

STRUKTURÁLT HÁLÓK NUMERIKUS SZIMULÁCIÓKHOZ

STRUCTURED MESHES FOR NUMERICAL SIMULATION

dr. Janiga Gábor¹, Arányi Patrícia², dr. Kalmár László³

ABSTRACT

This paper gives an overview of the differences between the unstructured and block-structured computational meshes for computational fluid dynamics. Several simple examples are shown for different geometries and the corresponding block topology is also introduced. In the final application a complex block-structured grid is proposed for the three-dimensional model of the impeller of a radial-flow blower.

1. BEVEZETÉS

Az áramlás- és hőtechnikai feladatok numerikus szimulációja az elmúlt évtizedekben robbanásszerű fejlődésen ment keresztül. Ezt nemcsak a számítógépek gyors fejlődése támogatta, hanem ehhez nagyban hozzájárult a numerikus algoritmusok fejlődése is. A numerikus szimuláció még a közelmúltban is csak korlátozott mértékben hozzáférhető szuperszámítógépeken volt elképzelhető. Napjaink személyi számítógépein viszont valós háromdimenziós áramlás- és hőtechnikai feladatok is elvégezhetők, mind kutatási, mind ipari témákat illetően.

Az áramlási feladatok megoldására három nagy általános, és széles körben alkalmazható numerikus eljárást különböztetünk meg: a véges differenciák, a véges térfogatok, valamint a véges elemek módszerét. Bármelyik eljárást is alkalmazzuk, a számítások elvégzéséhez szükségünk van egy számítási háló létrehozására. A hálót csoportosíthatjuk az alkotó elemek elrendezése, más néven topológiája szerint.

Így megkülönböztetünk:

- strukturálatlan hálókat, amelyeknél a felépítés nem mutat semmilyen felismerhető struktúrát, a hálóelemek elrendezése nem szabályszerű;
- strukturált hálókat, melyeknél a hálóelemek valamilyen jól definiálható szabály szerint követik egymást.

A strukturálatlan hálók elsősorban a véges térfogatok, valamint a véges elemek módszereinek a sajátja. A

¹egyetemi docens, ²MsC hallgató, University of Magdeburg „Otto-von-Guericke”, Institute of Fluid Dynamics and Thermodynamics, Németország

³egyetemi docens, Miskolci Egyetem, Áramlás- és Hőtechnikai Gépek Tanszéke
email: janiga@ovgu.de

strukturálatlan hálók a véges differenciák módszerére nem jellemző. Strukturált hálókat kétdimenziós esetekre mindig négyszögelemek, míg háromdimenziós esetekben kizárólag hexaéder elemek segítségével hozhatunk létre. Ezek az elemek azonban alkalmasak lehetnek strukturálatlan hálók elkészítésére is, így ezeknek az elemeknek a kiválasztása önmagában nem garantálja, hogy egy adott háló strukturált.

A jelen munkában bemutatott valamennyi hálót az ANSYS ICEM CFD [1] kereskedelmi háló-készítő programjával állítottuk elő. Ez a programcsomag támogatja mind a strukturált – HEXA modul –, valamint a nem strukturált – Tetra modul – hálók elkészítését. A program nagyszámú szimulációs program felé támogat exportálási lehetőségeket, mindemellett számos a hálók minőségét leíró paraméter vizsgálatára is módot ad.

2. A HÁLÓK ÁTTEKINTÉSE

Strukturálatlan hálók létrehozásra számos gyors és jól automatizálható algoritmus létezik, mint pl. az Octree, vagy az Advanced Front Ending eljárások. Ezek az eljárások nemcsak robusztusak, hanem alkalmasak bonyolult ipari geometriák hálózására is. Ezzel szemben a strukturált hálók számos más előnnyel bírnak. Az elemek méreteinek átlagos méreteit megtartva háromdimenziós feladatok esetén a strukturált hálókhoz szükséges elemszám csaknem egyötödére csökkenthető a strukturálatlan esetekhez képest. Ez nagyban csökkenti a szimulációkhoz szükséges memória igényét, illetve a számítást nagyban gyorsítja. A strukturált hálók egyik további előnye, hogy a háló vonalai gyakran jól közelítik az áramlás áramvonalait, azokkal párhuzamosak, ezáltal nagyban csökkentve a diszkretizációs hibákat. A strukturálatlan hálókval összehasonlítva a numerikus disszipáció mértéke is nagyban lecsökken, javítva az eredmények pontosságát. A strukturálatlan hálókhoz képest a konvergált megoldások eléréséhez szükséges iterációs lépések száma jelentősen mérséklődik, ezáltal lényegesen felgyorsítva a strukturált hálókön végzett numerikus számításokat. A strukturált hálókön végzett számítások nemcsak lényegesen gyorsabbak, hanem megoldás pontosságának tekintetében is jelentős javulást mutatnak. Ennek egyik oka a szimulációk során fellépő ún. diszkretizációs hibák mérséklődésével magyarázható. A numerikus szimulációk konvergenciájára további hatással bírnak a számítási hálók minőségét leíró paraméterek, ilyen pl. az elemek ferdesége, vagy a szomszédos elemek egymáshoz viszonyított aránya. Ezek a paramé-

terek általánosságban lényegesen jobb értékeket mutatnak a strukturálatlan hálókhoz képest.

Berg és szerzőtársai [2] egy agyi aneurizmán végeztek számos különböző számítási hálókön vizsgálatokat. Megállapították, hogy a blokk-strukturált háló nemcsak lényegesen kevesebb elemet igényel, míg egy hasonló eredmény elérésére a strukturálatlan hálók elemszáma lényegesen magasabb. A vizsgálataik során megállapították, hogy a strukturált háló végzett szimulációk lényegesen kevesebb iterációs lépést igényelnek az azonos konvergenciaszint eléréséhez.

A strukturált, vagy blokk-strukturált hálók elemeinek kezelése lényegesen egyszerűbb, mint a nem strukturált hálók esetében. Az elemek tömbökbe rendezhetőek, melyeket a megoldó szoftverek előnyösen tudnak az elemeket rendre sorra vevő ciklusok szervezéseire használni. Egy másik előnye az ilyen hálóknak, hogy könnyedén lehetővé válik a távolabbi szomszédos elemek számontartása és elérése. Ezekre akkor van szükség, ha az áramlási problémát leíró alapegyenletek numerikus diszkretizációjában magasabb rendű diszkretizációs sémák használatára törekszünk. Ezzel ugyan nő a számításra fordítandó idő és erőforrásigény, ugyanakkor a megoldás pontosabbá válik. A strukturálatlan hálók esetén a közvetlen szomszédos elemek bár könnyen megcímezhetőek, de a második, vagy a harmadik szomszéd elérése általában már nem egyértelmű.

Napjaink kereskedelmi szimulációs programjai szinte kizárólag nem strukturált hálók kezelésére vannak felkészítve, hogy ezzel általánosan alkalmazhatóak legyenek tetszőleges hálókra. Természetesen a strukturált hálók nem strukturált, általános elemkezelésre alkalmas strukturával is lementhetőek a hálózást végző programcsomagból, így lehetővé téve annak az általános kereskedelmi kódokban való felhasználását. A speciális igényekre íródott kutatók által fejlesztett, nem kereskedelmi forgalomba szánt szoftverek azonban még gyakran előszeretettel használják a strukturált hálók elemkezelésének és index-kezelésének egyszerűségében rejlő előnyöket.

A strukturált hálók hátránya azok lényegesen időigényesebb elkészítésében rejlik. Itt nem szabad arról elfelejtenünk, hogy különösen az adott hálón végzett ismételt szimulációkkal a hálózásra befektetett hosszabb idő sokszorosan megtérülhet a numerikus számítások jelentős felgyorsulásával.

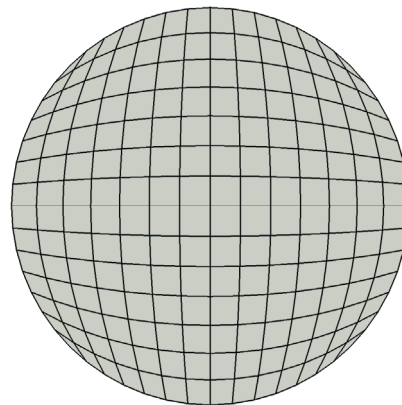
3. SPECIÁLISAN STRUKTURÁLT BLOKKOK

Egy hibásan létrehozott számítási hálón végzett szimuláció nemcsak, hogy konvergenciaproblémákat okozhat, ami ennél sokkal rosszabb, fizikailag nem elfogadható, hibás eredményekre vezethet. Szerencsére ez már a számítások elvégzése előtt kiszűrhető a háló vizsgálatával, többek között a különféle hálók minőségét leíró paraméterek ellenőrzésével.

Tanácsos a hálók vizsgálatát még a szimuláció megkezdése előtt elvégezni, azok különféle paramétereinek ellenőrzésével. Egyes esetekben olyan triviálisnak tűnő ellenőrzések, amelyek pl. az elemek térfogatának pozitív voltát figyelik, segíthetnek a valamilyen oknál fogva

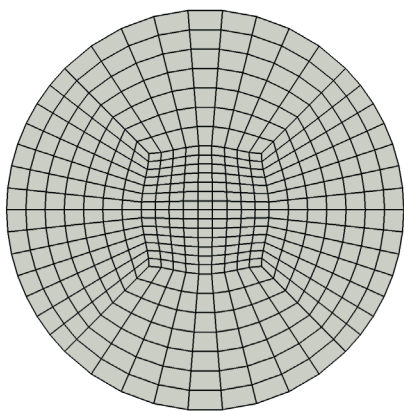
jelentősen deformált elemek, vagy az elemek felületein rosszul rögzített normálvektorok feltárásában. Akár egyetlen ún. negatív térfogatú elem képes a legkülönbözőbb hibáüzeneteket előidézni, sokszor nem a tényleges problémára utalva, ezért ennek a feltárása gyakorta nehézkes és időigényes.

A gyakorlatban azonban a számítási geometria felépítése nem teszi lehetővé egyetlen strukturált blokk használatát. Ilyen esetekben a geometriát blokkok halmazára osztjuk fel, mely blokkok már önmagukban egyszerűen hálózhatóak strukturált módon. Az így számos blokkból felépülő, önmagukban strukturáltan hálózott hálókat blokk-strukturált hálóknak nevezzük. A blokkok egymással közös érintkező felületei, vagy más néven interfészei lehetnek konformok, vagy nemkonformok. Az első esetben valamennyi a blokk interfészen található hálósomópont csatlakozik mindkét oldalon található további csomópontokhoz. A nemkonform interfészen azonban a csomópontok az interfész két oldalán függetlenül kapcsolódnak a szomszédos csomópontokhoz, ahol a változókat interpoláció segítségével kell kezelni. A nemkonform csatlakozás elengedhetetlen lehet mozgó- vagy forgórészt tartalmazó hálók esetén, bár előfordulhat, hogy az ilyen hálókat bizonyos szimulációs programok nem támogatnak.



1. ábra. Egy kör alakú geometria strukturált hálója

A kör vagy ellipszishez közel álló geometriák hálózása esetén egy blokk struktúra nem vezet kielégítő eredményre, melyet az 1. ábra illusztrál. A peremeken az erősen deformált elemek létrejötte elkerülhetetlen, mely a számítási hálóra negatív hatással van, rontva a számítás eredményességét. Ez a probléma azonban könnyen feloldható ún. O-struktúra felhasználásával, melyet a 2. ábra szemléltet. Az O-struktúra ezenkívül lényegesen jobb hálómínőséget eredményez, a mindössze egy strukturált blokk használatával szemben, az erőteljesen deformált elemek maradéktalan eliminálásával. A középső négyszög alakú struktúrát négy további blokk vesz körül. Az így létrejövő topológia lehetővé teszi a peremek közelében elhelyezkedő elemek méretének egyszerű kontrollját, ezáltal lehetővé válhat a határréteg finom felbontása, mely a turbulens áramlások szimulációjánál elengedhetetlen.

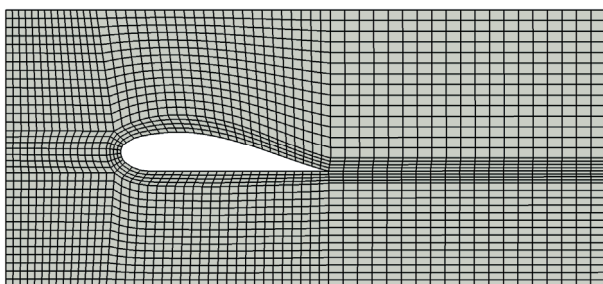


2. ábra. Egy kör alakú geometria blokk-strukturált O-hálója

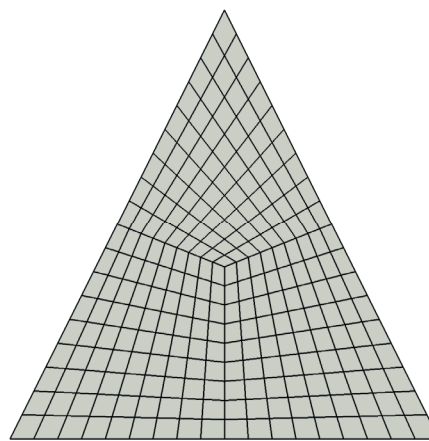
Az O-struktúra ötlete lehetővé teszi számos egyéb geometria hálózását. Így pl. ha egy ilyen struktúrát kettészelünk, akkor a középső blokkot körülölelő blokkok C-struktúrát alkotnak. A C-struktúrák eredményesen alkalmazhatóak többek között szárnyprofilok, vagy más hegyes kilépővel rendelkező testek körül kialakuló áramlások vizsgálatára, melyet a 3. ábra szemléltet. A C-struktúra további felezése – más megközelítésben az O-struktúra negyedelésével – egy újabb topológia jön létre, melyet gyakran L-struktúrának is nevezünk. Az L-struktúra lehetővé teszi például háromszög alakzatok blokk strukturált hálózását. Egy L-struktúra a 4. ábrán látható.

Az eddig említett O-, C- vagy L-hálóstruktúra természetesen korlátozás nélkül továbbvihető háromdimenziós geometriájú alakzatok hálózási problémáinak a kezelésére. Például egy gömb, vagy ellipszoid alakzatra minden további nélkül alkalmazhatjuk az O struktúrát, mely a kétdimenziós esetre jellemző öt blokk helyett itt hét blokkot eredményez.

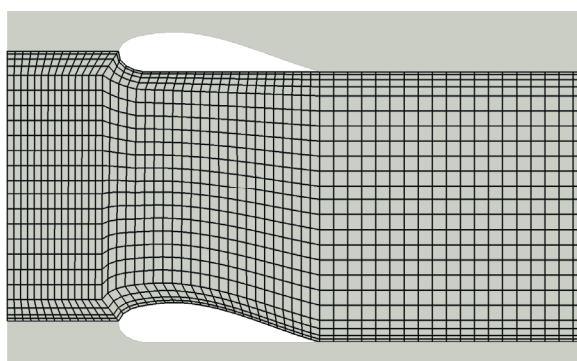
Egy periódikus szárnyrács numerikus modellezése egyszerűsíthető megfelelően felépített három blokkon végzett számítás segítségével, melyre a megfelelő oldalakon periódikus peremfeltételeket írunk elő. Egy ilyen esetet illusztrál az 5. ábra, mely struktúrát H-hálónak is nevezünk.



3. ábra. Egy szárnyprofil körüli blokk-strukturált C-háló



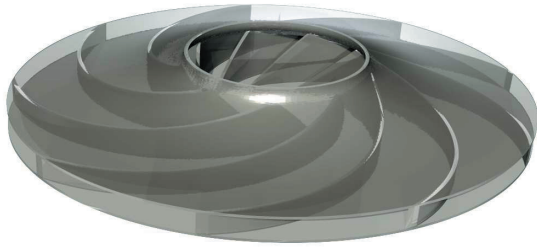
4. ábra. Egy háromszög alakú geometria blokk-strukturált L-hálója



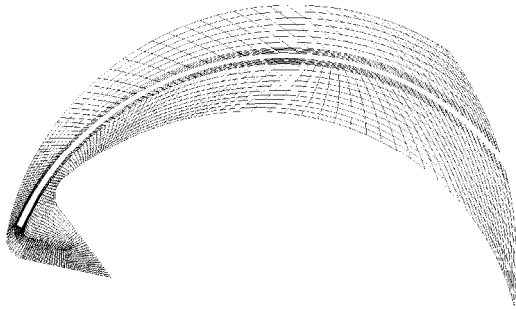
5. ábra. Két szárnyprofil közötti térrész blokk-strukturált H-hálója

4. EGY JÁRÓKERÉK BLOKK-STRUKTURÁLT HÁLÓJA

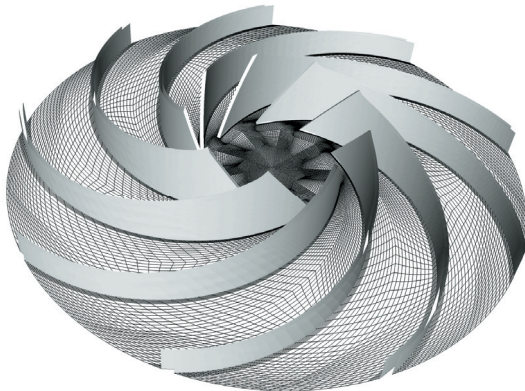
Egy áramlástechnikai gép járókerékének lapatozása gyakran jelentős görbületet mutat (6. ábra). A lapátok köré illesztett önálló C-hálózatot kellőképpen kell a lapátokra illeszteni, különben az elemek jelentősen torzulhatnak, lerontva a háló minőségi mérőszámait. Egy alkalmas kialakítás képes jól követni a görbületet, a háló elemeinek különösebb torzulása nélkül, ugyanakkor lehetővé teszi a lapátok mentén kialakuló határrétegáramlás megfelelő számításához szükséges finom felbontást. A 6. ábrán bemutatott járókerék egy lapátja körüli két-dimenziós blokk-strukturált háló látható a 7. ábrán egy C-strukturát alkalmazva. Az ábrán közepesen húzódo lapát körül jól megfigyelhető a határrétegáramlás számításához nélkülözhetetlen finom felosztás.



6. ábra. Egy járókerék testmodellje



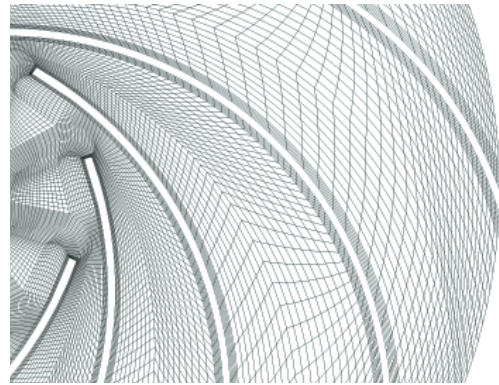
7. ábra. A 6. ábrán bemutatott járókerék egy lapátja körüli két-dimenziós blokk-strukturált un. C-háló



8. ábra. A 6. ábrán bemutatott járókerék teljes három-dimenziós blokk-strukturált hálójának részlete



9. ábra. A 8. ábrán bemutatott járókerék teljes három-dimenziós blokk-strukturált hálójának hátsó síkja



10. ábra. A 9. ábrán bemutatott blokk-strukturált hálójának felnagyított részlete

A járókerék teljes három-dimenziós kizárólag hexaéder elemeket tartalmazó blokk-strukturált hálóját a 8-10. ábrák szemléltetik. Az áttekinthetőség érdekében csupán a teljes háló bizonyos részleteit mutatjuk be.

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Az áramlás- és hőtechnikai feladatok numerikus szimulációját döntően befolyásolják az alkalmazott számítási háló. Egy jól kialakított háló nemcsak a szimuláció sebességére van pozitív hatással, hanem az eredmények minőségét is nagyban befolyásolja. Az itt bemutatott elrendezések segítséget nyújthatnak összetett ipari geometriák blokk-strukturált hálójának a tervezésében és kivitelezésében. Az így nyert háló lényegesen kisebb elemszámmal és ezáltal kevesebb memória felhasználásával el lényegesen jobb eredményeket, mint az automatikusan létrehozott sokkal több elemet tartalmazó strukturálatlan háló.

6. KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A kutatómunka a TÁMOP-4.2.1.B-10/2/KONV-2010-0001 jelű projekt részeként – az Új Magyarország Fejlesztési Terv keretében – az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósult meg.

7. IRODALOM

- [1] ANSYS Inc.: *Documentation for ANSYS ICEM CFD 14.0*, Canonsburg, PA, 2011.
- [2] BERG, P., JANIGA, G., THÉVENIN, D.: *Detailed comparison of numerical flow predictions in cerebral aneurysms using different CFD software In: Conference on Modelling Fluid Flow (the 15th International Conference on Fluid Flow Technologies)*, (Vad, J., ed.), 2012, Budapest, Hungary, ISBN 978-963-08-4586-1, pp. 128-135.