniach, kde sa vytvoria náhle rozdiely (gradienty) rýchlosti. Najčastejšie je to v úplave za telesom, v prúde vytekajúcom do prostredia tekutiny, pri miešaní prúdov s rôznou rýchlosťou a podobne.

Turbulencia je typická nasledovnými vlastnosťami:

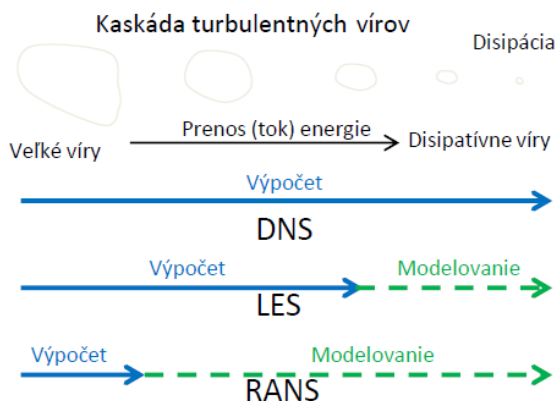
- je nepravidelná
- je difúzna (rýchle miešanie)
- vyskytuje sa pri vysokých Reynoldsových číslach
- je trojrozmerná
- je disipatívna
- je spojitá
- je vlastnosťou kinematiky prúdenia (na rozdiel od viskozity).

Turbulentné prúdenie sa skladá z rôznych vírov. Veľké víry obsahujúce energiu sa rozpadajú na menšie. Tento kaskádny proces je ukončený disipáciou energie najmenších vírov na teplo.



Turbulentné víry sú charakterizované dĺžkovým merítkom l [m] (tj. geometrií oblasti resp. charakteristickým rozmerom) a rýchlostným merítkom u [m.s⁻¹]. V nasledujúcich kapitolách budú tieto merítka označované ako makromerítka.

Neexistuje žiadny model turbulencie, ktorý by bol všeobecne použiteľný, pre všetky prípady. Pre použitie najvhodnejšieho modelu pre konkrétny prípad je nutné pochopiť možnosti a obmedzenia jednotlivých modelov. Rovnica kontinuity a Navier-Stokesova rovnica môžu byť pomocou CFD riešené priamou numerickou simuláciou (Direct Numerical Simulation – DNS). Tá ma ale obrovské výpočtové nároky, obzvlášť pre zložitejšie prúdenie. Ďalej poznáme zjednodušené matematické modely ako metódu veľkých vírov (Large Eddy Simulation – LES príp. Detached Eddy Simulation – DES), ktorá filtruje malé fluktuácie a rieši iba časť turbulentného spektra. Najjednoduchšie sú modely založené na metóde časového stredovania (Reynolds Averaged Navier-Stokes equations – RANS) veličín turbulentného prúdenia a na nasledujúcej procedúre časového stredovania bilančných rovníc.



Priama numerická simulácia (Direct Numerical Simulation – DNS)

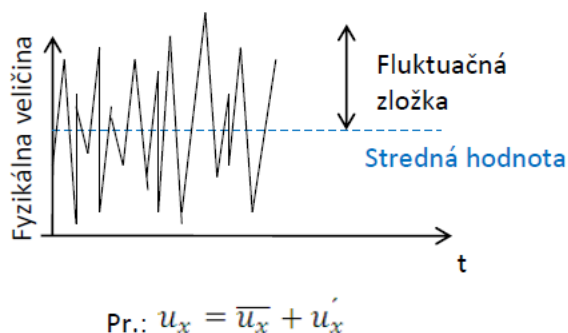
S touto metódou je teoreticky možné priamo riešiť celé spektrum veľkostí turbulentných vírov. Nemodeluje turbulenciu, preto rieši Navier-Stokesove rovnice s vysokou presnosťou. Vyžaduje veľmi jemnú sieť. Veľkosť buniek odpovedá veľkosti najmenších vírov (tzv. Kolmogorovove mikromerítka turbulencie). Počet buniek prudko narastá s Reynoldsovým číslom N_{DNS} . Veľmi vysoké množstvo elementov siete a časovo závislá simulácia s veľmi malým časovým krokom vedie k technickej nerealizovateľnosti inžinierskych výpočtov. DNS sa používa len v špeciálnych prípadoch pre výskumné účely. Väčšinou sa jedná o úlohy s malou, jednoduchou geometriou a veľmi nízkym Reynoldsovým číslom. DNS však poskytuje dokonalý obraz fyziky prúdiacej tekutiny. Výsledky z DNS sú považované za ekvivalentné výsledkom experimentov, komplexnosťou informácií však hodnotnejšie.

Metóda veľkých vírov (Large Eddy Simulation – LES)

Hybnosť hmota, energie a ďalšie veličiny sú prenášané prevažne veľkými vírmi. Táto metóda je preto založená na riešení veľkých vírov, priestorovo aj časovo závislých útvarov, ktoré je možné zachytiť sieťou. Pri simulácii sa rieši filtrovaná 3D nestacionárna Navier-Stokesove rovnica. Turbulentné víry malých rozmerov sú modelované tzv. subgrídnyimi modelmi a odstránené pomocou filtrácie turbulentného poľa. Z dôvodu riešenia len veľkých vírov je možné pre LES použiť hrubšiu sieť a väčší časový krok ako pri DNS. Veľkou nevýhodou LES je nutnosť veľmi jemnej siete pri stenách vo všetkých troch smeroch. Tento nedostatok sa snažia odstrániť rôzne modifikácie a hybridné modely RANS/LES.

Metódy časového stredovania (Reynolds Averaged Navier-Stokes – RANS)

Tieto metódy sú najpoužívanejšie pre riešenie inžinierskych úloh. Metódy RANS modelujú všetky veľkosti turbulentných vírov a riešia časovo spriemerované hodnoty prúdenia, čo výrazne znižuje výpočtové nároky a zároveň poskytujú akceptovanú úroveň presnosti. Simulácia je realizovaná pomocou Navier-Stokes rovnicami, stredovaných podľa Reynoldsa, v ktorých je potrebné nahradiť korelácie fluktuácií rýchlosti modelom turbulencie. Existujú rôzne RANS modely, ktoré zjednodušujú problém pridaním rôznych ďalších transportných rovníc.



Modely typu $k - \varepsilon$, $k - \omega$ a ďalšie zavádzajú aj tzv. turbulentnú viskozitu cez Boussinesquovu hypotézu. Model RSM turbulentnú viskozitu nepoužíva, ale používa priamo transportné rovnice pre šesť zložiek Reynoldsových napätí. Výsledkom simulácie je stredné prúdové pole, ktoré je stacionárne. Model turbulencie musí aproximovať aj najväčšie turbulentné nestacionárne vírové štruktúry ako funkcie stacionárneho poľa. Pre časovo závislé úlohy sa používajú metódy URANS (Unsteady-RANS), ktoré predpokladajú časové merítko mnohonásobne menšie ako je časové merítko stredného prúdu. Tieto modely sú schopné zachytiť nestability, ako je uvoľňovanie vírov, ale nie sú schopné zachytiť turbulentné nestability. Výpočet riešia teda sekvenciou stacionárnych javov.

Výsledky získané metódami RANS by stále mali byť doplnené overovacím experimentom, alebo porovnaním s už publikovanými výsledkami, čiže by mali byť verifikované.

V tejto časti popíšeme modely turbulencie založené na Renoldsovom stredovaní, ktoré ponúka program ANSYS Fluent.

Spalart-Allmaras

Spalart-Allmaras je jednoduchý jedno rovníkový model, ktorý využíva Boussinesquovu hypotézu a rieši transportnú rovnicu pre turbulentnú viskozitu. Bol špeciálne navrhnutý pre letecké aplikácie, kde sa rieši obtekanie stien. Tento model dáva dobré výsledky pre medznú vrstvu vystavenú veľkému tlakovému gradientu. Nie je ho možné použiť ako všeobecný model, pretože nie je validovaný pre bežné priemyslové aplikácie a produkuje veľké chyby pre voľné šmykové prúdenie.

Model $k - \varepsilon$

Tento model je jeden z najznámejších a v inžinierskej praxi veľmi často používaných modelov. Jeho popularita v priemyselných aplikáciách je daná robustnosťou, ekonomickosťou výpočtu a dostatočnou presnosťou pre široký rozsah typov turbulentného prúdenia. Je to semi-empirický model. Hlavným predpokladom je, že prúdenie je plne turbulentné a efekt molekulárnej viskozity je zanedbateľný. $k - \varepsilon$ model je použiteľný len pri vysokých Reynoldsových číslach. Model je nevhodný pre nadmernú difúziu pre mnoho situácií: veľké zakrivenie prúdu, víry, rotáciu, odtrhnutie prúdu a nízke Reynoldsove čísla. Z toho dôvodu sa z modelu vyvinuli ďalšie modifikácie, ktoré využívajú jeho výhody a snažia sa minimalizovať nedostatky.

RNG $k - \varepsilon$ model

Model RNG bol odvodený pomocou štatistickej metódy tzv. renormalizačných grúp (renormalization group method - RNG). Je podobný štandardnému modelu, ale zahrňuje účinok vírov na turbulenciu a zvyšuje presnosť pre vírové prúdenie. Model RNG je tak presnejší a spoľahlivejší pre širší rozsah typu prúdení, ako štandardný model.

Realizable $k - \varepsilon$ model

Je najnovším z uvedených modelov. Obsahuje inú formuláciu turbulentnej viskozity a modifikovanú transportnú rovnicu pre disipáciu energie ε . Prináša lepšie výsledky pre prúdenie s veľkým zakriveným prúdom, vírmi, alebo rotáciou. Z uvedených modelov dosahuje najlepšie výsledky, preto je jeho používanie odporúčané. Nedostatkom je že vytvára nefyzikálnu turbulentnú viskozitu v situáciách, keď sa výpočtová oblasť skladá z rotačnej a stacionárnej zóny (Multiple reference frames, alebo Sliding mesh), napr. veterné zariadenia, miešačky atď.

Model $k - \omega$

Je to dvojrovníkový model a podobne ako modely $k - \varepsilon$ rieši dva dodatočné diferenciálne rovnice. Model $k - \omega$ lepšie predikuje záporný tlakový spád, medznú vrstvu a odtrhnutie prúdenia. Je nevhodný pre voľné prúdenie. Model je presný v blízkosti steny a so vzdialenosťou jeho presnosť klesá.

Model $k - \omega$ SST (Shear Stress Transport)

Model bol vytvorený tak, aby spojil robustnosť a presnosť modelu $k - \omega$ v oblastiach blízko steny s modelom $k - \varepsilon$, ktorý je lepší ďalej od stien. Model SST je presnejší a spoľahlivejší pre viacero typov prúdenia oproti štandardnému $k - \omega$. Vhodný pre externú aerodynamiku.

Model $k - k_l - \omega$ Transition

Je to trojrovnícový model. Používa sa pre výpočet vývoja medznej vrstvy a jej prechodu z laminárneho do turbulentného prúdenia.

Transition SST Model

Je založený na spojení modelu $k - \omega$ SST s ďalšími rovnicami. Používa sa pre prechodové prúdenie.

Reynold Stress Model (RSM)

Je to najkomplikovanejší model vo Flunte. Rieši šesť nezávislých Reynoldsových napätí pomocou šiestich diferenciálnych rovníc. Celkovo sa rieši dvanásť rovníc (rovnica kontinuity, tri stredované Navier-Stokesove rovnice, rovnica energie, šesť rovníc Reynoldsových napätí a rovnica disipácie). Model má veľké výpočtové nároky. Použitie tohto modelu by sa malo obmedziť len na prúdenie, kde prevažuje rotácia alebo víri. Je v ňom možné zvoliť z troch variant modelovania tlakového napätia. Linear Pressure Strain Model je defaultne nastavený. Quadratic Pressure Strain Model je presnejší pre viac typov prúdenia v inžinierskych aplikáciách. Stress Omega Model je ideálny pre simuláciu prúdenia pozdĺž zakrivených stien a vírivé prúdenie.

SRS modely turbulencie

Uvedieme modely turbulencie, ktoré patria do skupiny Scale Resolving Simulation. SRS zahŕňa modely ktoré sú schopné riešiť nestacionárny pohyb v rôznom rozsahu turbulentných merítok. Vzhľadom k tomu, že výsledky simulácií sú v každom časovom okamihu iné, je nutné ich analyzovať pomocou animácií alebo časových priemerov za daný úsek.

Large Eddy Simulation (LES)

LES je najznámejšou metódou zo skupiny SRS. Model je založený na odlišnom zjednodušení Navier-Stokesových rovníc, ako sú modely RANS.

Smagorinsky Lilly Model

Je to jednoduchý model. Má problémy s prechodovým prúdením. Používa Smagorinského konštantu najčastejšie s hodnotou 0,1, pre rôzne druhy prúdenia.

Dynamic Smagorinsky Lilly Model

Smagorinského konštantu je dynamicky počítaná na základe informácií získaných z rôznych merítok prúdenia. Používa aj ďalší filter na pohybové rovnice.

Wall Adapting Local Eddy Viscosity (WALE) Model

Je prispôbený pre prúdenie pri stene. Dobre popisuje turbulentnú viskozitu pri stene. Dáva nulové hodnoty turbulentnej viskozity pri laminárnom prúdení, čo umožňuje správne riešenie laminárnych zón. Použitie tohto modelu je vhodnejšie ako Smagorinsky Lilly Modelu.

Dynamic Kinetic Energy Subgrid-Scale Model

Tento model pridáva jednu transportnú rovnicu pre subgrídnú kinetickú energiu turbulencie. Podobne ako v prípade Dynamic Smagorinsky Lilly modelu, sú dve konštanty stanovované dynamicky.

Algebraic Wall-Modeled LES Model (WMLES)

WMLES model znižuje nároky LES modelu na rozlíšenie siete pre stredné a vysoké Reynoldsove čísla a prúdenie, ktoré je ohraničené stenou. Ide o hybridný RANS/LES model. Je založený na modelovaní vnútornej časti logaritmickej vrstvy pomocou RANS a riešení vonkajšej vrstvy pomocou LES. Jeho výhodou je, že je možné použiť pre simuláciu rovnakú sieť pre rôzne Reynoldsove čísla.

Detached Eddy Simulation (DES)

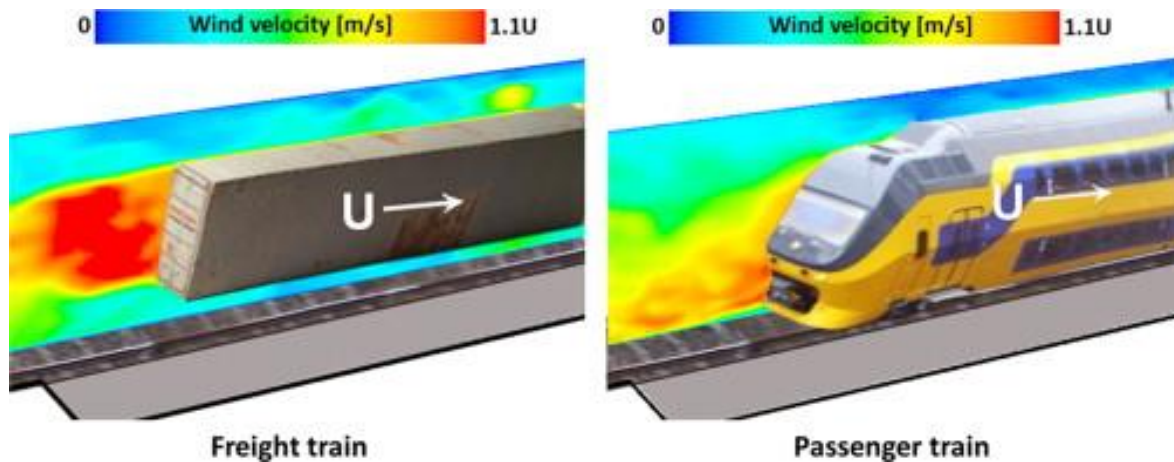
Táto metóda je založená na hybridnom prístupe modelovania turbulencie, ktorá kombinuje výhody RANS a LES a zároveň minimalizuje ich nedostatky. DES používa LES v oblastiach turbulentného prúdenia a v blízkosti stien používa príslušný model RANS. Použitie DES je stále výpočtovo náročné a pre väčšinu praktických výpočtov nebýva odporúčaný. Model je vhodný pre prúdenie okolo prekážok, napríklad obtekanie krídla s odtrhávajúcimi vírmi. Fluent ponúka metódy DES založených na modeloch, Spalart-Almaras, Realizable $k - \varepsilon$, $k - \omega$ SST. Vo všetkých prípadoch sa odporúča nastavenie Delayed DES.

Scale-Adaptive Simulation (SAS) Model

Je to najmenej náročný SRS model. Ide o vylepšený model URANS.

Modelovanie v prostredí bezpečnostného inžinierstva

Základné princípy modelov



Modely pre oblasť havarijného plánovania

- ALOHA – zdarma modelovací nástroj zameraný predovšetkým na modelovanie únikov nebezpečných látok – plynov aj kvapalín.
- TerEX – dostupný samostatne alebo v rámci balíka Emergency Office. Umožňuje pracovať aj so scénarmi teroristických útokov.
- Rozex Alarm – prognóza následkov havárií s únikom nebezpečných látok.
- Effects – modulárny systém – umožňuje modelovať jeden aspekt skúmanej udalosti (únik látky zo zásobníka). Je schopný moduly skladať za sebou a skúmať scenár havárie v plnom rozsahu.

Modely pre oblasť požiarnej ochrany

- Fyzikálne modely – zmyslom je napodobenie požiaru pri zjednodušených podmienkach. Veľkorozmerné sú príliš nákladné a niekedy nerealizovateľné. Cieľom je stanovenie fyzikálneho a chemického správania systému pri požiari.
- Matematické – pomocou rovníc popisujú fyzikálne a chemické správania systému pri požiari. Cieľom je predpoveď fyzikálneho a chemického správania systému pri požiari.

Matematické modely požiaru

- Zjednodušené výpočtové modely – spravidla tabuľkové procesory, resp. triviálne programy pre analytické vyjadrenie základných procesov požiarov. Slúžia na úlohy prenosu tepla a určenia parametrov horenia.
- Deterministické – fyzikálne podmienky sú nazývané požiarnymi scénarmi. Zahrňujú množstvo a usporiadanie horľavých látok, dispozíciu a charakter objektu, miesto vzniku požiaru, rozmiestnenie a spôsobilosť evakuovaných osôb a ďalšie vplyvy na hodnoty popisujúce požiar.

- Pravdepodobnostné – rozvoj požiaru je popísaný radou náhodných udalostí alebo stavov. Vychádza sa z náhodného pokusu pri ktorom sa sleduje priebeh požiaru v čase. Rozlišujeme tzv. sieťové tj. uzly popisujúce požiarne stavy vytvárajú sieť, štatistické, vypočítavajú pravdepodobnosť a simulačné, ktoré sú hybridné a vznikli prepojením s deterministickými.

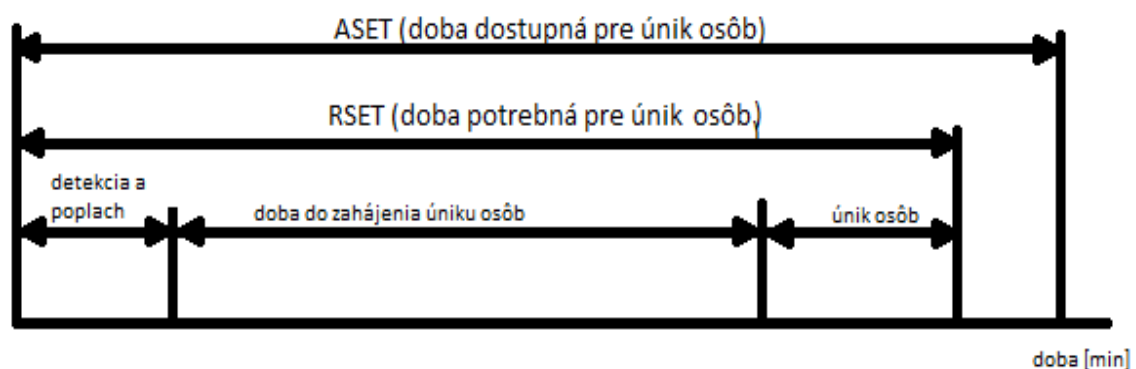
Modely evakuácie

- evakuácia budovy – podrobnosť modelovania je možné realizovať až na úroveň jednotlivcov,
- evakuácia územia – prílišná podrobnosť modelovania nie je potrebná ani výhodná, keďže sa očakáva nutnosť evakuácie tisícich, prípadne desaťtisícich ohrozených, do neohrozených oblastí (tie je nutné modelovať taktiež).

Objektová evakuácia

Všeobecne sa evakuácia považuje za bezpečnú (viď. Obrázok 1), ak doba potrebná pre evakuáciu osôb (RSET-required safe egress time) je kratšia (prípadne rovná) dostupnej dobe pre evakuáciu (ASET – available safe egress time). Táto RSET doba závisí od interakcie rôznych vstupných parametrov :

- doba detekcie a poplachu – delí sa na dobu detekcie požiaru, ktorá závisí od návrhu zariadenia pre včasné zistenie požiaru, a dobu poplachu, počas ktorej sa šíri informácia o vzniknutom požiari užívatelom objektu priamo, alebo pomocou varovných signálov,
- doba do zahájenia úniku osôb – pozostáva z doby zistenia, z doby potrebnej pre rozhodovanie a doby nutnej pre činnosť pred odchodom,
- doba úniku osôb – prebehne od zahájenia úniku osôb v objekte po dosiahnutie bezpečného miesta.



Modelovanie objektovej evakuácie

Väčšina evakuačných modelov je zostavená na základe empirických rovníc odvodených z experimentov alebo pozorovania pohybu osôb. Súčasné výpočtové modely simulujú jednotlivé scenáre evakuácie podľa typu objektu s dôrazom na chovanie unikajúcich osôb a zároveň započítavajú vplyv splodín horenia. Základné rozdelenie inžinierskych metód pre objektovú evakuáciu osôb je nasledujúci :

- zjednodušené výpočtové metódy (posudzovanie pohybu osôb prostredníctvom ich hustoty, rýchlosti a prúdu toku osôb alebo kapacity cesty),
- počítačové simulácie,
- experimentálne metódy.

Počítačové simulácie

Staršie modely chápu osoby len ako homogénnu skupinu (dav) pohybujúci sa k východu, zatiaľ čo výkonnejšie hardwary umožňujú simulovať pohyb individuálnych osôb a hodnotiť proces evakuácie presnejšie. S rastúcim počtom modelov pre evakuáciu osôb a princípov, s ktorými sa pracuje, bolo nutné vytvoriť kategórie, podľa ktorých sú triedené :

Metóda modelovania :

- Behaviorálne modely – zohľadňujú rozhodovanie a fyzickú zdatnosť osôb pohybujúcich sa k východu, niektoré dokonca umožňujú predávanie informácií medzi osobami alebo určitú formu skupinového chovania, programy : buildingExodus, PathFinder, STEPS, VISSIM.
- Modely pohybu – v takýchto modeloch sa osoby pohybujú z jedného miesta na druhé, umožňuje užívateľovi identifikovať miesta, kde bude dochádzať k vzniku radov a kumulácii osôb, a lepšie tak navrhovať šírky únikových ciest a východov, program : WayOut.
- Čiastočne behaviorálne modely – primárne sa zaoberajú pohybom, ale čiastočne simulujú aj určité prvky chovania. Bežne zohľadňuje rôzne doby reakcie osôb na vyhlásenie poplachu, špecifické vlastnosti jednotlivcov, chovanie pri predbiehaní alebo radenie do rady. Programy : FDS +EVAC, Simulex.

Členenie priestoru :

- hrubý sieťový model – rozdeľuje budovu na väčšie celky (miestnosti, chodby, schodiská), medzi ktorými sa osoby pohybujú,
- jemný sieťový model – člení priestor na uzly, po ktorých sa jednotlivé osoby pohybujú, pričom vzájomným prepojením uzlov vzniká dvojrozmerná sieť reprezentujúca dispozície objektu,
- kontinuálny model – objekt tvorí dvojrozmerný priestor, kde sa osoby pohybujú kontinuálne, pričom ich rozmery sú tu zjednodušené.

Jemné sieťové a kontinuálne modely umožňujú simulovať prítomnosť prekážok a bariér, ktoré môžu ovplyvniť pohyb a výber cesty jednotlivých osôb v miestnostiach.

Perspektíva Model/ Užívateľ :

- ako vníma model užívateľa objektu – individuálna perspektíva môže poskytnúť podrobné informácie o každom jednotlivcovi, zatiaľ čo globálna perspektíva vidí svojich užívateľov ako homogénnu skupinu osôb
- ako užívateľ objektu pozná objekt – v individuálnom pohľade užívateľ nemusí poznať všetky východy vedúce z objektu a rozhoduje sa o využití únikových ciest na základe zadaných kritérií. Globálny prístup automaticky predpokladá, že užívatelia sú oboznámení s budovou a poznajú všetky únikové východy.

Správanie osôb :

- absencia chovania osôb – je simulovaný len pohyb osôb behom evakuácie,
- implicitné chovanie – simulácia chovania osôb je vytvorená implicitne priradením vlastností, ktoré následne ovplyvní priebeh evakuácie,
- podmienené chovanie – jednotlivcom alebo skupinám osôb sú priradené schopnosti, vďaka ktorým reagujú na meniacu sa situáciu v priebehu evakuácie,
- umelá inteligencia – snaží sa simulovať ľudskú inteligenciu v priebehu evakuácie,
- pravdepodobnostný prístup – chovanie osôb má počas simulácie charakter náhodných javov.

Pohyb osôb

Programom alebo užívateľom je osobe pridelená základná rýchlosť, ktorá sa znižuje s rastúcou hustotou osôb, čo riešia modely najčastejšie nasledujúcimi spôsobmi :

- korelácia na základe hustoty osôb,
- korelácia na základe vzdialenosti medzi osobami,
- potenciálom – táto metóda sa používa u sieťových modelov, každý uzol má svoje číslo, tj. potenciál. Osoby sa snažia vždy presunúť na uzol s nižším potenciálom, než na akom sa práve nachádzajú, pričom ak je daný uzol už obsadený, musí počkať, kým sa neuvoľní. V prípade konfliktu dvoch osôb preferuje model náhodne jednu z nich,
- funkčnou analógiou podľa fyzikálnych javov.

Experimentálne metódy

Zhodnotiť riešenie bezpečnosti osôb v objekte je možné aj prevedením a následným vyhodnotením cvičnej evakuácie, pričom účastníci o chystanej akcii nesmú byť vopred informovaní. Nedostatkom tejto metódy je nemožnosť vytvoriť podmienky podobné ako pri reálnom požiari (napr. dym), ktoré môžu mať vplyv na správanie užívateľov objektu a spôsobiť psychické alebo fyzické obmedzenie.

Validácia modelov evakuácie

Pri výbere vhodného evakuačného modelu je potrebné venovať pozornosť aj spôsobu, akým bola overená platnosť výpočtov. Obvyklé je overovanie na základe platných predpisov, porovnaním s časovými intervalmi nameranými pri cvičných evakuáciách a porovnaním s časovými intervalmi vypočítanými inými modelmi.

Validácia modelov evakuácie musí dodržiavať systematický a vymeraný postup, ktorý zahrňuje :

- skúšanie komponentov modelov – overenie čiastkových výpočtových postupov,
- funkčné preverenie – kontrola súladu činnosti modelu so vstupnými odhadmi,
- kvalitatívne overenie – porovnanie chovania osôb v modeli s očakávanými údajmi,
- kvantitatívne overenie – porovnanie výsledkov modelov s údajmi získanými cvičnou evakuáciou.

Zhrnutie objektivej evakuácie

Významný prínos pre navrhovanie evakuácie predstavujú počítačové simulácie, ktoré zastupujú proces napodobňovania reálneho deja behom cvičnej evakuácie. K ich výraznému rozmachu došlo predovšetkým v poslednej dekáde, kedy rapidný rozvoj počítačového hardwaru a programovacích jazykov umožnil vznik mnohých simulačných softwarov s rôznym prístupom k modelovaniu ľudského správania chovania.

Evakuácie územia

Simulácia pomocou multiagentového systému umožňuje prevedenie podrobnejších analýz berúcich do úvahy predpokladaný pohyb obyvateľstva v priebehu dňa vrátane modelovania prípadných kongescií, ktoré by mohli brániť procesu evakuácie. Pre spracovanie takého modelu je však nutné pripraviť podstatne väčšie množstvo informácií, ktoré sú vyžadované pre „naplnenie“ modelu. Ide hlavne o :

- 3D model terénu,
- diaľničnú sieť,
- zvolený hydraulický model záujmového scenára povodne,
- demografické údaje o zvolenej obci (vekové zloženie, rozdelenie muži ženy, rodiny s deťmi a pod.)
- profil chovania jednotlivých reprezentantov skupín obyvateľstva obce,
- profil modelovania diaľničnej siete (napr. vyťaženosť siete nákladnou dopravou).

Tento typ modelu je predovšetkým určený ako doplnok jednoduchších screeningových metód pre menšie územné celky, ktoré sú z hľadiska modelovania zaujímavejšie.