

Veress Árpád: Felület-morfológiai eljárás kifejlesztése szilárd peremek adaptív optimalizálására (OTKA F-67555)

Kutatási zárójelentés

Összefoglalás

A jelen kutatás célja egy olyan új felület-morfológiai elven működő numerikus áramlástani eljárás kidolgozása, amely képes az áramlást határoló szilárd falak adaptív optimalizálására. A Navier-Stokes és Euler megoldók FORTRAN és C++ környezetben való elkészítését és áramlástani validációját követően az a következtetés vonható le, hogy az összenyomható áramlás modellezése a sűrűdés elhanyagolásával is kielégítő eredményt szolgáltat a mérési eredményekkel való összehasonlításokor a vizsgált esetekben. Ezért, az optimalizációs módszer a 2D-s Euler egyenletek strukturált, cellaközpontú véges térfogat elven működő numerikus megoldásán alapul. Az optimalizációs modul első részében állíthatók elő az optimális fali nyomás-eloszlás görbék a végpontokban jelentkező inkonzisztencia (pl. negatív lapátvastagság, nyitott kilépő él) miatt szükséges finomhangolásokkal. A második részben, egy inverz tervező-eszköz segítségével jön létre az a 3-10 iterációt magába foglaló folyamat, amelynek során kialakul az előírt nyomáseloszláshoz tartozó geometria. Az eljárás helyes működésének tesztelése, vagyis a szilárd falak alkalmazástól függő optimális előállítása belső-, külső-, és lapátrácsban kialakult áramlások segítségével történt meg. A módszer a gyakorlati életben jelentősen lerövidítheti az áramlás és teljesítmény szempontjából optimális geometria előállításának irányába tett erőfeszítéseket. Az eljárás pontossága 3D-s kiterjesztéssel és a sűrűdés figyelembevételével tovább növelhető.

Bevezetés

A számítógépek gyors fejlődésének, valamint az összetett mérnöki tevékenységekkel szemben támasztott egyre magasabb szintű elvárásoknak köszönhetően napjaink kiemelt kutatási területe közé tartozik a számítógépes áramlásmodellezés, angolul a CFD (Computational Fluid Dynamics). A különféle módszerek többek között az Euler- vagy a Navier–Stokes (NS) egyenletek¹ numerikus megoldása során nyújtanak hathatós segítséget az áramlástani-mérnöki problémák megoldásában. A megfelelően érvényesített (validált) kódok jelentősége folyamatosan növekszik, mivel a mérnöki alkalmazások legszélesebb skáláján járulnak hozzá az idő, a költségek és a kapacitás csökkentéséhez a kizárólag kísérleteken alapuló verifikációkkal, ismeretszerzéssel szemben. A numerikus eljárások fejlesztésével és alkalmazásával olyan részletességgel kaphatunk információt a különféle gépészeti berendezésekben, illetve a körülöttük lezajló áramlástani folyamatokról, amely korábban elképzelhetetlen volt. Az óriási információmennyiséget felhasználva olyan új optimalizációs technológiák kidolgozására nyílik lehetőség, amelyek jelentős hatással lesznek a tervezési eljárásrendszerek fejlődésére.

Az utóbbi évtizedben, a numerikus áramlástani módszerek kutatása mellett [1,2], kiemelt szerepet kap a CFD-vel összekapcsolható nagy hatásfokú optimalizációs eljárások vizsgálata és alkalmazása [3]. A különféle globális optimalizációs technikák alapvetően két fő csoportba oszthatók. Az első a determinisztikus, a második a valószínűségi módszereken alapuló

¹ A modern irodalomban a NS-, illetve az Euler-egyenletek alatt nem csak az impulzus-megmaradás egyenletei értendők, hanem beletartoznak a tömeg- és az energia-megmaradás egyenletei is.

eljárások. A determinisztikus eljárásokat abban az esetben célszerű alkalmazni, ha egyértelmű kapcsolat létezik a lehetséges megoldások karakterisztikája és azoknak a probléma megoldására vonatkozó alkalmazhatósága között. A célfüggvény paraméterei egzaktak és a számítás egyértelműen elvégezhető a rendelkezésre álló mintavételezett értékek segítségével. Jellemző eljárásai a különféle kereső-algoritmusok és lineáris egyenletrendszer megoldók (pl. Simplex eljárás). A valószínűségi alapú optimalizációs módszereknek azokat az eljárásokat nevezzük, amelyekben valószínűségi elemek szerepelnek (pl. változók a célfüggvényben, kényszerekben, valamint magában az algoritmusban (valószínűségi paraméterek, valószínűségi alapú kiválasztás, stb.)). Ezeket a módszereket akkor célszerű alkalmazni, ha a kapcsolat a rendelkezésre álló lehetséges megoldások és azoknak a feladat megoldására való alkalmassága között nem egyértelmű vagy túl összetett (pl. több-dimenziós keresési terek). Ilyen módszerek például az evolúciós stratégián, a genetikus algoritmusokon, az egyensúlyi állapot elérésének modellezésén (simulated annealing) alapuló eljárások.

Az említett módszerek numerikus áramlástani eljárásokkal történő alkalmazása legtöbbször jelentős számítástechnikai kapacitást igényel, mivel nagyszámú analízis elvégzése szükséges például a legmélyebben fekvő negatív gradiens vagy egy populációbeli tulajdonsághalmaz túlélőképességének meghatározása céljából. Továbbá, az elvégzendő analízisek száma tovább nőhet a célfüggvényben szereplő tervezési paraméterek és a változók számának növelésekor.

Az áramlással kapcsolatban lévő szilárd falak gyakorolnak legnagyobb hatást magára az áramlásra, ezért célszerűnek tűnik egy olyan optimalizációs eljárás irányába elindulni, ami ezt a kapcsolatot tárja fel. Az inverz tervező eszköz egy ilyen megoldás alapja lehet, mivel képes a falakat az előírt nyomás- vagy sebesség-eloszlás eléréséig módosítani egy egyszerű, gyors és stabil algoritmus segítségével [4]. Az inverz módszerek számítástechnikai szempontból hatékonyak, mivel az új szilárd fal geometriai kialakításához jelentősen kevesebb iterációra van szükség (3-10 a jelen alkalmazásban), mint egyéb optimalizációs eljárások esetén. A kutatásban alkalmazott inverz tervező módszer működését tekintve 3 fő részre bontható; direkt, inverz és fal módosító eljárás, miközben kiindulási feltételként rendelkezésre áll egy kezdeti geometria és egy bizonyos megfontolások alapján meghatározott optimális fali nyomás-eloszlás. Az eljárás a direkt módszerrel kezdődik, amelynek eredményeként kialakul az áramlási tér. A következő lépés az inverz számítás. Az optimalizálandó szilárd fal lokálisan nyitottá válik és az előírt nyomáseloszlás jelenik meg ezen a peremen. A numerikus megoldás kialakulása (analízis) során kapott, valamint az előírt nyomás-eloszlás különbségének köszönhetően a közeg ki- vagy beléphet ezen a peremen, melynek következtében nem lesz többé párhuzamos egymással a falhoz közeli sebességvektor és a fal. A tervezési feladat utolsó része a fal módosító eljárás. Az új geometria a kialakult sebességvektorokkal párhuzamos helyzetet vesz fel a belépőéltől integrálva a kilépőélig (ha a belépőél és a kilépőél között helyezkedik el a módosítandó fal). A ciklus végén az iteráció egy újabb direkt megoldóval kezdődik és a folyamat ismétlődik a cél-nyomáseloszlás eléréséig, amelynek eredményeként általában 3-10 iteráció alatt kialakul az új geometria.

Az inverz tervezési módszerek egyik legnagyobb hátránya azonban az, hogy az előírt – bizonyos szempontból optimális – nyomás-, illetve sebesség-eloszlás meghatározása nem része az inverz tervező eljárásnak. Ennek előállítását a felhasználó feladata, ami a tapasztalati módszerek miatt a legtöbb esetben nem egyezik meg az optimális megoldással. Továbbá az előre meghatározott eloszlásgörbék – profil vagy lapátrács tervezése esetén például – gyakran vezetnek negatív lapátvastagsághoz, illetve nyitott kilépőélhez. Ezért, a jelen munka egyik legfontosabb célja, hogy egy olyan komplex számítástechnikai módszert dolgozzon ki és verifikáljon, amely a geometria körül kialakult eloszlás-függvények optimalizálását követően állítja elő az áramláshoz tartozó valós (gyártható) geometriát külső, belső, és lapátrácsban kialakult áramlások esetén.

A Numerikus módszer, a validáció és az optimalizációs eljárás

Alapegyenletek

Az iparban alkalmazott gépészeti rendszerekben, illetve azok körül kialakuló áramlások kb. 90 százalékában a Knudsen szám kisebb, mint 0,001, ezért a Navier-Stokes (NS) egyenletek segítségével leírható az áramlás. Az alapegyenletek konzervatív, időfüggő és összenyomható formában, test-erők és belső hőforrás nélkül, Descartes-féle koordináta rendszerben kerültek felhasználásra. A számítási idő lerövidítésének érdekében a Reynolds és Favre átlagolást alkalmazva megszűnik a turbulens fluktuációból adódó bizonytalanság. Az így előálló új egyenletrendszer formálisan megegyezik a lamináris áramlás NS-egyenleteivel, azonban néhány új tag megjelenik benne. Ezek a tagok a Reynolds-feszültségek, amelyeket az alapegyenletek nemlineáris tagjai eredményeznek. Mivel nem ismert a kapcsolat az egyenletbeli átlagolt paraméterek, illetve a Reynolds-feszültségek között, ezért a vizsgált áramlás-típusra leginkább alkalmazható $k-\omega$ turbulencia modell egyik fő célja, hogy határozottá tegyék az alapegyenlet-rendszert. Boussinesq közelítését figyelembe véve (ami szoros kapcsolatot feltételez a lamináris és a turbulens feszültségek között) a Reynolds-feszültségek a turbulens viszkozitás segítségével fejezhetők ki. A turbulens áramlásból adódó viszkozitás a molekuláris viszkozitás matematikai modelljének segítségével állítható elő, az eredő viszkozitás pedig e kettő összegeként írható fel. A molekuláris viszkozitás magának az áramló közegnek az állandó tulajdonsága, ellenben a turbulens viszkozitással, ami az áramlástan paraméterek függvényeként térben és időben változhat. A súrlódás-mentes ideális áramlás feltételezéssel élve, a NS egyenletek a viszkózus és a hővezetési tagok elhanyagolásával az Euler egyenletekre vezethetők vissza, amelyek a lökeshullámok, a kontakt- és az örvényfelületek kezelhetősége szempontjából a nem viszkózus áramlás legmagasabb fokú approximációját jelentik. Az Euler egyenletek a határrétegen kívüli és a leválás nélküli nagy Reynolds számú összenyomható áramlás modellezésére alkalmasak. Mivel napjaink ipari-áramlástan folyamataiban lezajló folyamatokra a nagy Reynolds szám jellemző, ezért ebből a szempontból az Euler egyenletek alkalmas közelítésnek tűnnek.

Véges térfogat módszer

Az NS, illetve Euler egyenleteknek napjainkig nem létezik zárt alakú általános érvényű megoldása, azonban az alapegyenletek numerikus megoldása hathatós segítséget nyújt az áramlástan-mérnöki problémák megoldásában. Az áramlástan feladatokban a differenciál-egyenletek numerikus megoldására általában a következő három diszkretizációs eljárást alkalmazzák: véges differenciák módszere, véges térfogat módszere és a véges elemek módszere. A véges térfogat módszer egyesíti a véges elemek flexibilitását és a véges differenciák egyszerű programozhatóságát, ezért ez a módszer került alkalmazásra. A véges térfogatok módszere az alapegyenletek integrálása után megjelenő kifejezések diszkretizálásán alapszik. A megoldható algebrai egyenletrendszer az alap-egyenletek összevonását, az adott felülettel (vagy görbével 2D esetén) határolt zárt tartomány (véges térfogat) feletti integrálását és a Gauss–Ostrogradskij tétel alkalmazását követően írható fel. A konvektív tagok térbeli diszkretizációja Roe által közelített Riemann módszer segítségével történt a kis numerikus disszipáció miatt [5]. Az eljárás szoros kapcsolatban áll a karakterisztikus transzportfolyamatokkal és az egyik leghatékonyabb Riemann megoldó az áramlásban megjelenő különféle szakadások modellezésének lehetősége miatt. A segítségével előállított numerikus fluxus-függvény azonban nem-fizikai expanziós lökeshullámok megjelenéséhez vezethet a sajátérték mátrixban szereplő karakterisztikus sebességek

közelében, ami ellentmond az entrópia-növekedés elvének. Ez, jelen esetben Yee által javasolt entrópia-korrektció alkalmazásával vált elkerülhetővé [6]. A magasabb rendű térbeli diszkretizáció érdekében MUSCL (Monotone Upstream Schemes for Conservation Laws) közelítés bevezetésével sikerült javítani a numerikus séma pontosságán. A monotonitás megőrzése érdekében MinMod limiter került alkalmazásra. A diffuzív tagok térbeli diszkretizációja centrális módon történt. Az alapegyenletek átalakítását követően az idő szerint elsőrendű differenciálegyenlet-rendszer a számítástechnikailag kedvező negyedrendű Runge-Kutta módszer segítségével lett megoldva. Az explicit módszer számítási sebességének növelése érdekében a cellára érvényes maximálisan előírható (lokális) időlépés került bevezetésre.

A probléma korrekt kitűzéséhez elengedhetetlen a peremfeltételek számának és értékének helyes megadása. Az optimalizációs módszerben alkalmazott sűrűdés-mentes áramlásra érvényes fizikai és numerikus peremfeltételek a karakterisztikák módszerének segítségével lettek meghatározva. Ha egy hullám által szállított információ a számítási tér felől érkezve éri el a cellahatárt, akkor a megfelelő változó ennek az információnak a segítségével állítható elő. Ha a karakterisztikus görbe a számítási téren kívülről érkezik, akkor egy fizikai paramétert kell előírni a peremen.

A hangsebesség alatti belépő perem esetén három bejövő és egy kimenő karakterisztikus görbe éri el a cellahatárt, ezért három paraméter, a torlóponti nyomás, a torlóponti hőmérséklet és a belépő áramlás iránya lett előírva, mint fizikai peremfeltétel. A karakterisztikák módszerének megfelelően a problémát a cellahatárra merőleges és arra párhuzamos irányokban felírva csak egyetlen karakterisztika rendelkezik negatív meredekséggel, ezért az ehhez tartozó karakterisztikus egyenlet került alkalmazásra teljes differenciál formában a numerikus peremfeltételek meghatározásának céljából.

A kilépő peremfeltételek esetén két kimenő és egy bejövő karakterisztikus görbe jelenik meg, ezért egy paraméter, a kilépő statikus nyomás írható elő, mint fizikai peremfeltétel. A hiányzó peremfeltételek meghatározására a két kifelé menő karakterisztikus változókhoz tartozó kompatibilitási egyenletek lettek felhasználva.

A direkt módszer esetén, a számítási idő csökkentése érdekében, egy új, a szilárd fal peremekre kidolgozott numerikus számítási eljárás implementálásával jelentősen csökkenthetővé vált a számítási idő. A rugalmas fal perem-feltétel lényege egy rugó-csillapító lengőrendszer, amely az idő iterációk során megengedi a falra merőleges nem zérusértékű sebesség-komponensek megjelenését, mialatt a hiperbolikus típusú problémákra jellemző zavarások a falon keresztül, visszaverődés nélkül távoznak a számítási térből. A módszer tesztelését követően egy nagyságrenddel kisebb maradék-értékek adódtak a konvergenciára 4000 iteráció után. A módszer a pontatlansága miatt (eltérő numerikus peremfeltételek a direkt és inverz számítások esetén) csak a nagy kezdeti és cél-nyomásváltozások esetén (belső áramlások) alkalmazható jó hatásfokkal. A külső- és a lapátrácsban történő áramlások esetén szintén a karakterisztikák módszerén alapuló tükör fal peremfeltétel segítségével állíthatók elő a peremen előírt paraméterek.

Az inverz tervező eljárás esetén a szilárd fal nyitott peremmé alakul át. Az előírt (optimális) fali és a számítási térben kialakult nyomáseloszlás-különbség következtében vagy beáramlás vagy kiáramlás alakul ki a vizsgált peremen. Ennek köszönhetően, a fali sebességvektorok nem lesznek többet párhuzamosak a szilárd fallal érintkező cella oldalával.

Az inverz analízis lefuttatása után a tervezés következő (és utolsó) lépése a fal módosító eljárás, ami nem tartozik a peremfeltételeket ismertető alfejezethez, azonban érdemes

megemlíteni a teljesség kedvéért. Az új fal – a belépő torlópontról kiindulva a kilépőig – párhuzamossá válik a cellában kialakult sebességvektorral, ami azonban még nem garantálja az előírt állapot azonnali elérését, több számítási ciklusra van szükség. A végső – optimális nyomáseloszláshoz tartozó – geometria (az inverz tervezés három lépésének (direkt, inverz és fal módosító eljárás) egymás utáni iterációját követően) általában 3-10 ciklus után alakul ki.

Az optimalizációs módszer

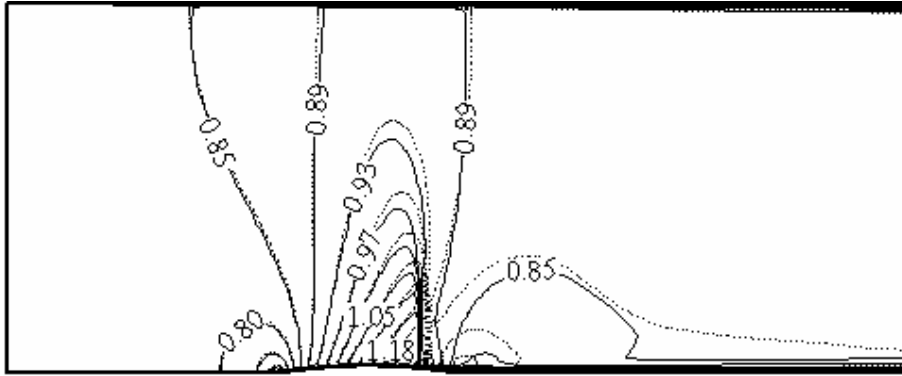
Mint ahogy arról már többször volt szó, az inverz tervezőeszköz alkalmazása előtt rendelkezésre kell, hogy álljon egy olyan optimális nyomáseloszlás, amihez a cél a geometria előállítás. Ezért ebben az alfejezetben az erre vonatkozó eljárás kerül bemutatásra.

Az áramlást határoló fal egyik legfontosabb tulajdonsága, hogy a lehető legnagyobb terheléssel vegye ki a részét az áramlás okozta igénybevételből – lehetőleg minimális ellenállás mellett és megfelelően távol a kritikus üzemtől – legyen szó akár erőgépről, munkagépről, illetve egyéb mérnöki problémát magába foglaló konstrukcióról. Ez természetesen a felület alakjával (görbületével) valósítható meg legtöbbször, ami problémás lehet diffúzív áramlás, vagyis pozitív felület-menti nyomás gradiens esetén. Ezért a jelen optimalizációs módszerben Stratford mérési eredményein alapuló leválás-előrejelzéses módszere került implementálásra [7,8]. Bár a sebesség hatása nem jelentős, az adott Reynolds szám tartományban érvényes módszer egy olyan empirikus függvénykapcsolatot foglal magába, amely a belépő torlópontról a nyomás, hőmérséklet és a kilépő statikus nyomás függvényében határozza meg – a maximális sebesség helyétől kezdve – azt a pozitív nyomás gradiens-eloszlást, amely minimális, de biztonságos távolságra van a leválástól. Adott intervallumon belül természetesen végtelen számú ilyen eloszlás lehetséges a maximális sebesség (és minimális nyomás) nagyságától függően. Ezért, az alkalmazott és kényszerített minimumkeresésen alapuló nemlineáris optimalizációs algoritmus célja, hogy megtalálja azt az eloszlásgörbét, amely a meghatározott kezdeti- és végparaméterek előírását figyelembe veszi, illetve minimális függvény alatti (vagy szívott és nyomott oldal által közbezárt maximális) területtel rendelkezik, természetesen biztonságos távolságra a leválástól.

Validáció – Navier-Stokes megoldó

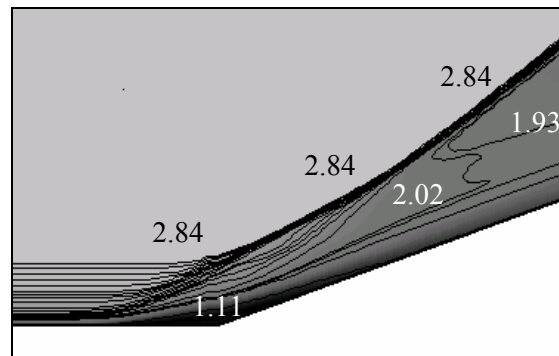
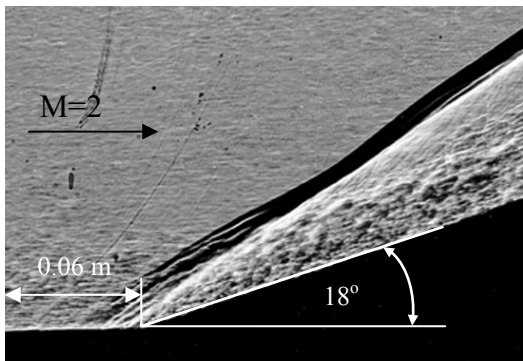
A bemutatott eljárás matematikai szempontból kielégíti a konzisztenciára a konvergenciára és a stabilitásra vonatkozó feltételeket, ezt több publikáció is alátámasztja (pl. [9]). A gyakorlati alkalmazást tekintve azonban célszerű megvizsgálni a program működésének helyességét. Ezért a jelen alfejezetben összehasonlító számítások bemutatása következik félszárny-profil körül kialakult áramlás transzszonikus csatornában és kompressziós sarok tesztesetekre vonatkozóan.

Az első validációs eset a csatornába helyezett félszárny-profil feletti transzszonikus áramlás, amelybe 0,85-s Mach számmal érkezik a levegő és egy gyenge lökéshullám alakul ki a profil hátsó része felett. Az **1. Ábrán** az ANSYS Fluent kereskedelmi szoftver és a saját megoldó direkt eljárásának eredménye látható összehasonlítás céljából, egyező geometria, numerikus háló, turbulencia modell és peremfeltételek esetén. Az egymásra vetített állandó Mach szám görbék jó egyezőséget mutatnak, azonban a saját szoftver korábban jelzi a lökéshullámot. Ennek az egyik valószínű oka a nagyobb disszipáció, ami a numerikus megoldó belső tulajdonságainak, illetve a finomhangolás hiányának lehet a következménye.



1 Ábra. Mach szám eloszlás a csatornába helyezett félszárny-profil feletti transzszonikus áramlás esetén (pontvonal: ANSYS Fluent, folytonos vonal: saját szoftver)

A második tesztet a kompressziós sarok, amelyben egy 18 fokos lejtő követi az alsó sík falat egy csatornában. A csatornába 2,85-s belépő Mach számmal érkezik a levegő. A ferde rámpa előtt lefékeződik a közeg, melynek köszönhetően egy intenzív ferde lökéshullám jelenik meg a lejtő előtt. A geometria és a számítás eredményének Mach szám eloszlása a **2. Ábrán** látható. Az analízis eredményének méréssel való összehasonlítása érdekében egy Schlieren felvétel látható szintén a **2. Ábrán**. A lökéshullám helyzete jól egybeesik a számítás és a kísérlet esetén, amit a kvantitatív eredmények is igazoltak. A számítási eredmények általában 5-10 százalék alatti pontossággal térnek el a mérési eredményektől, ami mérnöki szempontból elfogadható.



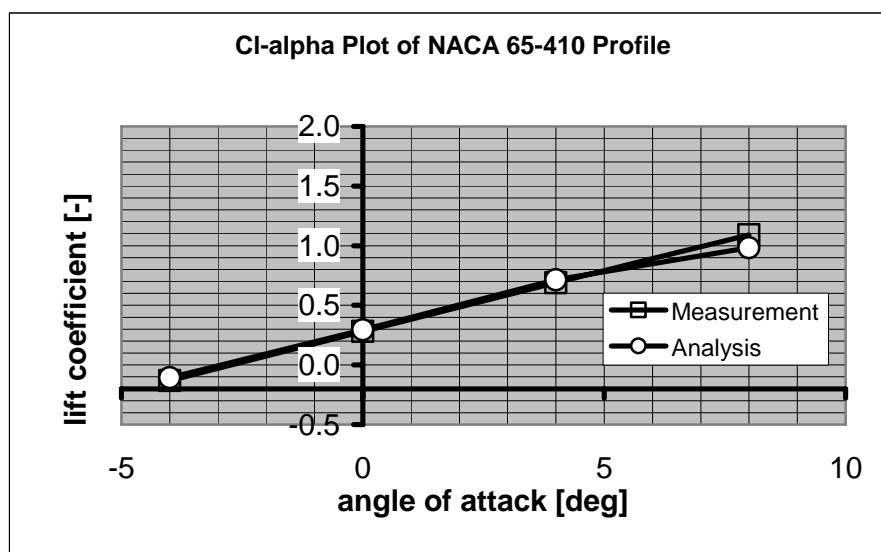
2. Ábra. Kompressziós sarok geometriai kialakítása Schlieren felvétellel, 2,85-s bemeneti Mach-szám esetén (bal oldal) [10] és a saját szoftver eredményének Mach szám eloszlása (jobb oldal)

Validáció – Euler megoldó

A járműiparra és különösen a repülőiparra a nagy Reynolds számú összenyomható áramlások jellemzőek, melynek köszönhetően sűrűdásmentes feltételezéssel élve mérnöki szempontból még elfogadható eredmények állíthatók elő különösen 2D-s közelítések esetén. Az előző fejezetbe leírtakhoz hasonlóan, a numerikus módszer matematikai szempontból kielégíti a konzisztenciára, a konvergenciára és a stabilitásra vonatkozó feltételeket. A gyakorlati alkalmazást tekintve azonban, célszerű megvizsgálni a program működésének helyességét, hogy milyen hatással vannak az eredményekre az említett elhanyagolások,

egyszerűsítések. Ezért a továbbiakban két mérésel összehasonlított tesztet bemutatása következik; először egy NACA 65-410 szárnyprofil körüli áramlás, majd a profil segítségével kialakított lapátrácsban történő áramlás. Azért esett a választás az említett geometriákra, mert az optimalizációs módszerekben is ezek a modellek fognak szerepelni.

Abbott és munkatársai [11] jelentős számú mérést végeztek el a NACA 6 típusú profilok vizsgálatával kapcsolatban, amelyek a jelenlegi validációs eljárásban is felhasználásra kerülnek. A mérésekhez hasonló $9E6$ -s Reynolds számú áramlás a megfelelő peremfeltételek segítségével állítható elő a NACA 65-410 profil körüli áramlás numerikus modellezése esetén. A számítási és mérési eredmények összehasonlításának érdekében a felhajtóerő tényező ábrázolása az állásszög függvényében a **3. Ábrán** látható. Mérnöki szempontból a módszer elfogadhatónak tekinthető, mivel az adott beállítások esetén a mérés és a számítás eredményei közötti eltérés 10 százalék alatt van.



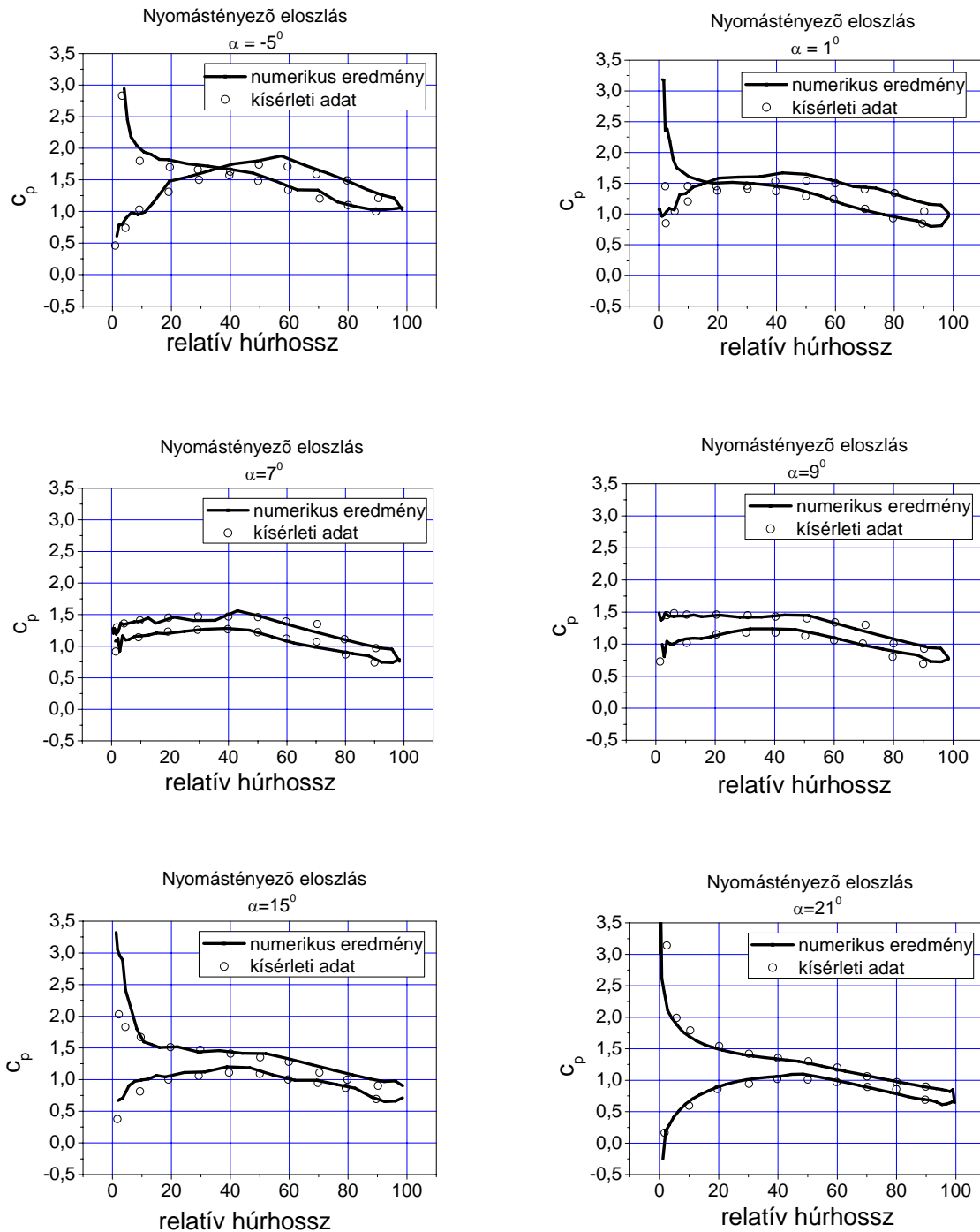
3. Ábra. Felhajtóerő tényező az állás szög függvényében NACA 65-410 profil esetén (fekete: mérés, szürke: számítási eredmény) $Re=9E6$

A második validációs tesztet szintén a NACA 65-410 profilon alapul. A segítségével létrehozott lapátrácsban a lapátosztás $\sigma = 1,5$, a húrhossz $c = 12,7$ cm és amelyekből a két lapát közötti távolság c/σ . Az α és a β_l szögek az áramlás, illetve a húr és az axiális tengely által bezárt szögeket jelöli. A kiinduló alapesetben $\beta_l = 30^\circ$ és $\alpha = 21^\circ$. A mérésel megegyező $Re = 2,45E5$ Reynolds számú áramlás a következő peremfeltételek beállításával érhető el: belépő torlóponti nyomás: $p_{tot,in} = 101750$ [Pa]; belépő torlóponti hőmérséklet: $T_{tot,in} = 293.15$ [K]; kilépő statikus nyomás: $p_{stat,out} = 101325$ [Pa]. A H típusú strukturált numerikus háló elemszáma: 110×60 .

A kvalitatív számítási eredmények mérésel való összehasonlítása a nyomástényező értékének segítségével történt több állásszögön. Az eredmények a **4. Ábrán** láthatók, amelyek jól korrelálnak a mérésel. A közöttük lévő különbség kisebb, mint 8 százalék, ami mérnöki szempontból elfogadható. A nyomástényező értéke jelentősebb eltérést a belépőél közelében mutat, ami a geometriai diszkretizáció pontatlanságának tudható be.

A fenti eredmények arra engednek következtetni, hogy az Euler egyenleteken alapuló numerikus módszer jelentősen rövidebb idő alatt szolgáltatott mérnöki szempontból

elfogadható eredményt a vizsgált tesztesetekre. Ennek köszönhetően az inverz tervezésen alapuló optimalizációs módszer alapegyenletei a sűrűdásmentesnek feltételezett Euler egyenletek segítségével állíthatók elő.

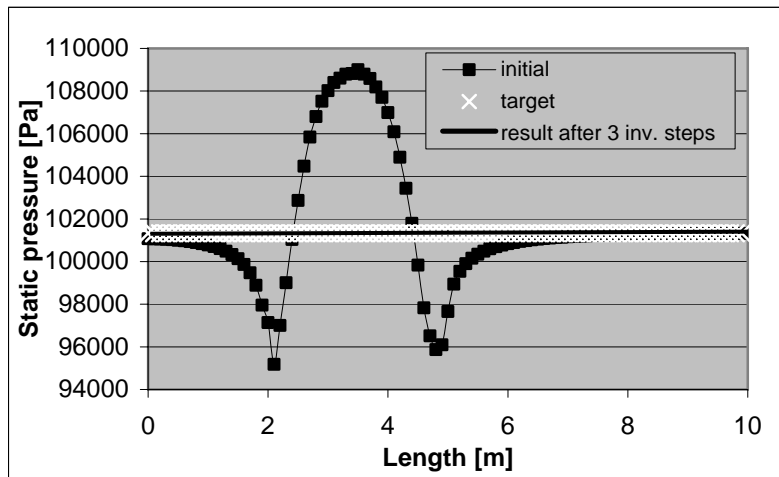


4. Ábra. Nyomástényező a relatív húrhossz függvényében különböző állásszögek esetén ($Re=2,45e5$, folytonos vonal: számítás eredménye, körök: mérés [12])

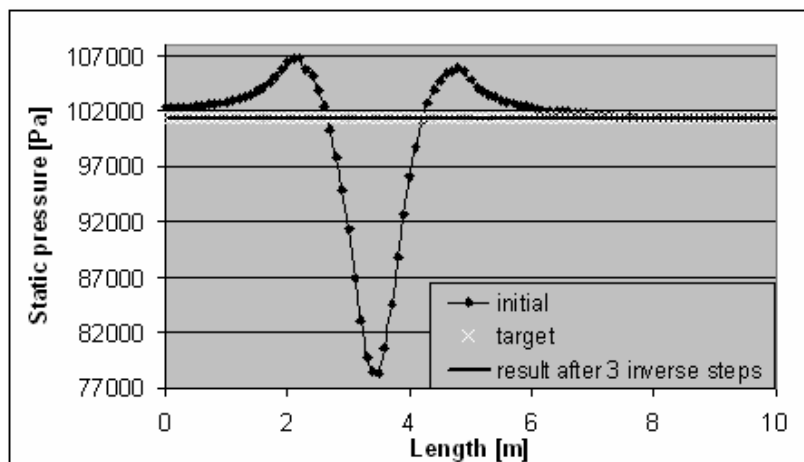
Az optimalizációs eljárás tesztelése

Optimalizációs tesztelés I. – Belső áramlások

A módszer verifikációja belső áramlások optimalizálására egy viszonylag egyszerű tesztelés segítségével mutatható be. Adott egy 2D-s csatorna, benne egy szinusz függvény felhasználásával modellezett alakváltozás, amely egyaránt lehet konkáv vagy konvex. Adott és állandó peremfeltételek esetén, az optimalizációs alfejezetben leírt módszertől eltérően, egy, a kimeneti statikus nyomással egyező (optimális) nyomás-eloszlás lett előírva a konkáv vagy konvex profilt magába foglaló falszakaszra. Az iteratív számítási ciklusban (jelen esetben 3), a direkt az inverz és a fal módosító eljárás követi egymást addig, amíg elő nem áll az előírt célfüggvényhez tartozó geometria. Az eredeti-, a cél- (optimális) és az eredménynyomáseloszlás az **5. és 6. Ábrán** látható. Az optimalizáció végén minden esetben vízszintes egyenessé alakult a kezdeti konkáv vagy konvex falszakasz. Az alkalmazott peremfeltételek a következők: bemeneti torlóponti nyomás: $p_{tot,in}=110729$ [Pa]; bemeneti torlóponti hőmérséklet: $T_{tot,in}=293.15$ [K]; kimeneti statikus nyomás: $p_{stat,out}=101325$ [Pa]. A téglalap alakú véges térfogatokból álló numerikus háló mérete: 100×40 . A számítások 4000 lépés után érték el a sűrűsége vonatkoztatott $1E-8$ -s konvergencia-kritériumukat.



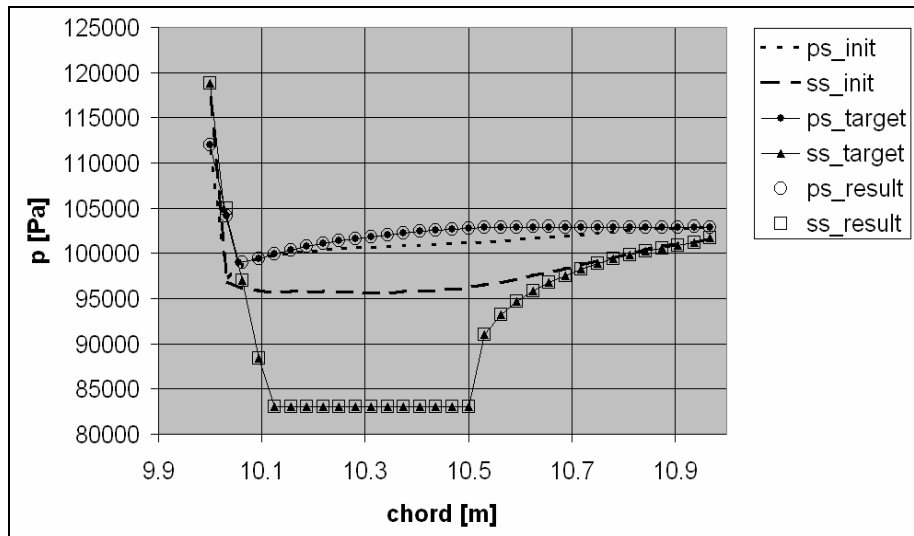
5. Ábra. Nyomáseloszlás a konkáv csatorna-fal optimalizált falszakaszán a kezdeti profil (initial), a cél-eloszlás (target) és az optimalizáció végeredménye (result) esetén



6. Ábra. Nyomáseloszlás a konvex csatorna-fal optimalizált falszakaszán a kezdeti profil (initial), a cél-eloszlás (target) és az optimalizáció végeredménye (result) esetén

Optimalizációs tesztet II. – Külső áramlások

NACA 65-410 szárny-profil szolgáltatva a kezdeti geometriát a II. tesztetben, amely a kidolgozott új optimalizációs módszer működésének külső áramlásra vonatkozó verifikációjára szolgál. Az $Re=9E6$ -s áramlás kialakulása érdekében alkalmazott peremfeltételek a következők: bemeneti torlóponti nyomás: $p_{tot,in}=112799,6$ [Pa]; bemeneti torlóponti hőmérséklet: $T_{tot,in}=293,15$ [K]; kimeneti statikus nyomás: $p_{stat,out}=101325$ [Pa]. A H típusú téglalap alakú véges térfogat-elemekből álló numerikus háló mérete: 87×60 . A kiindulási nyomáseloszlás a **7. Ábrán** látható “init” jelzőkkel ellátva (ps: nyomott oldal, ss: szívott oldal).

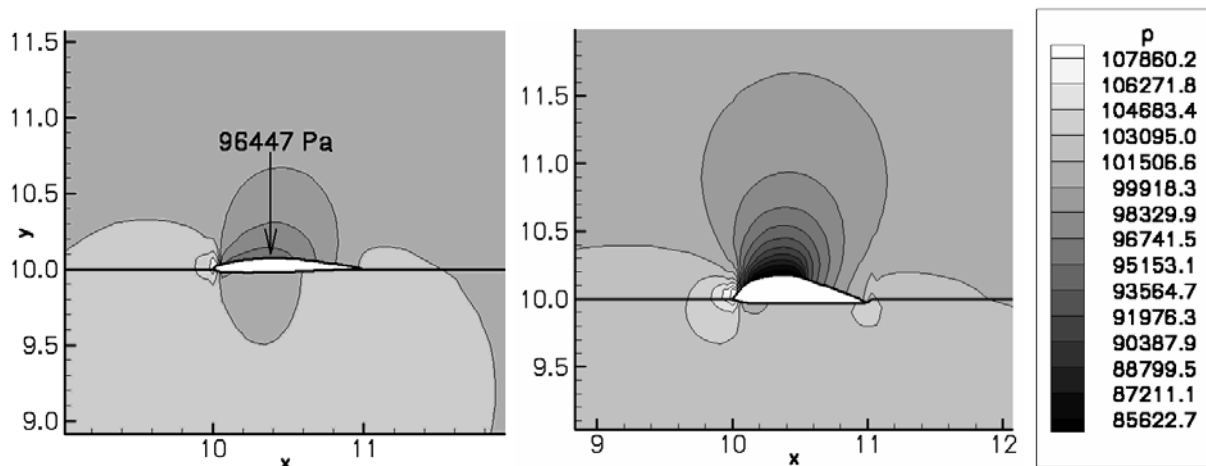


7. Ábra. Nyomáseloszlás a NACA 65-410 profil szívott és nyomott oldali peremén (az optimalizált falszakasz) a kezdeti geometria (init), a cél-eloszlás (target) és az optimalizáció végeredménye (result) esetén (ss: szívott oldal, ps: nyomott oldal) ($Re=9E6$)

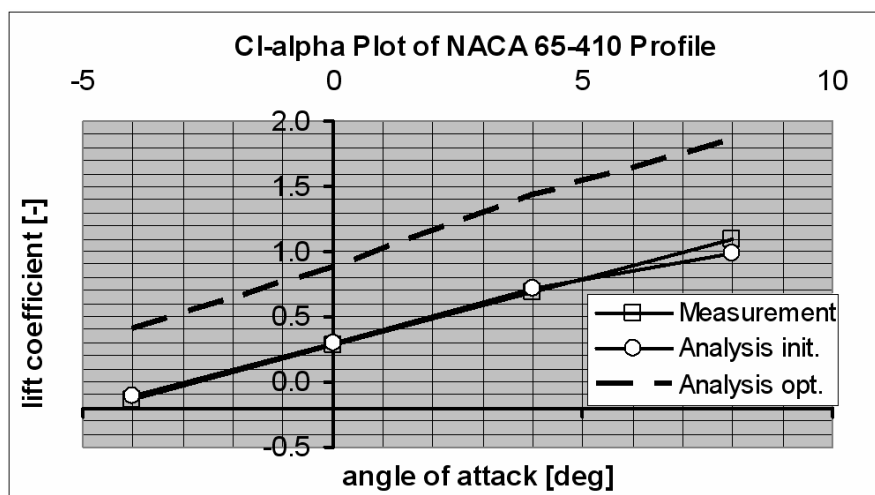
A Startford féle leváláshoz közeli nyomás gradiens figyelembevételével előállított és a maximális felhajtóerő tényezőhöz, vagyis a szívott (ss) és nyomott (ps) oldali nyomáseloszlások által közrehatárolt legnagyobb területű alakzathoz tartozó függvények a **7. Ábrán** láthatók “target” jelzővel ellátva. A nyomott oldali nyomáseloszlás terület-maximalizálásának az volt a kényszere – a stabilitás megőrzésének érdekében – hogy a maximális és minimális gradiens értékei sehol sem lehetnek nagyobbak, illetve kisebbek a kiindulási eloszlásokhoz tartozóknál, illetve a belépő- és a kilépőél környezetében nem változhattak a paraméterek. Az inverz tervező eljárás lefuttatása előtt a belépőél környezetében nagyobb fali nyomásértékek definiálására volt szükség a kilépőél fizikailag megfelelő (záródó) kialakulásának érdekében. Az így lefuttatott inverz számítások eredménye szintén a **7. Ábrán** látható “result” jelzővel ellátva. Az említett diagramban jól látszik az inverz tervező eszköz helyes működése. A cél- és az eredmény-nyomáseloszlások teljesen lefedik egymást. A kezdeti és az optimalizált áramlási tér nyomáseloszlása a **8. Ábrán** látható.

Bár az optimalizáció 0 fokos állásszög esetén lett elvégezve, az új geometria több állásszögön is jelentős javulást eredményez a felhajtóerő tényező-állásszög jelleggörbében (lásd **9. Ábra**).

Az eredmények további javításának érdekében célszerű lenne a felhajtóerő tényező mellett az ellenálláserőre is optimalizálni a profilt.



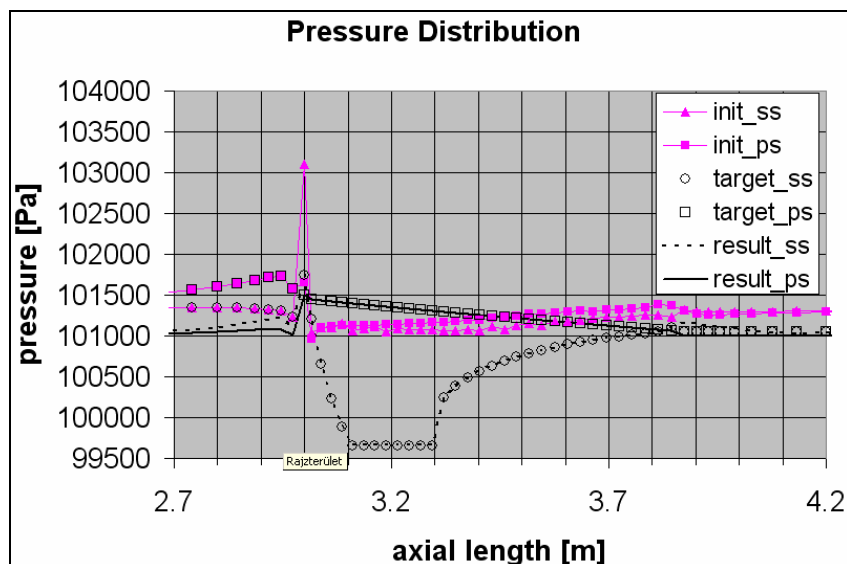
8. Ábra. Statikus nyomáseloszlás a NACA 65-410 profil körüli áramlási térben (bal oldal: kiindulási profil, jobb oldal: optimalizált profil) ($Re=9E6$)



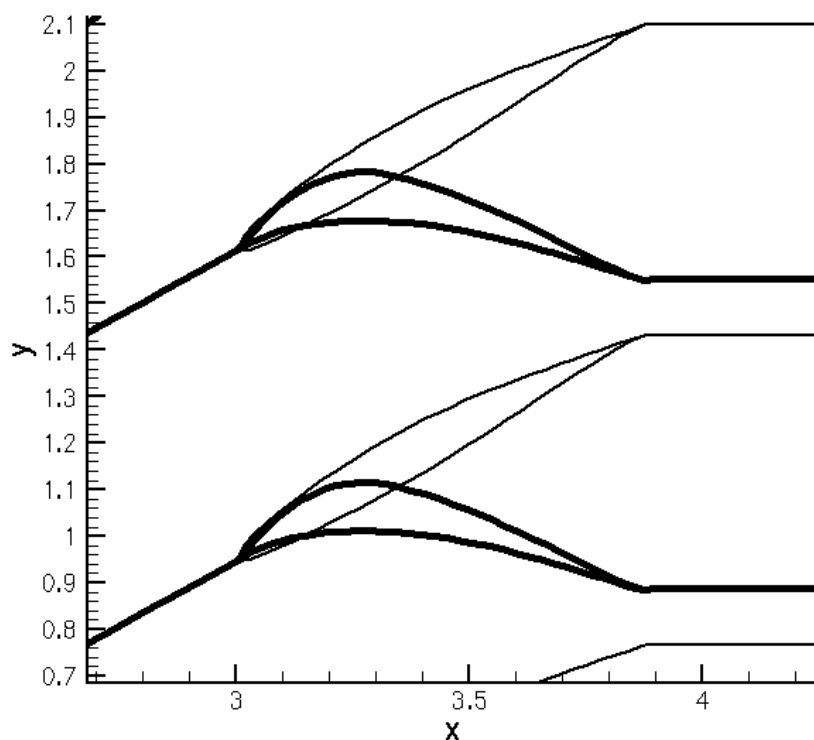
9. Ábra. Felhajtóerő tényező eloszlás az állásszög függvényében (kiindulási geometria mérés: Measurement, kiindulási geometria számítással: Analysis init, optimalizált geometria számítással: Analysis opt.) NACA 65-410 profil körüli áramlás esetén ($Re=9E6$)

Optimalizációs teszteset III. – Áramlás lapátrácsban (A bemutatott teszteset eredményei még nem kerültek publikálásra)

A NACA 65-410 profil segítségével előállított lapátrács esetén kétféle teszteset alkalmazásával mutatható be a módszer helyes működése. Az első esetben az eredeti lapátrács kilépő élének statikus nyomása csökkent 0,27 %-kal. Az optimális nyomás-eloszlás a Stratford féle leválás-előrejelzés felhasználásával és a maximális közbezárt terület optimalizálásával lett meghatározva az eredeti konfigurációval megegyező peremfeltételek figyelembevétel. A nyomott oldali nyomás-eloszlás a konvergens számítás és a záródó kilépőél feltételeinek kielégítése alapján lett meghatározva. A kiindulási, a cél és az optimalizáció eredményét bemutató nyomás-eloszlások a **10. Ábrán** láthatók. Az eredményekből jól látszik, hogy pontosan sikerült meghatározni azt a geometriát, amely kielégíti az optimális nyomáseloszlást. Továbbá, a kialakult geometria is elfogadható, mivel nem alakult ki negatív lapátvastagság, illetve nyitott kilépőél (lásd **11. Ábra**).



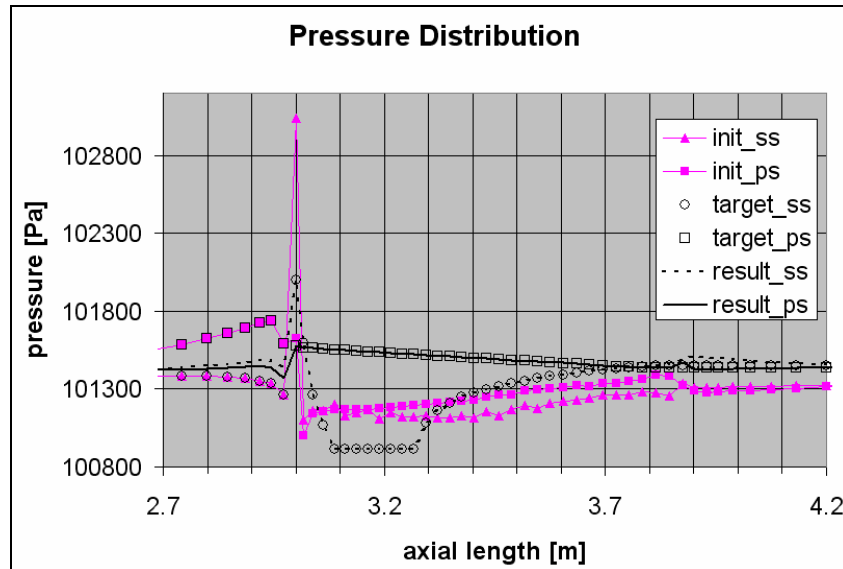
10. Ábra. Az eredeti (init), a cél (target) és az optimalizáció eredményét (result) bemutató nyomáseloszlások az axiális irány függvényében (ss: szívott oldal, ps: nyomott oldal) 0,27 %-os kilépőélel nyomás-csökkenés esetén a kiinduló geometriához képest NACA 65-410 profilból előállított lapátrács esetén ($Re=1,97E6$)



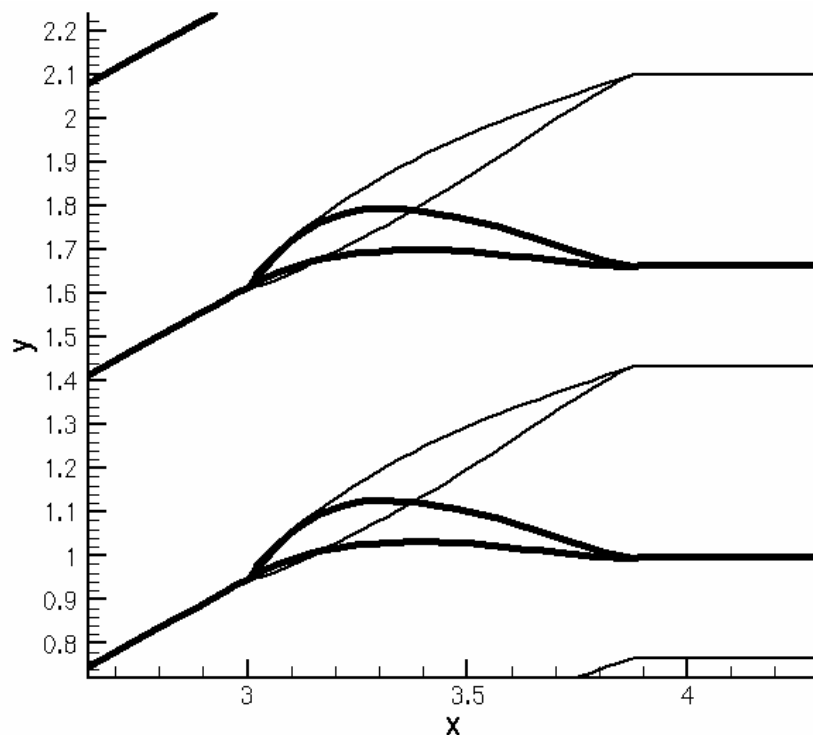
11. Ábra. Az eredeti (vékony vonal) és az optimalizált (vastag vonal) geometria NACA 65-410 profilból előállított lapátrács esetén és 0,27 %-os kilépőélel nyomás-csökkenés figyelembevételével ($Re=1,97E6$)

A NACA 65-410 profilból előállított lapátrács második teszt esetében az eredeti lapátrács kilépő élének statikus nyomása nőtt 0,126 %-kal. Az optimális nyomás-eloszlás a Stratford féle leválás-előrejelzés felhasználásával és a maximális közbezárt terület optimalizálásával lett meghatározva az eredeti konfigurációval megegyező peremfeltételek figyelembevétel. A

nyomott oldali nyomás-eloszlás a konvergens számítás és a záródó kilépőél feltételeinek teljesítése alapján lett meghatározva ismételten. A kiindulási, a cél és az optimalizáció eredményét bemutató nyomás-eloszlások a **12. Ábrán** láthatók. A diagramból jól látszik, hogy pontosan sikerült meghatározni azt a geometriát, amely kielégíti az optimális nyomáseloszlást. Továbbá, a kialakult geometria is elfogadható, mivel szintén nem alakult ki negatív lapátvastagság, illetve nyitott kilépőél (lásd **13. Ábra**).



12. Ábra. Az eredeti (init), a cél (target) és az optimalizáció eredményét (result) bemutató nyomáseloszlások az axiális irány függvényében (ss: szívott oldal, ps: nyomott oldal) 0,126 %-os kilépőéli nyomás-növekedés esetén (a kiinduló geometriához képest) a NACA 65-410 profilból előállított lapátrács esetén ($Re=1,97E6$)



13. Ábra. Az eredeti (vékony vonal) és az optimalizált (vastag vonal) geometria NACA 65-410 profilból előállított lapátrács esetén és 0,126 %-os kilépőéli nyomás-növekedés figyelembevételével ($Re=1,97E6$)

Az eredmények értékelése és a módszer felhasználási lehetőségei

A jelen kutatásban egy olyan új felület-morfológiai elven működő numerikus áramlástanai eljárás lett kidolgozva, validálva és verifikálva, amely képes az áramlást határoló szilárd falak adaptív optimalizálására. A módszer a szilárd falak áramlásra gyakorolt hatásvizsgálatán alapul és a maximális terhelés mellett, a leváláshoz közeli, de tőle biztonságos távolságban lévő pozitív nyomás gradiens és az ahhoz tartozó geometria meghatározására szolgál. A numerikus áramlástanai analízis eredményeinek mérésrel való összehasonlítása mérnöki szempontból kielégítő eredményekre vezetett a vizsgált esetekben, ami a módszer alkalmazhatóságát jelenti. Az optimalizációs eljárás helyes működésének tesztelése, vagyis a szilárd falak alkalmazástól függő optimális előállítás a belső-, külső-, és lapátrácsban kialakult áramlások segítségével történt meg. A módszer a gyakorlati életben jelentősen lerövidítheti az áramlás és teljesítmény szempontjából optimális geometria előállításának irányába tett erőfeszítéseket. Az eljárás pontossága 3D-s kiterjesztéssel és a súrlódás figyelembevételével tovább növelhető.

A kutatási eredményekből 12 publikáció született, amely Zárójelentés végén megtalálható. Az „**Optimalizációs tesztet III. – Áramlás lapátrácsban**” alfejezetben bemutatott eredmények még nem lettek publikálva, közzétételük további közlemények megjelenését jelenti. A hallgatói részvételnek köszönhetően a résztvevők elsajátították az elméleti és gyakorlati módszereket, melyek továbbfejlesztésére (ellenállás-erő tényező csökkentése) pályázatot adtak be az AIRBUS által megrendezett AIRBUS FLY YOUR IDEAS versenyre “Multi-Objective Airfoil Optimization by Means of Inverse Design and Separation Prediction” címmel. További ipari felhasználás érdekében jó kapcsolatot sikerült kiépíteni a HO-FÉM Kft. (Kiskunfélegyháza) ügyvezetőjével. A cég mikro gázturbinák gyártásával foglalkozik. A konzultációk során az a közös álláspont alakult ki, hogy kidolgozott eljárás kizárólag a 3D-s implementálást követően vizsgálható tovább a centrifugál-kompresszorok optimalizálásának kutatásában. A módszer ipari szoftverekbe való bevezetéséhez további fejlesztésekre, tesztekre és ellenőrzésekre van szükség. Az eljárás (alkalmazása és további fejlesztése) fokozatosan kerül bevezetésre BME Közlekedésmérnöki Karon tanuló Repülő gépészek BSc és MSc képzésébe.

Irodalomjegyzék

- [1] A. Shaha, L. Yuanb, A. Khan, Upwind compact finite difference scheme for time-accurate solution of the incompressible Navier–Stokes equations, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 215, Issue 9, 1 January 2010, pages 3201-3213.
- [2] T. Sun, K. Ma, A space–time discontinuous Galerkin method for linear convection-dominated Sobolev equations, *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 210, Issue 2, 15 April 2009, Pages 490-503.
- [3] D. Thévenin, G. Janiga, Optimization and Computational Fluid Dynamics, Hardcover, ISBN 978-3-540-72152-9, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008, Berlin.
- [4] L. De Vito, R. Van den Braembussche, H. Deconinck, A Novel Two-dimensional Viscous Inverse Design Method for Turbomachinery Blading, International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, Amsterdam, PAYS-BAS (03/06/2002) 2003, vol. 125, n2, pp. 310-316.

- [5] P. L. Roe, Approximate Riemann Solvers, Parameter Vectors, and Difference Schemes, *Journal of Computational Physics*, Vol. 43 pp. 357-372, 1981.
- [6] H. C. Yee, A class of high-resolution explicit and implicit shock-capturing methods, *VKI lecture series 1989-04, March 6-10, 1989; NASA TM-101088, Feb. 1989.*
- [7] B. S. Stratford, The Prediction of Separation of the Turbulent Boundary Layer, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 5. pp 1-16, 1959
- [8] A. M. O. Smith, High-Lift Aerodynamics, *Journal of Aircraft*, Vol. 12 No. 6, pp. 501-530, 1975.
- [9] E. Stein, R. Borst and T. Hughes, Finite volume methods: foundation and analysis, Edited by John Wiley & Sons, Ltd. c 2004.
- [10] http://www.e fluids.com/e fluids/gallery/gallery_pages/18degramp.htm (Prof. Gary Settles, Gas Dynamics Lab, Penn State University (PHD Thesis, Princeton, 1975))
- [11] I. H. Abbott, A. E. von Doenhoff, and L. S. Stivers, NACA REPORT No. 824., Summary of Airfoil Data.
- [12] J. C. Emery, et al., Systematic two-dimensional cascade tests of NACA 65-series compressor blades at low speeds, NACA Report 1368, 1958.

A kutatási témával kapcsolatos publikációs jegyzék

1. Veress, Á – Felföldi, A. – Gausz, T. – Palkovics L.: Coupled Problem of the Inverse Design and Constraint Optimization, **Applied Mathematics and Computation**, (under revision) (special issues on Proceedings of ESCO 2010 Conference) (impact factor 1.124), 2010.
2. Veress, Á – Gallina, T. – Rohács, J.: Fast and Robust Inverse Design Method for Internal and Cascade Flows, **International Review of Aerospace Engineering**, February issue, (impact factor 6.49), 2010 (<http://www.praiseworthyprize.com/irease.htm>).
3. Felföldi, A. – Veress, Á.: Optimization of the Pressure Distribution around Airfoils for Inverse Design Method, **17th Hungarian Days of the Aeronautical Sciences**, Proceedings on CD (under edition), Budapest, Hungary, November 11 – 12, 2010.
4. Veress, Á. – Gallina, T.: Verification of an Inverse Design Solver by Means of ANSYS CFX, **12th Mini Conference on Vehicle System Dynamics Identification and Anomalies**, Budapest, 08-10. 10. 2010, (<http://www.railveh.bme.hu/vsdia2010/VSDIA-2010-Program.php>).
5. Veress, Á. – Felföldi, A. – Palkovics, L.: Surface Optimization at Adverse Pressure Gradient Flow Conditions, **TEAM-AGTEDU-2010 Conference**, Kecskemét, GAMF, Hungary, 4-5 November 2010 (<http://www.gamf.hu/team2010/>).
6. Veress, Á. – Felföldi, A. – Gausz, T. – Palkovics, L.: Coupled Problem of the Inverse Design and Constraint Optimization, **ESCO 2010 Conference**, 2nd European Seminar on Coupled Problems, Pilsen, Czech Republic, 28 June - 2 July 2010.
7. Veress, Á. – Nagy, A. – Rohács, J. – Palkovics, L.: Implementation, Validation and Testing of an Inverse Design Tool for Redesigning NACA 65-410 Wing Profile, **ICNPAA 2010 World Congress, Mathematical Problems in Engineering, Aerospace and Sciences**, São José dos Campos (SP), Brasilia, 30 June – 3 July 2010.
8. Veress, Á – Gallina, T. – Felföldi, A.: Surface Morphing Method for Manifold Shape Optimisation, **FISITA 2010 World Automotive Congress**, Budapest, Hungary, 30 May - 4 June 2010.
9. Veress, Á – Gallina, T. – Rohács, J.: Súrólódásmentes közeg numerikus áramlástanai modellezése és érvényesítése, **Repüléstudományi konferencia**, Szolnok, 2010 április 16. (http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2010_cikkek/Veres_A-Rohacs_J-Gallina_T.pdf)
10. Veress, Á. – Gallina, T. – Rohács, J.: Modified Soft Solid Wall Convergence Acceleration Technique for 2D Euler Equations, **1st International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2010**, Prague, Czech Republic, 14 – 16 September 2010.
11. Veress, Á. – Molnár, J. – Rohács, J.: Compressible Viscous Flow Solver, **Periodica Polytechnica Transportation Engineering**, 37/1-2 pp. 77–81 2009 (http://www.pp.bme.hu/tr/2009_1/pdf/tr2009_1_13.pdf).
12. Veress, Á.: Implementation of a Finite Volume Method for Modeling Viscous Compressible Flow. **16th Hungarian Days of the Aeronautical Sciences**, Proceedings on CD (ISBN-978-963-420-857-0), Budapest, Hungary, 13-14 November 2008.