

Roine Mattsson, MSc.
Saab Military Aircraft

**A CFD SZÁMITÁSOK ÉS SZÉLCSATORNAMERÉSEK,
LEHETŐSÉGEK AZ ÚJ REPÜLŐGÉPEK AERODINAMIKAI
FEJLESZTÉSEBEN ÉS TERVEZÉSEBEN**

A fordítás a X. Magyar Repüléstudományi Napok
kiadványának II.kötetében (152-161 oldal)
megjelent cikk alapján készült

Fordította és megjegyzésekkel ellátta:
Dr. Pokorádi László mk. őrnagy, főiskolai docens

Tisztelt Olvasó!

Mattsson úr előadásának hallgatása és tanulmányának olvasása közben több, a témához kapcsolódó gondolatom ébredt. Ezért döntöttem úgy, hogy a cikket lefordítom és a főiskolánkon - általam - oktatott áramlástannal való kapcsolatokra rámutató megjegyzéseimmel együtt közreadom.

Az észrevételeimet lábjegyzetek formájában vagy beke-
reztelve helyeztem el, hogy egyértelműen látszódjon, mi az,
amit a szerző, és mi az, amit a fordító "szellemi terméké-
nek" kell tulajdonítani.

Ezúton is szeretném megköszönni Dr. Pasztelyák Adrienne
főiskolai tanár segítségét, melyet fordításom ellenőrzésé-
vel nyújtott.

Dr. Pokorádi László

Tartalmi kivonat

A minőségi szélcsatorna vizsgálat már hosszú évek óta a polgári és a katonai repülőgépek áramlástani fejlesztésének első számú eszköze. A modern CFD módszerek a számítógépek példa nélküli fejlődése következtében ma új lehetőségeket nyújtanak. A következő rövid összefoglaló a két módszer áramlástani mérnöki munkákban való együttes alkalmazását mutatja be.

1. Bevezető

A korábban a svéd repülőipar elsősorban évtizedeken keresztül a Svéd Légierő számára fejlesztett katonai repülőgépeket. Ez a nemzetközileg is versenyképes katonai repülőgépek kifejlesztése érdekében végzett tevékenység magasfokú aerodinamikai ismeretet és alkalmazási képességeket igényelt. Az utóbbi tíz évben a Saab Aircraft vállalat polgári repülés területén történt sikeres termékváltása következtében ma már a vállalat forgalmának több mint a fele ebből a szektorból származik.

A repülőgép külső geometriája által meghatározott aerodinamikai jellemzők, mind a polgári, mind a katonai repülőgépek esetében, elsősorban jelentőséggel a gép teljesítménye - gazdaságossági és repülési tulajdonságai - szempontjából. Ezért nagyon fontos az, hogy az áramlástan mérnökök egy új tervezési program legelső lépésétől kezdve folyamatosan közreműködjenek a fejlesztési munkákban.

Polgári vagy katonai repülőgép fejlesztése általában a piaci igények felméréséből vagy a megrendelőnek, például a Svéd Védelmi Felszerelési Hivatal¹nak, a megbízásából indul ki. Természetesen egy ilyen munka számára a kiindulási alapot az előző repülőgépek fejlesztéséből származó tapasztalatok, az aerodinamikai kutatások és az általános kézikönyvben leírt módszerek lesznek. Ezen kívül még két módszer kínálkozik a további fontos aerodinamikai információk nyerésére. Az egyik a kísérleti módszer, amely szélcsatornában végzett méréseken alapul. A másik az elméleti módszer, amely a fizikai jelenségeket leíró matematikai összefüggések leírásán és nagyteljesítményű számítógépek felhasználásán azaz az úgynevezett CFD-módszeren alapszik (Computational Fluid Dynamics

1

Swedish Defence Material Administration

- Folyadékok dinamikájának numerikus módszerei².

2. A szélcsatorna módszer

A repülőgépek fejlesztésének legrégebbi és leghagyományosabb módszere a gép első felszállása előtt a különböző típusú szélcsatorna-mérések végzése. Még ma is ez a legmegfelelőbb és leghatékonyabb eljárás a szükséges aerodinamikai jellemzők megismerésére. Maga a módszer azt a tényt használja ki, hogy a repülőgép és a környező levegőáram közti erők ugyanúgy lépnek fel, akár a gép, akár a levegő mozog. Ezt nevezik a relatív mozgásnak, ami jelen esetben számunkra fontos.

Különböző típusú szélcsatornák léteznek, de az közös bennük, hogy mindegyik rendelkezik egy részegységgel, amely segítségével jó minőségű levegőáramot lehet létrehozni. A levegőáram sebességét jól kell ismernünk, azaz pontosan kalibráltnak kell lennie, valamint a mérőteremben a sebesség egyenletes eloszlását kell biztosítanunk. Léteznek úgynevezett léfúvó szélcsatornák is, amelyek nagynyomású tartályokkal, feltöltő rendszerrel és a mérőteret a szabad légkörrel vagy az elvezetőrendszerrel összekötő, gyors működésű szeleppel rendelkeznek. Ez csak rövid ideig (5 - 30 mp-ig) teszi lehetővé, hogy létrehozzuk a kívánt, állandó értékű nagy sebességet. Másfajta működésű szélcsatornáknál egy légcsavár biztosítja a visszatérő álagútban az egyenletes eloszlású és folyamatos megfűvást, hosszú időn keresztül. Ez a kialakítás a kisebb sebességű szélcsatornákra jellemző.³

2.

A magyar szakirodalomban az áramlástan ezen területe a numerikus aerodinamika néven szerepel. A numerikus aerodinamika az áramlástan peremérték-feladatainak számítógéppel történő numerikus megoldásával foglalkozó tudomány [1].

3

A szélcsatornák kialakítási módjait részletesebben lásd a [3] irodalomban.

Egy adott terv aerodinamikai vizsgálatának elvégzéséhez egy, a valóságos repülőgépről készült s a kívánt mérési cél-
 nak megfelelően kialakított, arányos modell szükséges. Ez a
 modell nem lehet nagyobb a mérőtér által megengedettnél,
 mert máskülönben az azt körüláramló levegő - a mérőtér falá-
 val kialakuló interferenciája következtében - a valóságos
 szabad áramlástól eltérően fog viselkedni. A modellt egy
 speciális támasztórendszerre kell felhelyezni, amely bizto-
 sítja, hogy a modell a levegőáramhoz képest elfordítható le-
 gyen, mikor a különféle repülési helyzeteket szimuláljuk a
 szélcsatornában. A támasztórendszer helyzete, alakja és mé-
 rete szintén az adott szélcsatorna fontos jellemzői, terve-
 zésüknél a fő cél az úgynevezett interferencia hatások mini-
 malizálása.

Az levegőáram minden ilyen eltérése miatt a rögzítési
 helyeknél nem a valóságos helyzetnek megfelelő jellemzőket
 mérjük, ezért ott a mérési adatokat korrigálni kell.

3. A Reynolds-szám

Ahhoz, hogy a valóságos repülési helyzetet pontosan mo-
 dellezzük a szélcsatornában biztosítani kell hogy, az áramló
 levegőben fellépő tehetetlenségi és súrlódási erők közötti
 arány azonos legyen a valós áramlásával. Ezt az erőarányt
 fejezi ki a (Re -vel jelölt) Reynolds-szám.⁴ Általában nagyon

Ez a hasonlósági szám Osborne Reynolds angol fizikusról kap-
 ta a nevét. Számítása:

$$Re = \frac{c \cdot l}{\nu}$$

ahol:

- c - az áramló közeg sebessége;
- l - az áramlásba helyezett test jellemző hossz dimenziójú
 jellemző mérete;
- ν - az áramló közeg kinematikai viszkozitási tényezője.

A fenti egyenlet a súrlódási és a tehetetlenségi erők ará-
 nyának felírásából, a dimenzióanalízis alkalmazásával, ve-
 zethető le - lásd [3] irodalom.

nehéz a szélcsatorna vizsgálatokat a teljes Reynolds-szám tartományban elvégezni. Ez leginkább azt jelenti, hogy a mérések vagy a kicsi, vagy a nagyon kicsi Re értéknél lesznek pontosak és ezért korrekciókat kell alkalmazni a mért adatokon.

A Reynolds-szám növelése céljából vagy nagyobb modellt kell alkalmazni (ez nagyobb mérőteret is igényel), vagy növelni kell a levegőnyomást, esetleg csökkenteni a hőmérsékletet a szélcsatornában. Bármelyik módszert választjuk, mindegyik a mérések költségeinek növekedését eredményezi, mivel növeli a modellt, a szélcsatorna, az energia és a mérőberendezések költségét.

A számunkra fontos aerodinamikai jelenségek nem nagyon érzékenyek a Reynolds-szám értékekre. Ez azt jelenti, hogy a repülőgépek fejlesztésekor, nagyon gyakran gazdasági okok miatt, az inkább kicsi Reynolds-számú mérésekre kerül sor és egy-két kiválasztott esetre, mint ellenőrző pontokra használják a drágább, nagy Re -számú szélcsatornában.

4. A mérés elvégzése

Milyen módon kaphatjuk meg az aerodinamikai jellemzőket a szélcsatorna mérések során? Nagyszámú, egymástól eltérő módszer létezik, attól függően, hogy mit akarunk mérni. Például mérhetünk statikus vagy dinamikus jellemzőt, teljes vagy helyi terhelést és nyomáseloszlást. Néha az áramlás láthatóvátétele is értékes információkat nyújthat számunkra.

A vizsgálatok legelterjedtebb módja a teljes vagy helyi statikus terhelések aerodinamikai mérleggel történő mérése. Ez nagyon fontos a repülőgép felületén a különböző repülési helyzetekben ébredő aerodinamikai erők nagyságának és irányának megismeréséhez. Az aerodinamikai terhelések és lehetőségek ellenőrzése céljából végzett mérési sorozatok a re-

pülési sebesség, az állásszög, a fékszárny és kormányfelület helyzetek, valamint geometriai konfigurációk változatait tartalmazzák. Ezek a légerők a hajtóművek toldóerőivel együtt határozzák meg a repülőgép repülési és manőverező képességét.

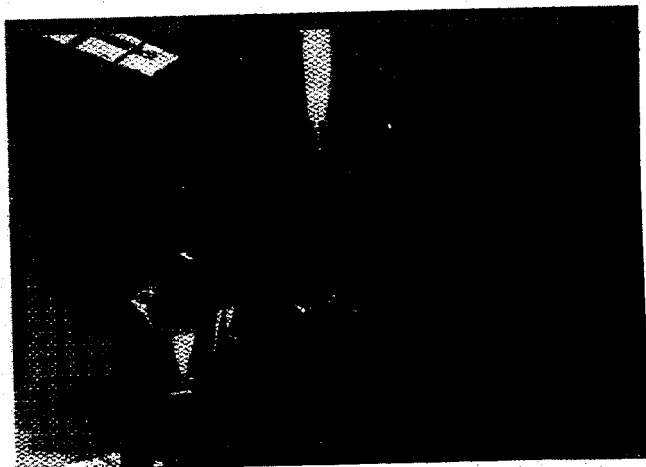
A modellt általában egy - valahol a modell belsejében elhelyezett - úgymérvetett belső mérleggel látják el és a szélcsatorna adatrögzítő rendszerével a támasztórendszeren keresztül kötik össze. A háromdimenziós mérleg csillapító részén elhelyezett érzékelők az elektromos jelek változásával reagálnak a különféle légerőterhelésekre. A mérlegre jutó terhelési jeleket a mérések megkezdése előtt pontosan be kell kalibrálni.

A repülési helyzet és a levegő állapotának leírásához a mérlegről kapott összes jel, valamint a szélcsatornában mért egyéb adatok ismerete szükséges. Ilyen például a zavartalan áramlás sebessége, a csatornában uralkodó statikus nyomás, a repülőgép állásszöge. Ezeket az adatokat a kísérletek során rögzíteni kell. A modern szélcsatornák számítógéppel vezéreltek és nagyteljesítményű számítógépes rendszerekhez csatlakoztathatók, az adatok mintavételezése, tárolása és megjelenítése érdekében. Így a mérnökök a számukra fontos aerodinamikai jellemzőket már röviddel a mérés lefutása után tanulmányozhatják.

5. Egy példa a modern szélcsatorna-vizsgálatra

A Saab 2000 repülőgép kisebbességű repülési tartományban végzett aerodinamikai fejlesztéséhez szükséges szélcsatorna-mérések többségét a svájci Luzernben lévő F+W kisebbességű szélcsatornában végeztük el. A modell 1:6 méretarányú volt, és egy merevítővel rögzítettük a mérőtér tetejéhez (1. ábra), mely keresztmetszetének mérete 7x5 m.

A modellt a teljes statikus terhelés mérése érdekében felszereltük egy 6-komponensű (3 erő és 3 nyomaték) beépített mérleggel, amelyet a testen belül a merevítőhöz rögzítettünk. A modell két forgó légcsavarának tengelyében egy-egy mérleget helyeztünk el a nyomaték és tolóerő méréséhez. Ezen kívül 9 mérleget helyeztünk el az oldalkormányokon és a fékszárnyakon, hogy ott a helyi erőket és csuklónyomatékokat mérjük. A fentiekén túl lehetőségünk volt még kb. 500 darab nyomásmérő szonda elhelyezésére a szárnyakon, a hajtómű gondolákon, a törzsen és a farokfelületen.



1. ábra

A munka során egy átlagos napon kb. 35 különböző mérést végeztünk. Minden mérésre az állásszög vagy a csúszásszög egy-egy változata volt jellemző. Ez azt jelentette, hogy a mérést végző munkacsoportnak naponta kb. 600 000 mért aerodinamikai adatot kellett feldolgoznia az értékelés során. Ezek közül 60 000 adat a mérlegektől érkezett. Nyilvánvaló, hogy a mérnököknek gyors és hatékony számítógépes adatfeldolgozó és grafikus megjelenítő rendszerre volt szükségük ahhoz, hogy - a mérési program módosítása érdekében - az informá-

ciót időben tudják tanulmányozni.

6. A numerikus aerodinamika

Az utóbbi 20 évben rendkívüli módon javultak a repülőgépek áramlástani jellemzőinek számítási lehetőségei, és ma a CFD technika mindinkább fontos szerepet játszik a repülőgépek tervezésben. A lehetőségek kiszélesedésének fő oka a számítógépek memória méretének és processzorteljesítményének példanélküli gyors fejlődésében található. A numerikus matematikai módszerek is jelentős mértékben tökéletesedtek hatékonyságuk szempontjából.

Mi az oka ennek a hatalmas memória méret és processzor teljesítmény igénynek? Matematikailag az áramlás leírása egy nemlineáris, parciális differenciálegyenlet-rendszerrel lehetséges, melyet Navier-Stokes egyenletnek neveznek. Az öt differenciál egyenletnek fizikai jelentése a tömeg, az impulzus és az energia megmaradása az áramlási térben. Ezen egyenletrendszer megoldása egy valóságos repülőgép geometriára és egy speciális repülési esetre (ami fontos lehet a mérnöki munka számára) egy nagyteljesítményű számítógépet és pár órát igényel.

Az egyenletrendszer numerikus megoldásához az áramlási teret nagyszámú, kicsi méretű cellából álló hálózatban diszkrétizálják⁵. Az öt egyenletet minden egyes cellára meg kell oldani, ezért szükségeszerű ismerni a nyomás, a sebesség, a hőmérséklet stb. értékeit az aktuális és a szomszédos cellákban. A végeredmény megfelelő pontosságához rendkívül fontos, hogy a cellaméretek a repülőgép modellhez képest kellően kicsinyek legyenek. Így általában több százezer, néha

⁵ A hálózati felosztás célja az, hogy az áramlást leíró (1) - (5) differenciálegyenletek differenciaegyenleté való átalakítás után a hálózat adta Δx ; Δy és Δz lépésekkel minden kijelölt pontra megoldjuk.

több millió cellával kell számolnunk. Ezért a számítóprogramnak több millió ismeretlen változóval kell dolgoznia.

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho u^2 + p - \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \bar{v} \right) \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho u v - \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho u w - \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho v)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho v u - \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho v^2 + p - \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \bar{v} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho v w - \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho w)}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho w u - \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\rho w v - \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho w^2 + p - \mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla \bar{v} \right) \right] = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x} \left[(e+p)u - \mu \left(2 \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{2}{3} \nabla \bar{v} \right) u - \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) v - \mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) w - k \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[(e+p)v - \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) u - \mu \left(2 \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{2}{3} \nabla \bar{v} \right) v - \mu \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) w - k \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left[(e+p)w - \mu \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) u - \mu \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) v - \mu \left(2 \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{2}{3} \nabla \bar{v} \right) w - k \frac{\partial T}{\partial z} \right] = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Navier-Stokes egyenletek

Az egyenletekben használt jelölések:

ρ	-	a közeg sűrűsége;
τ	-	idő;
u	-	x irányú sebesség;
v	-	y irányú sebesség;
w	-	z irányú sebesség;
p	-	statikus nyomás;
\vec{V}	-	áramlási sebesség vektor;
∇	-	Hamilton-féle (nabla) operátor;
μ	-	a közeg dinamikai viszkozitási tényezője;
e	-	egységnyi térfogatú közeg helyzeti energiája;
$*$	-	a közeg adiabatikus kitevője;
T	-	a közeg hőmérséklete.

Az egyenletekkel kapcsolatos megjegyzések:

Az (1) egyenlet - a nálunk használt terminológia szerint - a folytonossági törvény differenciál alakjával egyezik meg, figyelembe véve a

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = \text{div}(\rho \vec{c})$$

egyenlőséget.

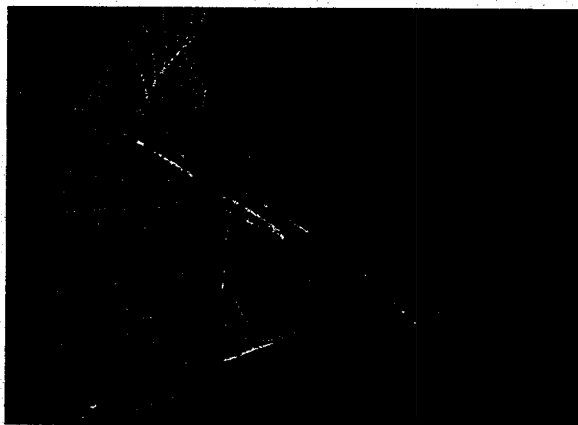
A (2) ; (3) ; (4) egyenletek az egységnyi térfogatú sűrűdésos közeg áramlására, az x ; y és z tengelyek irányában felírt impulzustételnek felelnek meg. Azok a tagok, melyekben a μ dinamikus viszkozitási tényező szerepel, a közeg sűrűdése következtében fellépő erőket fejezik ki - lásd [2] irodalom.

Az (5) egyenlet felel meg a terminológiánk szerinti Navier-Stokes egyenletnek. Fontos azonban megjegyezni, hogy itt a törvényszerűség nem vektorosan van felírva, így kapunk az alakilag eltérő kifejezést. Az eltérés másik oka az, hogy a [3] irodalomban szereplő Navier-Stokes egyenlet csak a sűrűdésos, de (!) összenyomhatatlan közeg áramlására lett felírva. (Lásd még [4] irodalmat.)

A komplex repülőgépegometria számára alkalmas hálózat létrehozása nagyon bonyolult numerikus munka. Ma már léteznek speciálisan ilyen célra kifejlesztett programok.

Mivel a matematikai kapcsolat nem lineáris, minden célra egy nagy méretű egyenletrendszerrel kapunk, melyet nem

lehet megoldani egyszerű mátrixinverzióval. Az egyetlen lehetséges megoldás az iteráció.⁶ Ezt az eljárást minden ismeretlen változó becsült értékével kell indítani. Minden alkalommal, ha számítást a teljes hálózaton elvégezzük, egymás után, egyre pontosabb megoldásokat kapunk. Ezt az iterációt addig kell futtatni, míg az eredmények nem változnak tovább.⁷ Általában a már elfogadható eredmény eléréséig több ezer iterációt kell elvégezni.



2. ábra

A Saab cégnél a repülőgépek gyakorlati aerodinamikai fejlesztése során az N/S programot csak a teljes repülőgép-

Az iteráció egy olyan matematikai eljárás, mellyel bizonyos - úgynevezett implicit - egyenletek megoldásához juthatunk. Lényege, hogy kiindulva valamely, a megoldáshoz "viszonylag közeli" értékből, ugyanazon eljárás többszöri alkalmazásával - jelen esetben az (1) - (5) egyenleteknek az áramlási térben történő megoldásával - egyre pontosabb eredményt kapunk (ehhez több feltételnek is teljesülnie kell).

Az iterációt a mérnöki gyakorlatban addig ismétljük, míg az utolsó eljárás kiinduló adata és eredménye közti különbség egy általunk választott érték alá nem csökken.

geometriát tartalmazó részproblémák megoldásához használjuk. Gyakran végzünk kétdimenziós vizsgálatokat, például egy kitérített fékszárnyal ellátott szárnymetszet esetén. Ilyen esetekben nagyon érdekes megvizsgálni a szárny felületére simuló áramlást a profil hátsó részén található fékszárnyrésnél, a rés méretének meghatározása vagy ellenőrzése érdekében.

7. Gyakorlati közelítések

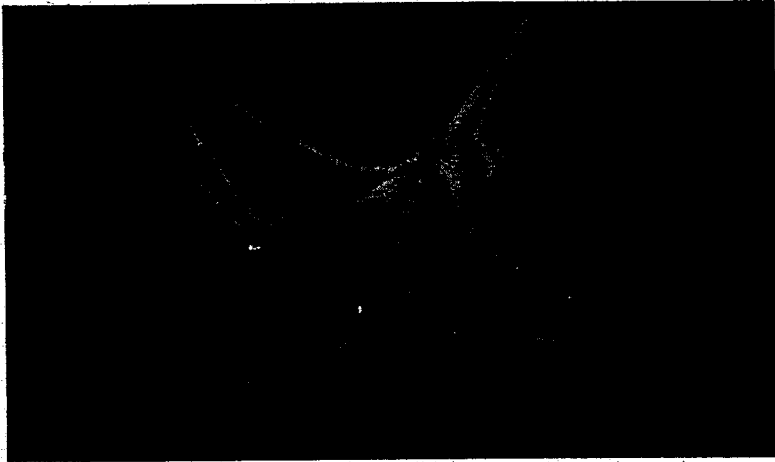
A repülőgép felületén az áramlási sebesség zérussal egyenlő, és a felülettől távolodva egy vékony rétegen keresztül növekszik, melyben a súrlódás hatása dominál. Ezt a réteget nevezzük határrétegnek. Az aerodinamikai esetek többségében ez a súrlódásos határréteg a repülőgép teljes felületén meglehetősen vékony. Ez számos, az ítesés elérése előtti általános repülési helyzetre helyes megállapítás. A repülőgép aerodinamikai jellemzői ekkor főleg a határrétegen kívüli áramlástól függenek és így azokat jó pontossággal számíthatjuk a Navier-Stokes egyenlet egy olyan egyszerűsített alakjával, ahol a súrlódásos tagokat elhanyagoljuk. Ez az Euler-egyenlet.⁸

A fenti egyszerűsítés vagy közelítés teszi lehetővé a viszonylag összetett geometriák esetén is a repülési esetek gyakorlati számításainak megfelelő pontosságú elvégzését. Az Euler-egyenlet példáját a 3. ábrán láthatjuk kb. 300000 cellával.

További közelítéseket olyan területeken lehet alkalmazni az áramlási térben, ahol a helyi sebesség nem lépi túl az $1,3 \sim 1,4$ -szeres hangsebességet és ahol az áramlást erős ör-

⁸ Az áramlástanban járatosak között az köztudott, hogy az Euler-egyenlet a Navier-Stokes egyenlet "súrlódásmentes párja". Jelen esetben az (2) - (5) egyenletek mindegyikét a $\mu=0$ egyenlőség figyelembevételével kell módosítanunk.

vények nem fékezik. Ebben az esetben az egyenleteket lehet egyszerűsíteni egy nemlineáris parciális differenciál egyenletre, amit potenciál egyenletnek hívnak. Ezen egyszerű egyenlet megoldása kisebb számítógép időt igényel, mint a bonyolultabb Euler vagy Navier-Stokes egyenletek. Ez egyszerűbb és olcsóbb számítási módot jelent.

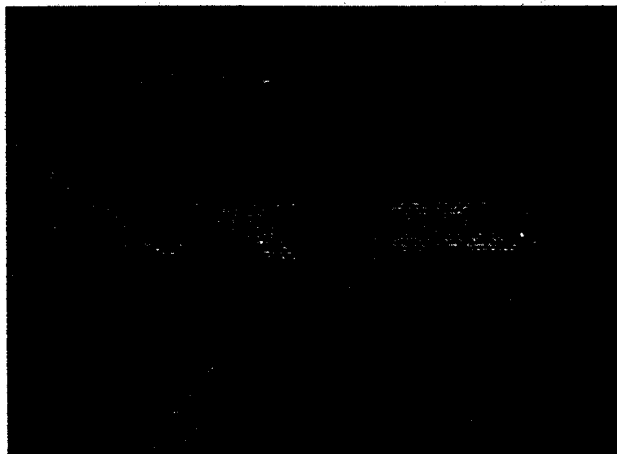


3. ábra

Nagy különbséget jelent a számítási módszerben, hogy az egyenlet lineáris, vagy nemlineáris. Több fontos repülési eset tanulmányozása magában foglalja a törzs és a szárny körüli kis sebességű jelenségeket, mint például a Saab 340 és 2000 repülőgépek esetén. Általában a nemlineáris tagok nagyon kicsinyek és így jó pontossággal alkalmazhatjuk a lineáris potenciál módszert. A 4. ábra egy magasabb szintű, háromdimenziós panelhálózatot illusztrál, amit PHOBOS-nak neveznek és a Saab cégnél fejlesztettünk ki.

Ennek a lineáris potenciál módszernek az alkalmazása esetén nem szükséges a cellák hálózatát a repülőgép körüli

teljes térben felállítani, hanem elegendő a modell szilárd felületén létrehozni, vagyis a felületeket úgynevezett panelekre felosztani.



4. ábra

A Saab 2000 gép ilyen számítását kb. 5000 panel alkalmazásával végeztük el, amely számítás a teljes geometria megfelelően pontos megjelenítését biztosítja. Minden panelhez két tulajdonságot kapcsolunk, a forrásosság és a dipólus erősségét. Ezen szingularitások⁹ összegeinek eredményként kapjuk meg a teljes potenciált, melyből az áramlási tér minden pontjában meg lehet határozni a sebességet és a nyomástényezőt. A szingularitási panelek hosszait közvetlenül kapjuk meg minden, a szilárd falat ábrázoló panelre, a zéró me-

9

A tér azon pontjait, ahol az áramlást leíró egyenlet fizikailag nem értelmezhető, szinguláris pontnak nevezzük. Ilyen például az - általunk is használt potenciális örvény középpontja. Az elméleti aerodinamika azon módszerét, ahol a test körüli áramlást ilyen szingularitások (örvényvonalak, források és nyelők) segítségével modellezzük, a szingularitások módszerének nevezzük. Részletesebben lásd még a [4] irodalomban.

rölegetes áramlási sebesség feltételéből. Ez a szingularitások erősségében nagyméretű lineáris egyenletrendszert eredményez, melyet hatásosan egy blokk-iterációs módszerrel oldhatunk meg.

8. A CFD és a szélcsatorna-mérések együttes alkalmazása

A numerikus aerodinamikában minden bizonnyal folytatódni fog az utóbbi évtizedben tapasztalt példa nélküli fejlődés. A számítógépek nagyobb teljesítményűek, gyorsabbak, olcsóbbak lesznek és nagyobb memóriával fognak rendelkezni. Ma az egyik nyilvánvalónak látszó tendencia a CFD-módszer párhuzamos alkalmazásának eltolódása egy, a munkaállomások csoportjától a nagyszámban párhuzamosan működő gépek felé. Ezzel egy időben a numerikus matematikai módszereket tovább fogják fejleszteni a jobb turbulenciamodellezés és a gyorsabb konvergencia elérése érdekében.

A mérnökök a CFD-t az utóbbi években kezdték alkalmazni a repülőgépek fejlesztésének általános aerodinamikai munkáihoz. Ennek, mint eszköznek egy lánc tagjaként más eljárásokkal kell együttműködnie a CAD rendszeren belül, a felület meghatározása, modellezése, a számítási hálózat kiválasztása és végül az effektív utószámítások elvégzése érdekében. A mérnöki munka miatt nagy jelentőségű, hogy ezeket a különféle rendszereket használható interface-ekkel látják el, melyek segítségével könnyen és gyorsan lehet mozgatni a rendszerek között az információkat.

Amikor a mérnökök munkájuk során a CFD eredményeket elemzik, a következő lépés valószínűleg a repülőgép geometriájának megváltoztatása lesz. Ez azt jelenti, hogy néhány órán belül módosítani lehet a repülőgép geometriáját és ezzel együtt a számítási cellák hálózatát a következő számítás megkezdése előtt.

A szélcsatorna mérés volt és bizonyára még néhány évig az a módszer lesz, mellyel nagymennyiségű aerodinamikai adatot lehet nyerni. A CFD-technika nyújtotta lehetőségek a geometriára vonatkozó elképzelések és megfelelő javaslatok kidolgozásához lehet majd felhasználni. A költséges szélcsatorna modellek a már majdnem kész konfigurációkra fogunk lefordítani, csupán néhány geometriai variációt beleértve.

A forrás iródalmai hivatkozásai

- 1 - Műszaki CFD- és áramlásban, BME Közlekedésmérnöki Kar egyetemi jegyzet, Tankönyvtársdó, Budapesti, 1991
- 2 - Dr. Pokorádi László, Aerodinamika I. Az ideális közeg általános aerodinamikája, főiskolai jegyzet, MH. SZRF, Szolnok, 1992.
- 3 - Dr. Pokorádi László, Aerodinamika II. A súrlódásos és az összenyomható közegek aerodinamikája, főiskolai jegyzet, MH. SZRF, Szolnok, 1993.
- 4 - Repülési Lexikon, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1991.