



AXISVM

SEGÉDLET A WIND MODUL HASZNÁLATÁHOZ

Készítette: Inter-CAD Kft.

TM Minden márka- és terméknév az adott cég védjegye vagy bejegyzett védjegye
© 1991-2024 Inter-CAD Kft. Minden jog fenntartva.

A programrendszer célja a tervezési munka megkönnyítése. Használata nem csökkenti felhasználójának felelősségét, hogy a kötelező szakmai gondossággal járjon el, valamint a tervezés időpontjában hatályos, idevonatkozó jogszabályi előírásokat, szabványokat maradéktalanul tartsa be.

TARTALOM

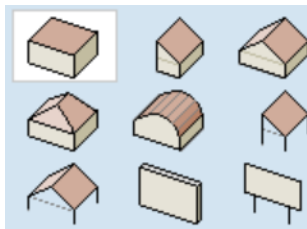
1.	BEVEZETÉS	4
1.1.	A MODUL BEMUTATÁSA	4
1.2.	AZ OPENFOAM BEMUTATÁSA	5
1.3.	LICENC	6
1.4.	A MODUL KORLÁTAI	6
2.	ELMÉLETI HÁTTÉR	9
2.1.	ÁLLANDÓSULT ÁRAMLÁS	9
2.2.	SIMPLEFOAM	9
2.3.	TURBULENCIAMODELLEK	10
2.3.1.	Bevezetés	10
2.3.2.	RANS	12
2.3.3.	k- ϵ modellek	13
2.3.4.	k- ω modellek	13
2.3.5.	Falfüggvények	14
3.	SZÉLTEHER	15
3.1.	BEVEZETÉS	15
3.2.	ÁLTALÁNOS PARAMÉTEREK	15
3.2.1.	Terep	15
3.2.2.	Levegő	15
3.3.	SZÉLPROFIL	16
3.3.1.	Szabvány szerinti szélprofil	16
3.3.2.	Egyedi szélprofil	16
3.4.	SZÉLIRÁNYOK	16
4.	SZÁMÍTÁS	17
4.1.	SZÁMÍTÁSI PARAMÉTEREK	17
4.1.1.	Paraméterek megadásának módja	17
4.1.2.	Modellparaméterek megadása	17
4.1.2.1.	Áramlástani modellter	17
4.1.2.2.	Szerkezetmodellezési beállítások	19
4.1.3.	Hálópáraméterek megadása	20
4.1.3.1.	Bevezetés	20
4.1.3.2.	blockMesh	20
4.1.3.3.	snappyHexMesh	20
4.1.4.	Megoldásvezérlés	21
4.1.5.	Generált szélteher	22
4.2.	PEREMFELTÉTELEK	22
4.3.	AXISVM TERHEK GENERÁLÁSA	23
5.	EREDMÉNYEK	25
5.1.	CFD TEHERESETEK	25
5.2.	EREDMÉNYKOMPONENSEK	25
5.3.	EREDMÉNYÁBRÁZOLÁS	25
5.4.	HÁLÓÁBRÁZOLÁS	29
6.	VERIFIKÁCIÓS PÉLDÁK	31
6.1.	KÖRHENGER	31
6.2.	NYEREGTETŐ	33
7.	SZAKIRODALOM	35

1. BEVEZETÉS

1.1. A modul bemutatása

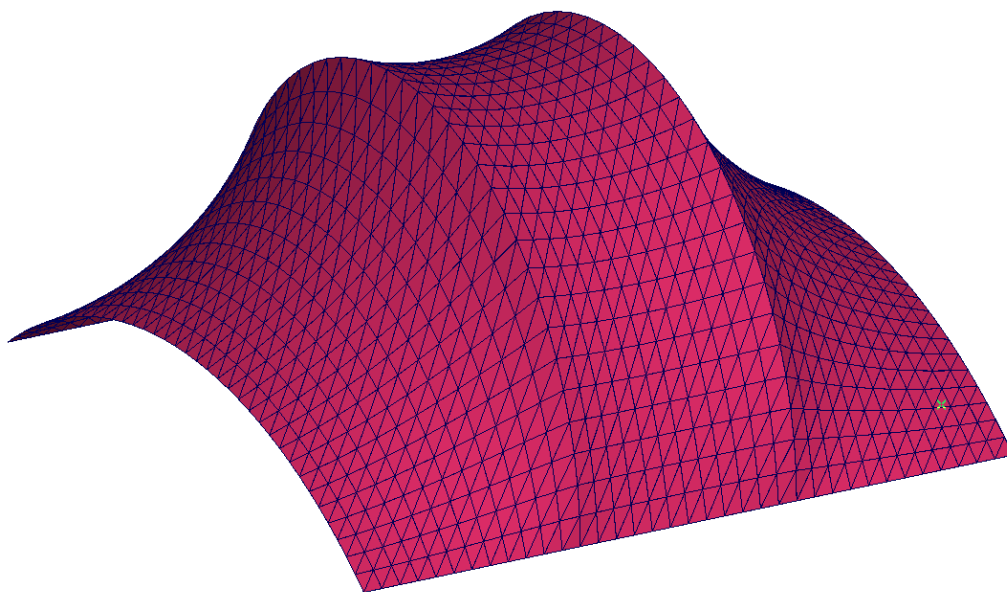
A WIND modul segítségével a felhasználó meghatározhatja a szerkezetre ható szélterheket olyan esetekben is, melyek a szabványban nem tárgyalta. Amennyiben egy szerkezeti geometriát az SWG modul "lefed", a szélterhet azon modul segítségével célszerű meghatározni, mivel az ad szabvány alapú, minden esetre kiterjedő, teljeskörű megoldást.

Az SWG modul által
kezelt szerkezeti
geometriák



SWG modul segítségével vizsgálható szerkezeti geometriák: *lapostető, félnyeregtető, nyeregtető, kontyolt tető, donga tető, szabadon álló félnyeregtető, szabadon álló nyeregtető, szabadon álló fal, jelzőtábla*. Amennyiben a szerkezet egyik felsorolt esettel sem mutat szorosabb egyezést, szükség lehet aerodinamikai szimulációra, így a WIND modulra, lásd lentebb. Az SWG modul jellemzően tetőformákra ható szélterhek megadásában jelent segítséget, azonban a WIND modul lehetőséget nyújt -a teljesség igénye nélkül- rácsos szerkezetek, részlegesen nyitott csarnokok, hűtőtornyok, szélturbinák, görbült héjszerkezetek szélterheinek meghatározásában. Magyarán a WIND modul általános megoldást nyújt a szélteher figyelembevételére. A CFD analízis abban az esetben kecsegtet a felhasználó számára kiemelkedő versenyelőnnyel, mely esetekben a szélteher kézi módszerrel, a szabvány előírásait követve, nem, nehezen vagy csak számottevő, biztonság javára történő közelítéssel határozható meg.

Kétszer görbült,
hiperbolikus felület,
példa szabványban
nem tárgyal
szerkezeti
geometriára



☞ **Amennyiben több, fent ismertetett szerkezettípus egymásra hatása kialakulhat, szintén megfontolandó a WIND modul alkalmazása. Például több nyeregtetőből álló összetett tetőforma.**

Az aerodinamikai szimulációt követően a nyomásmezőt a szerkezetre redukálja a szoftver, így statikus terheket kapunk, melyeket a továbbiakban lineáris, nemlineáris statikai vizsgálatokban, kihajlásvizsgálatok során, illetve tervezési modulokban figyelembe tudunk venni. A számítást a nyílt forráskódú OpenFOAM szoftver segítségével végezzük el.



A modul Eurocode 1991-1-4, illetve SIA261:2020 alapú szabványos szélprofilok alkalmazását teszi lehetővé. Azonban, amennyiben a felhasználó ettől eltérő profilt kíván megadni, arra is van lehetősége a szélprofil adatok magasság menti definiálása révén. Eurocode nemzeti mellékletei, illetve a svájci szabvány esetén a WIND modul az érvényben lévő nemzeti melléklet alapján határozza meg a szélprofilot.

Német EC	EC 1991-1-4:2005 DIN EN 1991-1-4/NA 2010 december
Olasz NTC	EC 1991-1-4:2005 UNI EN 1991-1-4/NA 2007 július NTC 2018
Holland EC	EC 1991-1-4:2005 NEN EN 1991-1-4/NB 2007 november
Magyar EC	EC 1991-1-4:2005 MSz EN 1991-1-4/NA 2016 január
Román EC	CR 1-1-4/2012 SR EN 1991-1-4
Szlovák EC	EC 1991-1-4:2005 CSN EN 1991-1-4/NA 2013 július
Lengyel EC	EC 1991-1-4:2005 PN EN 1991-1-4/NA 2008 október
Dán EC	EC 1991-1-4:2005 DS/EN 1991-1-4 DK NA 2015 július
Finn EC	EN 1991-1-4:2005 SFS-EN 1991-1-4/NA 2007 november
Norvég EC	EN 1991-1-4:2005 SN-EN 1991-1-4/NA 2009
Görög EC	EN 1991-1-4:2005 ELOT EN 1991-1-4
Svájci	SIA261:2020 Einwirkungen auf Tragwerke SIA261/1:2003 Ergänzende Festlegungen

1.2. Az OpenFOAM bemutatása

Az OpenFOAM (Open Field Operation and Manipulation) egy ingyenes, nyílt forráskódú C++ nyelvű eszköztár, amely egyedi numerikus megoldók, valamint pre- és postprocessing segédprogramok fejlesztésére szolgál kontinuummechanikai problémák megoldásához, ideértve kémiai reakcióktól és turbulenciával és hőátvitellel járó összetett folyadékáramlásoktól kezdve az akusztikáig, szilárdtest mechanikáig és elektromágneses áramlásokig. A szoftvert 2004 óta elsősorban az OpenCFD Ltd. fejleszti. Nagy felhasználói bázisa van a mérnöki és tudományos élet legtöbb területén, mind kereskedelmi, mind tudományos szervezetek részéről.

Az OpenFOAM®-ról további információkért látogasson el a <https://www.openfoam.com> oldalra.

A szoftver alkalmazásáról tájékozódjon a következő oldalon:
<https://www.openfoam.com/documentation/user-guide>.

További információkat találhat a következő weboldalon: <https://www.cfdsupport.com>

1.3. Licenc

Az OpenFOAM®-t a GNU GPLv3 licenc alatt terjesztik, ennek megfelelően az alkalmazott szoftver forráskódját az AxisVM X7/CFD/src mappában találhatja a felhasználó. A modul egyfajta interface-t biztosít az AxisVM, illetve OpenFOAM szoftverek közt, az OpenFOAM forráskódját semmilyen szinten nem módosítva.

*Védjegyjogi
nyilatkozat:*

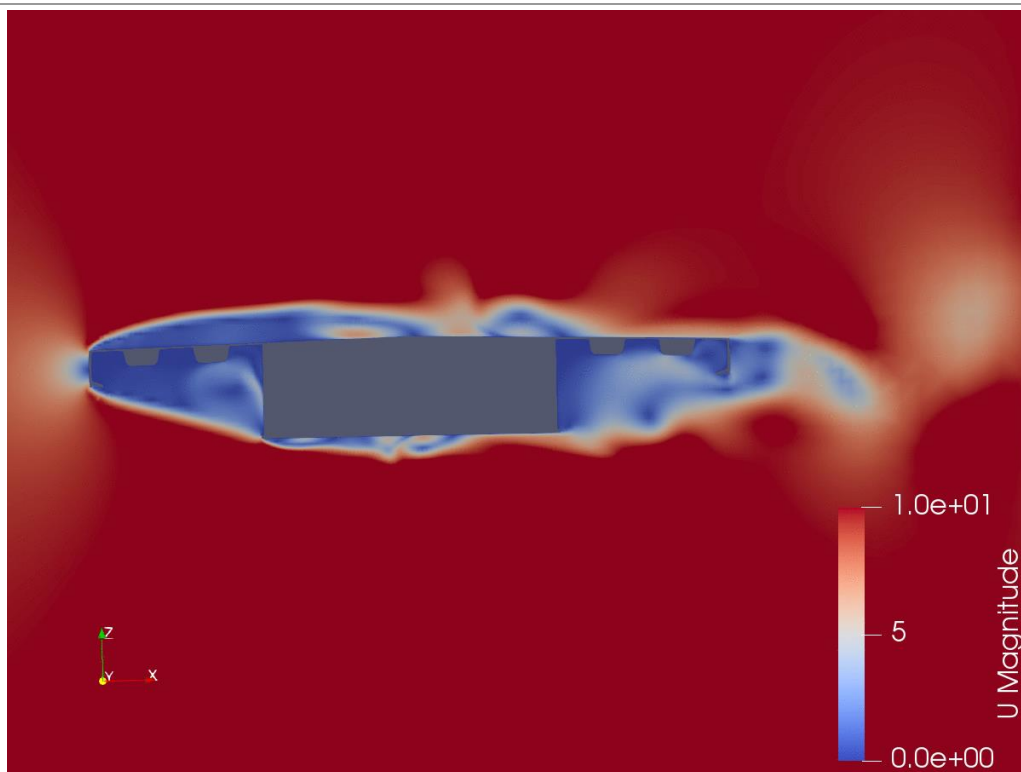
Ezt az ajánlatot az OpenCFD Limited, az OpenFOAM® gyártója és forgalmazója nem hagyta jóvá és nem támogatja.

1.4. A modul korlátai

A WIND modul állandósult áramlást határoz meg, és a következő megkötésekkel él:

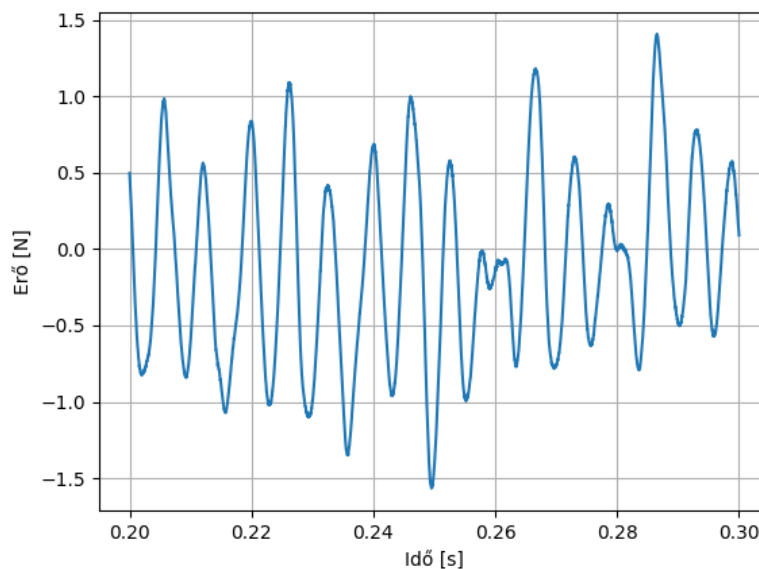
- egy szélirányhoz egy statikus terhelési eset tartozik.
- A modul a c_{pe} értékének meghatározásában nyújt segítséget, a c_{pi} értékének meghatározása bár elvi akadályokba nem ütközik, annak meghatározása nem képezi jelen dokumentáció tárgyát.
- Azon esetekben, mikor a turbulenciának számottevő hatása van a nyomáseloszlásra, az számottevően változik az időben, pl Kármán-féle örvényleválás (lásd lentebb) a kapott eredmények szignifikáns mértékben eltérhetnek a valós nyomáseloszlástól.
- Az örvényleválás következményeként az abból származó fáradási tönkremenetel vizsgálatára a modul nem alkalmas.
- A szerkezet tökéletesen merev testként viselkedik az áramlástani szimuláció során, tehát a modul nem alkalmas a megváltozott alak okozta nyomáseloszlás változásból származó hatások figyelembevételére (lásd lentebb).
- A fenti miatt a modul nem alkalmas aeroelasztikus instabilitás vizsgálatára, úgymint például táncolás, divergencia, belebegés. Amennyiben a szerkezet alacsony merevsége folytán instabilitással számolni kell, kérje ki szakértő véleményét.
- A jegesedés következtében létrejövő változását a szerkezeti alaknak a modul nem veszi figyelembe.
- A modul sima felületként modellezi a szerkezet burkolófelületét.

Kármán-féle
örvényleválás
hídpálya
környezetében
(Lengyel és Pál,
2022)



A fenti animáción látható, hogy a sebességmező időfüggő, az örvények periodikusan válnak le a hídpálya mögött, ezáltal a szerkezetre működő nyomás eloszlás nem stationer. Amennyiben a nyomás lengő része (lásd lentebb) számottevő az állandósult nyomás értékéhez képest az állandósult áramlás szimulációja nem konvergál.

A fenti
keresztmetszetre
ható emelőerő idő
függvényében
(Lengyel és Pál,
2022)



Ezen teher lengésből néhány esetben fáradási tönkremenetel származhat, mely vizsgálatára a modul nem alkalmas, kérje ki szakértő véleményét.

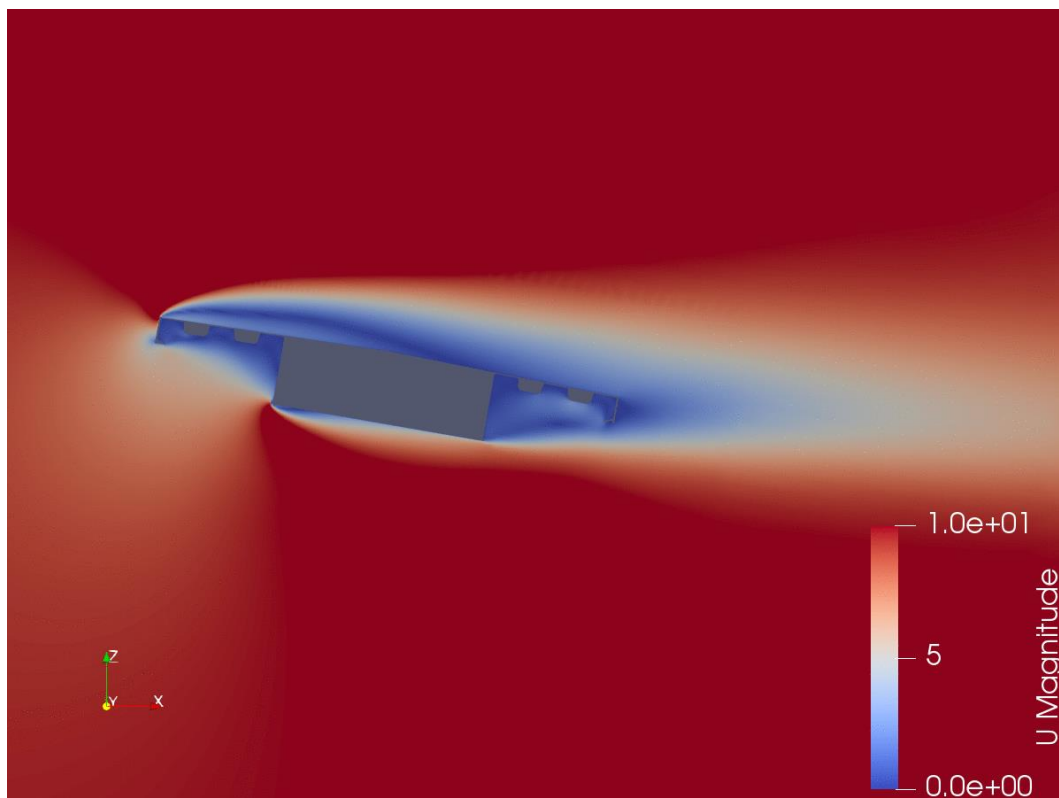


Amennyiben a WIND modul futása során azt tapasztalja, hogy a szerkezetre ható eredőerő periodikusan változik az iteráció során feltehető, hogy örvényleválás jelensége áll fenn.

Alapvetően lágy, alacsony szerkezeti csillapítással rendelkező szerkezet típusokra jellemző, hogy szél hatására valamilyen aerodinamikai instabilitási forma lép fel. Áramlásba helyezett rugalmas szerkezet csillapítása adódik a saját szerkezeti csillapításából, illetve az úgynevezett aerodinamikai csillapításból. A szerkezeti csillapítással ellentétben az aerodinamikai csillapítás negatív értékkel is bírhat. Amennyiben a két csillapítás együttesen negatívvá válik, a szerkezeti válasz Lyapunov exponensének valós része pozitív lesz, aerodinamikai stabilitásvesztés következik be. Ez gyakorlati értelemben annyit jelent, hogy a szerkezet, időben folyamatosan növekvő amplitúdó mellett tönkremegy.

Mivel az aerodinamikai csillapítás meghatározása érdekében szükség van a szerkezet mozgásából származó visszacsatolás meghatározására, ezért ezen jelenség vizsgálatára a WIND modul nem alkalmas.

*Hídpálya rotációjának
hatására változó
sebességmező
(Lengyel és Pál, 2022)*



2. ELMÉLETI HÁTTÉR

2.1. Állandósult áramlás

Az áramlástani problémák többféleképpen csoportosíthatóak. Az egyik ilyen megközelítés az időbeliség kérdése. Az időfüggés szerint megkülönböztethetünk állandósult, illetve időfüggő áramlást (szokás még kvázi-állandósult áramlásról is beszélni). A két megközelítés egymástól nem egyértelműen elválasztható, példaképpen gondoljunk egy folyó áramlására, mely távolról nézve állandósultnak hat, azonban közelebbről nézve, például a hídfők környezetében időbeliséget mutat.

*Matematikai
megfogalmazás*

A Navier-Stokes egyenletek rövid jelöléssel:

$$\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \nu \nabla^2 \mathbf{u},$$

ahol

- $\mathbf{u} = \mathbf{u}(x, y, z, t)$, térbeli, időfüggő sebességmező.
- $(\dot{\cdot}) = \frac{\partial(\cdot)}{\partial t}$, azaz idő szerinti parciális derivált,
- ∇ a nabla operátor: $\nabla(\cdot) = \begin{bmatrix} \frac{\partial(\cdot)}{\partial x} \\ \frac{\partial(\cdot)}{\partial y} \\ \frac{\partial(\cdot)}{\partial z} \end{bmatrix}$,
- ν : kinematikus viszkozitás.

Abban az esetben beszélünk állandósult áramlásról, amennyiben a $\dot{\mathbf{u}} = \mathbf{0}$, azaz $\mathbf{u} = \text{konst.}$, $p = \text{konst.}$

Alapvetően megfogalmazható, hogy amennyiben mindegyik mezőváltozó időszerinti parciális deriváltja nulla, állandósult áramlásról beszélünk.

Turbulencia

A turbulens áramlás szigorúan véve tranzienst áramlás, mivel a turbulens ingadozások statisztikailag szabálytalan, időfüggő jelenségek. A turbulens áramlás azonban elfogadható pontossággal állandósult áramlásként kezelhető, ha a sebesség, nyomás stb. időátlagolt értékeit vesszük figyelembe.

2.2. SimpleFOAM

A SimpleFoam egy állandósult áramlásra alkalmazott megoldó összenyomhatatlan, turbulens áramláshoz, amely a SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) algoritmust használja. A megoldó szekvenciális megoldási stratégiát alkalmaz. A rendszert jellemző egyes változók (a sebesség, a nyomás és a turbulenciát jellemző változók) egyenleteit egymás után oldja meg, és az előző egyenletek megoldását a következő egyenletbe helyettesíti.

Relaxáció

Az OpenFOAM az iterációk során relaxációs technikát alkalmaz melyek a lényege a következő: egy n -edik lépésben egy változó értéke a következőképpen határozható meg:

$$Q^n = Q^0 + \alpha(Q - Q^0)$$

ahol Q^0 a kezdeti megoldás, Q az aktuális megoldás, α a relaxáció mértéke. Amennyiben a relaxáció mértéke 1.0, nincs relaxáció, mindig az aktuális megoldással kezdődik a következő lépés. Amennyiben 0.0 a relaxáció mértéke, a megoldás minden lépésben Q^0 . Leegyszerűsítve megfogalmazható, hogy amennyiben a relaxáció mértéke alacsony a megoldás konvergenciája stabil, de lassú, míg magas relaxáció esetén a megoldás gyors, viszont könnyen instabillá válhat.

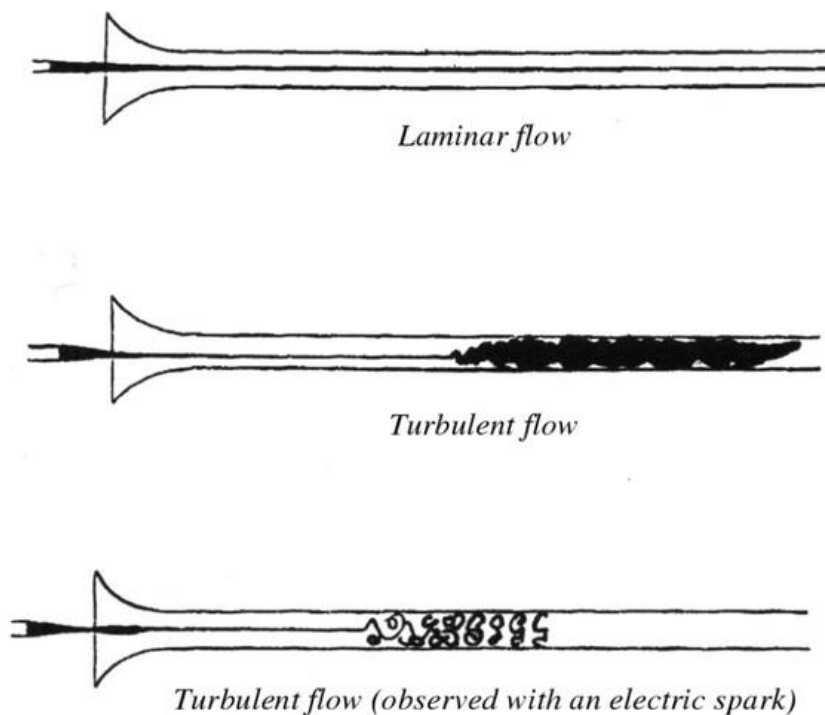
2.3. Turbulenciamodellek

2.3.1. Bevezetés

Amennyiben a folyadék, vagy gáz párhuzamos rétegekben áramlik, rétegek között "zavar", keveredés nincs, lamináris áramlásról beszélünk. Amennyiben a rétegek között keveredés jön létre, turbulens az áramlás. Az ilyen áramlást, a nyomás és az áramlási sebesség kaotikus változása jellemez.

Áramlások
szemléltetése
(Reynolds, 1883)

Osborne Reynolds a jól ismert kísérlete alapján a következőképpen szemléltette a kétféle áramlást:



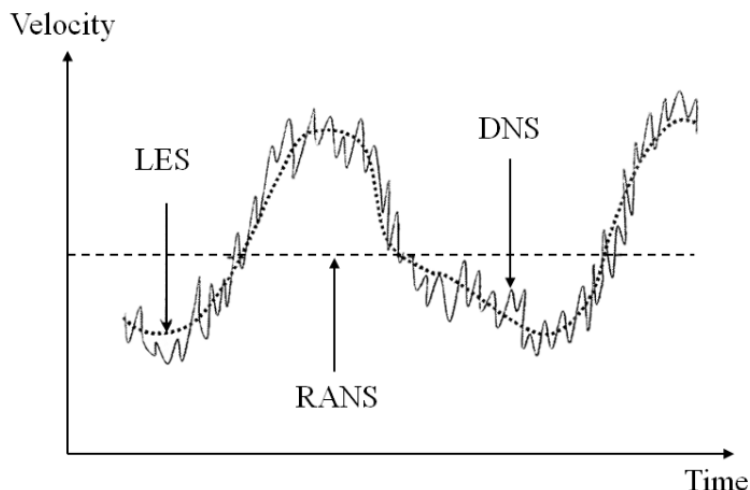
Mivel a mérnöki áramlások többnyire turbulens jellegűek, amikor CFD-szimulációkkal foglalkozunk, legtöbbször turbulens áramlásokat kell megoldanunk. A turbulencia modellezése a CFD analízis egyik legfontosabb része, és a turbulencia helyes modellezése kulcsfontosságú a helyes és megbízható CFD eredmények eléréséhez.

- DNS** Az áramlástani szimuláció során a valóság megfelelő közelítéséhez a kisméretű örvényeket is számítani kell, mivel az energia disszipációja a kisméretű örvények skáláján történik. Ezen mérettartomány annyira alacsony, hogy hatalmas cellaszámot eredményező modelleket eredményez. Ezen szimulációkat **DNS**-nek, hosszabban "Direct Numerical Simulation"-nak hívják, és csak alapkutatásokban alkalmazták ez idáig, mert a személyi számítógépek teljesítménye nem elegendő ezen modellezések elvégzésére.
- LES** A gyakorlati vizsgálatokra alkalmasabb modell a **LES**, azaz "Large Eddy Simulation". A modell elkülöníti a kis és nagyméretű örvényeket, a nagyobb örvényeket nem csillapítja, míg a kisebbeket az örvény viszkozitás csillapítja. Ezen modell hátránya, hogy bár kevésbé finom háló is elegendő, mint a DNS szimuláció esetében, de a gyakorlati számítások esetében még mindig igen finom hálózásra van szükség.
- RANS** A gyakorlati számítások esetében legelterjedtebb módszer a **RANS** (Reynolds Averaged Navier-Stokes). Ezen módszer esetében már a közepes örvények tartományát is modellezni szükséges, ennek eredményeképpen ebben az esetben van szüksége a legkevésbé finom háló alkalmazására.

☞ **RANS kizárólag állandósult áramlások vizsgálatára alkalmas!**

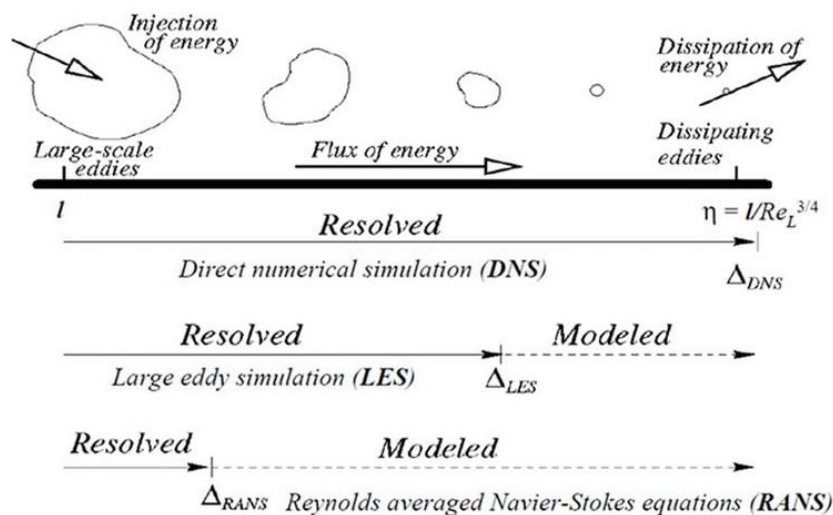
Összefoglalva a fentieket, megállapítható, hogy a RANS technika állandósult megoldást eredményez, a LES időben simított megoldást ad, míg a legáltalánosabb, minden időtartományra kiterjedő eredményt a DNS szolgáltat:

Sebesség az idő
függvényében
különböző
módszerek esetén
(Andersson és tsai,
2011)



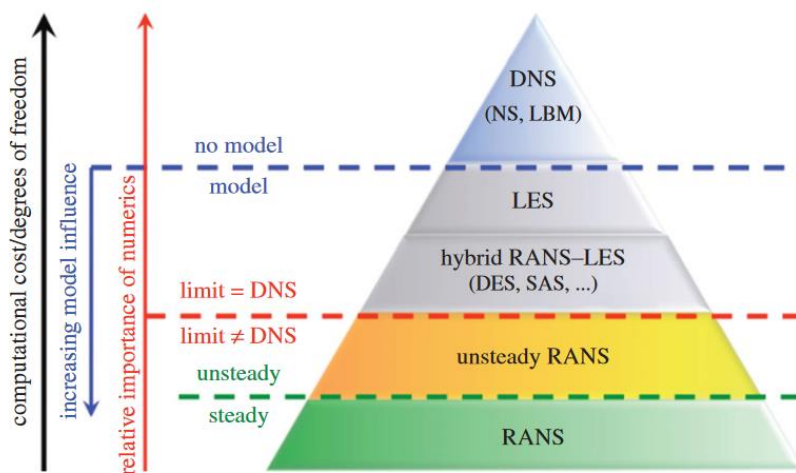
Nemcsak időben, de térben a megoldott/modellezett örvények mérete szerint is elkülöníthetők a bemutatott eljárások:

Módszerek
összehasonlítása a
megoldott és
modellezett
örvények
tartományának
függvényében
(André Bakker,
2011)



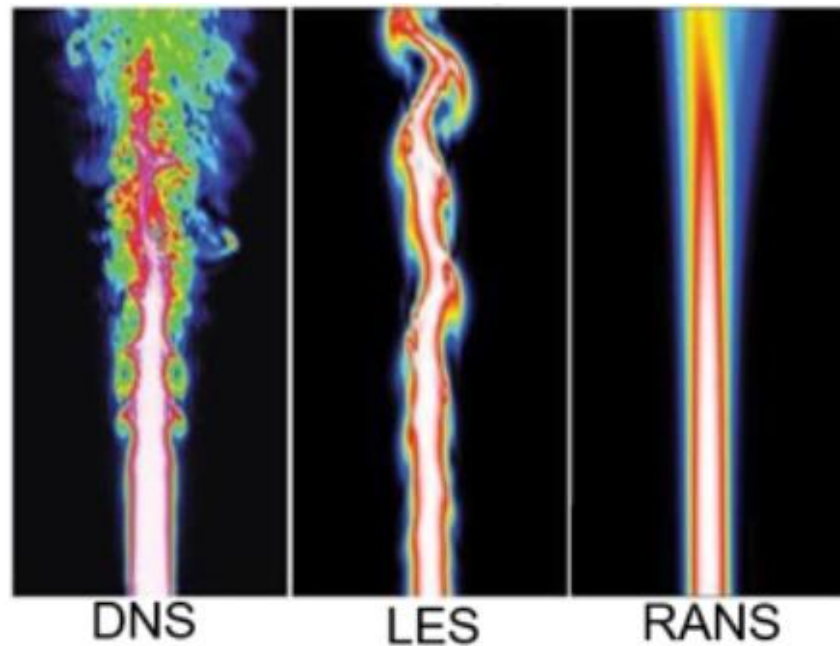
Látható, hogy a 3-féle szimuláció (DNS, LES, RANS) milyen mérettartományt old meg közvetlen, és melyet modellezi. A DNS a teljes mérettartományt közvetlen oldja meg, míg a RANS "nagyobb részét" modellezi, míg az igen nagy örvényeket közvetlen oldja meg.

Eljárások
osztályozása
modellezési szint
szerint
(Deck és tsai,
2014)



A következő szemléletes ábrákon látható, hogy a 3 szimulációs technika mely mérettartományokat oldja meg, és melyeket közelíti.

*Eljárások
összehasonlítása
(Comparison of a
DNS, LES and
RANS. (2006).
Italian National
Agency for New
Energy
Technologies,
Energy and
Sustainable
Economic
Development.)*



A fentiek alapján kijelenthető, hogy a gyakorlati számítások szempontjából legkézenfekvőbb módszer a RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) szimuláció, melyet a WIND modul is alkalmaz.

2.3.2. RANS

A Navier-Stokes-egyenletekre átlagolási műveletet lehet alkalmazni, hogy megkapjuk a folyadékáramlás átlagos egyenleteit, az úgynevezett Reynolds Averaged Navier-Stokes (RANS) egyenleteket. Ezen megoldás keretében a megoldás ingadozó részét nem számítjuk, egy bizonyos időintervallumra átlagoljuk a mennyiségeket.

Az átlagolt egyenletek nagyon hasonlóak az eredeti egyenletekhez, de tartalmaznak néhány további kifejezést az impulzusegyenletekben, az úgynevezett Reynolds-feszültségi kifejezéseket, amelyek ismeretlenek, és amelyeket modellezni kell.

RANS esetén a közepes és kis örvények tartományát modellezni szükséges, mivel az energia disszipációja ezen tartományban megy végbe. A disszipáció modellezésére bevezették a kísérleti tapasztalatokon alapuló turbulens viszkozitást. A WIND modulba kizárólag, úgynevezett kétegyenletes modell került implementálásra, tehát a Navier Stokes egyenleteken felül további két egyenlet kerül felírásra a turbulencia modellezése érdekében.

2.3.3. k-ε modellek

A WIND modulban a k-ε model családból a *standard*, illetve a *realizable* k-ε modelleket lehet választani.

Az alapértelmezett turbulenciamodell a k-ε.

A kétegyenletes modellek első változata, mely a nagy Reynolds-számú modellek családjába tartozik (Caretto és tsai, 1972). Az első változó a turbulens kinetikus energia (k), a második változó ebben az esetben a turbulens energia disszipáció (ϵ). Ez a változó határozza meg a turbulencia méretarányát, míg az első változó, a turbulenciában lévő kinetikus energiát határozza meg.

A standard k-ε modell az egyik legelterjedtebb turbulencia-modell, bár nagy, kedvezőtlen nyomásgradiensek esetén nem teljesít jól. Ez egy két egyenletből álló modell, azaz két extra transzportegyenletet tartalmaz az áramlás turbulens tulajdonságainak ábrázolására. Ez lehetővé teszi, hogy a két egyenletből álló modell olyan előzményhatásokat is figyelembe vegyen, mint a konvekció és a turbulens energia diffúziója.

A realizable k-ε (T.-H. Shih és tsai., 1995) kedvezőtlen nyomásgradiensek, cirkulációk esetén ad jobb eredményeket.

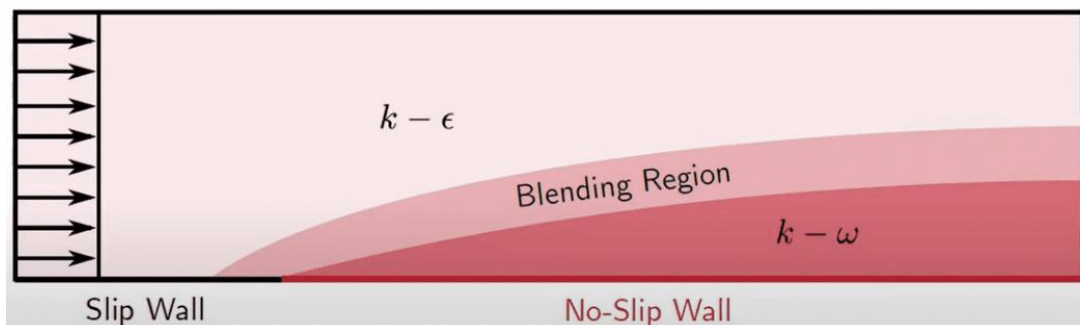
2.3.4. k-ω modellek

A WIND modulban a k-ω model családból a *standard*, illetve a *SST* k-ω modelleket lehet választani.

A standard k-ω modell egy empirikus modell, amely a kinetikus energia (k), illetve örvénnyfrekvencia (ω) transzportegyenletein alapul (Wilcox, 1988). Az alacsony Reynolds-számú modellek családjába tartozik.

Az SST k-ω turbulencia modell (Menter 1993) egy két egyenletből álló örvény-viszkozitási modell, amely nagyon népszerűvé vált. A nyírófeszültség-transzport (SST) formulája két világ legjobb tulajdonságait ötvözi. A k-ω formuláció használata a határréteg belső részeiben közvetlenül használhatóvá teszi a modellt egészen a falig a viszkózus alrétegen keresztül, így az SST k-ω modell extra csillapítási függvények nélkül használható alacsony-Re turbulencia modellként. Az SST-formuláció a szabad áramlásban átvált k-ε viselkedésre, és ezáltal elkerüli azt a gyakori k-ω problémát, hogy a modell túl érzékeny a belépő szabad áramlás turbulenciatulajdonságaira. Az SST k-ω modellt használó szerzők véleménye szerint a modell érdeme, hogy kedvezőtlen nyomásgradiensek és elválasztó áramlás esetén is jól viselkedik. Az SST k-ω modell túl nagy turbulenciaszinteket produkál a nagy nyomófeszültségű tartományokban, mint például a stagnálási régiókban és az erős gyorsulású régiókban.

SST k-ω működése
(forrás:
simscale.com)



A k-ε modell a szabad áramlás tartományában ad jó eredményeket, a k-ω modell pedig a falhoz közeli határréteg tartományába. E két turbulenciamodell előnyeit egy keverési függvény (tangens hiperbolikus) segítségével kombinálhatjuk.

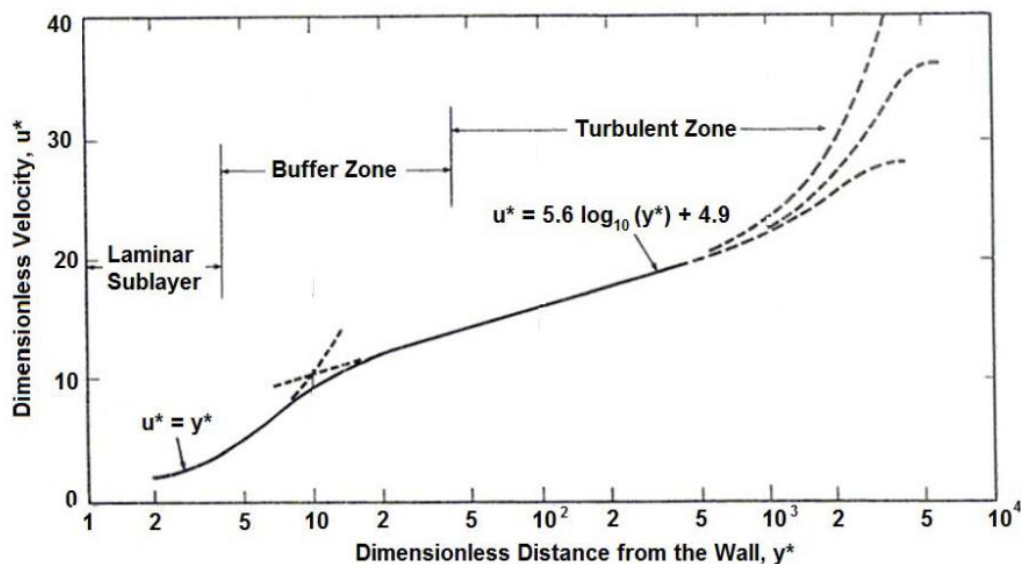
A k-ω modell egyik hátránya a k , ω és ϵ szabad áramlási értékekre való érzékenysége. A k-ε turbulenciamodell ezzel szemben nem ilyen érzékeny. Az SST k-ω modell a két világ előnyeit ötvözi.

2.3.5. Falfüggvények

Azon határoló felületeket, melyek környezetében a sebességmező gyorsan változik, falnak tekintjük. A turbulencia modellezése során nagyon fontos a fal hatásának pontos figyelembevétele, mivel a fal környezetében a turbulens kinetikus energia (k) nagy, ezért a testre, esetünkben az a szerkezetre ható áramlási erőket alapvetően meghatározza.

Mivel a falnál az áramlási sebesség nulla, ezért a fal közvetlen környezetében lamináris rétegnek kell kialakulnia. Ezt követi egy átmeneti zóna, majd a turbulens réteg.

Falfüggvény
(forrás: caltech)



Vízszintes tengelyen a dimenziótlan faltávolság, a függőleges tengelyen a dimenziótlan áramlási sebesség látható. A falhoz közel ($y^+ < 5$) esetében a kapcsolat lineáris, míg nagyobb értéknél ($30 < y^+ < 300$) az összefüggés logaritmikus.

Rétegek

Lamináris	$y^+ < 5$
Átmeneti	$5 < y^+ < 30$
Turbulens	$y^+ > 30$

Falfüggvények szempontjából megkülönböztethetünk alacsony Reynolds-számú, illetve magas Reynolds-számú modelleket. A k - ϵ modell tipikusan magas Reynolds-számú modell, míg a k - ω alacsony Reynolds-számú modell. Alacsony Reynolds-számú modell esetén nincs szükség falfüggvényre, azonban nagyon finom hálózás szükséges a fal környezetében.

Alacsony Reynolds-számú modellek esetén sincs meggátolva a falfüggvények alkalmazása. Az OpenFOAM-ban alkalmazott omegaWallFunction képes kezelni mind a fal melletti lamináris áramlást (sűrű hálózás), mind pedig a turbulens áramlást (durva háló). A két réteg közötti átmeneti zónában az ω értékét interpolálja az algoritmus. Ezzel ellentétben k - ϵ esetében az alkalmazott epsilonWallFunction eljárás feltételezi, hogy az első cella a turbulens zónába esik, tehát a túl finom háló k - ϵ modell esetén még ronthat is a számítás pontosságán.

3. SZÉLTEHER

3.1. Bevezetés

Szélrózsák A szimulált szélterhek teheresetei mindig ugyanabba a tehercsoportba kerülnek, és egymást kizáróak. A széltehereseteket úgynevezett szélrózsákban lehet megadni. Egy szélrózsába (pl. $w1$) azonos szélprofillal, de különböző szélirányokkal megadott teheresetek tartoznak (pl. $w1-0^\circ$, $w1-90^\circ$, $w1-180^\circ$, $w1-270^\circ$). A felvehető szélrózsák száma nincs korlátozva.

3.2. Általános paraméterek

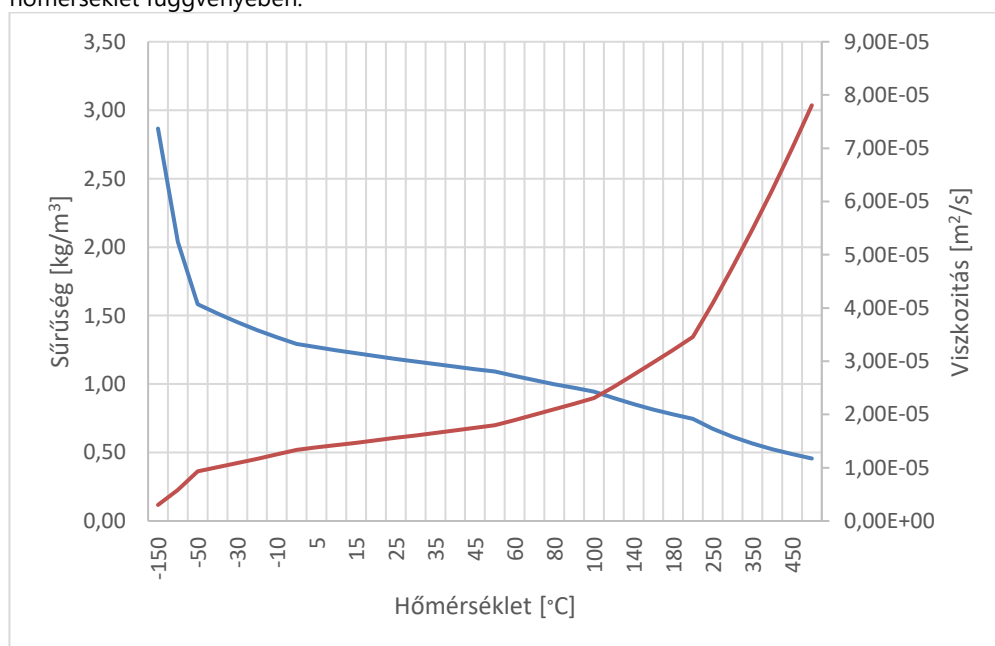
3.2.1. Terep

Z_0 Terepszint a modell globális koordináta rendszerében. A számítás során a modellt ezen magasság mentén egy vízszintes síkkal elmetsszük, és csak a sík feletti részt helyezzük szélcsatornába.

 **A modul nem veszi figyelembe a terepmodellt!**

3.2.2. Levegő

A levegő, mint áramló közeg paramétereit kell megadnunk. Sűrűség, illetve kinematikus viszkozitás a hőmérséklet függvényében:



A WIND modulban az Eurocode szerinti alapértéket vesszük fel, azaz $\sim 15^\circ\text{C}$ -hoz tartozó értéket, mégpedig: $\rho = 1.25 \text{ kg/m}^3$ sűrűséget, illetve $\nu = 15 \text{ mm}^2/\text{s}$ kinematikus viszkozitást.

3.3. Szélprofil

3.3.1. Szabvány szerinti szélprofil

Beépítettségi kategória	A beépítettségi kategória segítségével meghatározható a környezet okozta sűrűdési ellenállás.
Turbulencia intenzitás, I [%]	Turbulencia intenzitás leírja a szélsébség ingadozásának mértékét az átlagértékhez relatív módon.

Turbulencia mértéke	Reynolds-szám	Turbulencia intenzitás, I [%]
Nagyon alacsony	$Re < 3000$	0.05-1%
Alacsony	$3000 < Re < 5000$	1%
Közepes	$5000 < Re < 15000$	1-5%
Magas	$15000 < Re < 100000$	5-20%



v_{b0}	A szélsébség kiindulási alapértéke
c_{dir}	Íránytényező
c_{season}	Évszaktényező
c_0	Domborzati tényező
k_l	Örvénylési tényező
$c_s c_d$	Szerkezeti tényező

☞ **A szerkezeti tényező nem jelenik meg közvetlen az aerodinamikai szimulációban. A szerkezeti tényezővel CFD szimulációból származó statikus terheket módosítjuk.**

☞ **A szélprofil a megfelelő nemzeti melléklet szerint határozza meg a WIND modul.**



q_{p0}	Torlónyomás referenciaértéke.
☞	A szélsébséget a torlónyomásból a következő összefüggés szerint számítjuk:

$$v = \sqrt{\frac{2q}{\rho}}$$

3.3.2. Egyedi szélprofil

Egyedi szélprofil esetén magasság-szélsébség-turbulencia intenzitás ponthármasokkal definiálhatjuk a szélterhet a magasság mentén.

☞ **Kizárólag pozitív szélsébség, illetve turbulencia adható meg.**

☞ **Egyedi szélprofil esetén könnyen kialakulhat nem, vagy csak lassan konvergáló áramlási megoldás, így amennyire lehet ezen megadási módot kerüljük.**

3.4. Szélirányok

Minden szög a modell globális X koordinátájától való szögeltérést írja le az XY síkon.

Egyenletes kiosztás φ_1 és φ_0 között egyenletesen N irány kerül kiosztásra.

Egyedi irányok Pontosvesszővel elválasztva tetszőleges irányok adhatóak hozzá a listához.

☞ **Egy irány hozzáadása csak abban az esetben jár sikerrel, ha az az irány nem szerepelt előzőleg a listában.**

4. SZÁMÍTÁS

4.1. Számítási paraméterek

4.1.1. Paraméterek megadásának módja

A felhasználó választhat *egyszerű*, vagy *részletes* megadási módok közül. Egyszerű megadási mód esetén a felhasználó egy csúszkát mozgatva tudja a CFD paramétereket egységesen állítani.

☞ **Egyszerű megadási mód elegendő olyan esetekben, mikor a vizsgálandó geometria részletessége nem számottevő, a szél támadta elemek jellemzően felületek, teherpanelek.**

Hálósűrűség Egy csúszka segítségével a hálózasi paraméterek egyidejűleg módosíthatóak.

Iterációk maximális száma Leállás feltétel, amennyiben az iterációs szám eléri ezt, az analízis érvénytelen eredménnyel leáll.

Leállási feltétel, nyomás reziduális A nyomásra vonatkozó egyenletben a hibára vonatkozó leállási feltétel, ezt elérve a számítás érvényes eredménnyel leáll.

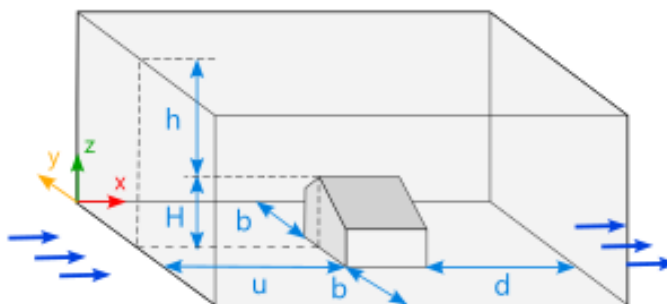
☞ **Amennyiben a szimuláció során azt tapasztaljuk, hogy bár a megoldás konvergál, azonban az aerodinamikai erők még változást mutatnak, érdemes a leállási feltételen szigorítani.**

4.1.2. Modellparaméterek megadása

4.1.2.1. Áramlástanai modelltér

Számítási modelltér arányai Számos cikk foglalkozik az optimális szélcsatorna mérettel. Természetesen a szélcsatorna méretének növelése javít a számítás pontosságán, azonban a számítási időn ront, ezáltal fontos megkeresni azon optimumot, mely esetében a számítás erőforrásigénye még elfogadható, és az eredmények pontossága is megfelelő.

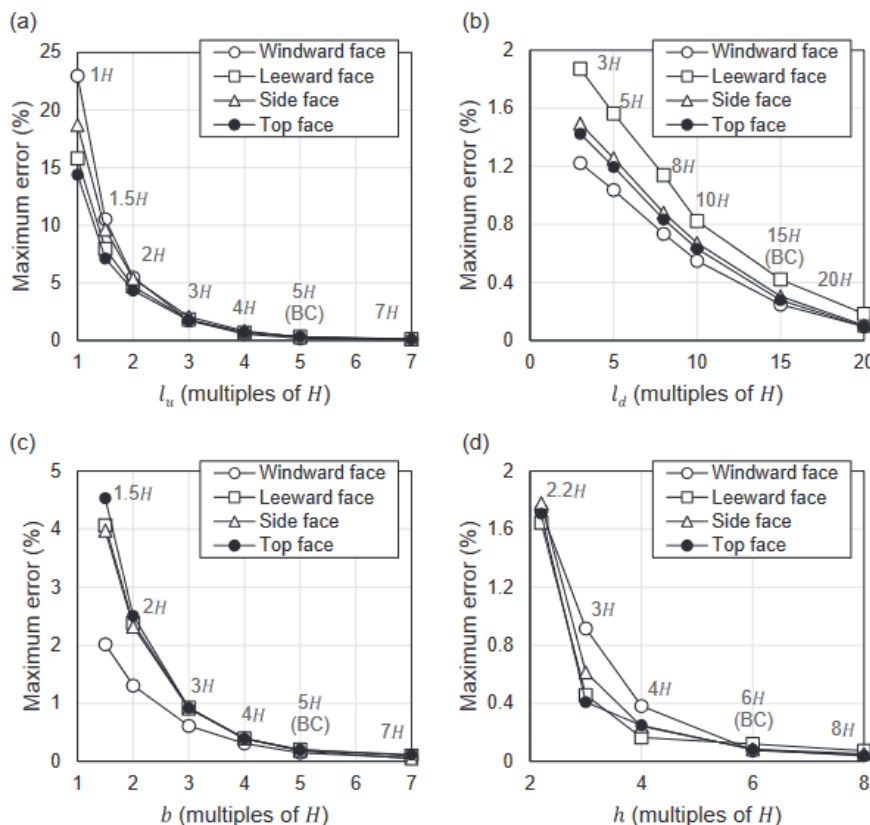
☞ **Kis méretű számítási tartomány alkalmazása esetén a peremek visszahatnak a vizsgált szerkezetre, hibát okozva a nyomásmezőben. Egy lehetséges hiba lehet, hogy amennyiben a szélcsatorna fala túl közel kerül a vizsgálandó szerkezethez, az áramlás a valóságosnál nagyobb mértékben felgyorsul, így a szélszívás számottevően megnőhet.**



A tartomány kiterjedését a szerkezet magasságának arányában adhatjuk meg. Az objektum előtt a szélcsatorna mérete u , mellette b , utána d , míg felette h .

☞ **Alacsony és széles szerkezetek esetén a fenti, magasságtól függő megadási mód nem a legmegfelelőbb. Ekkor ügyeljünk arra, hogy az úgynevezett blockage ratio (a szerkezet vetületi területe az inletre, illetve az inlet felületének a hányadosa) ne haladja meg a 3%-ot. Inlet az $x=0$ felület, ahol az áramló közeg belép a szélcsatornába.**

A számítási
modell tér
méretéből
származó
numerikus hibák
(Yousef Abu-Zidan
és társai, 2021)



Franke és társai munkája alapján a következő, a fenti ábra (BC) esetével egyező méreteket tekintjük a modulban alapértelmezettnek:

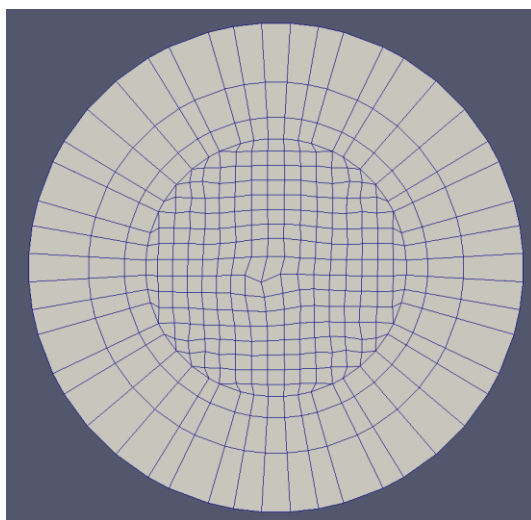
Alapértelmezett
szélcsatorna
méretek

u 5* H
 b 5* H
 h 5* H
 d 15* H

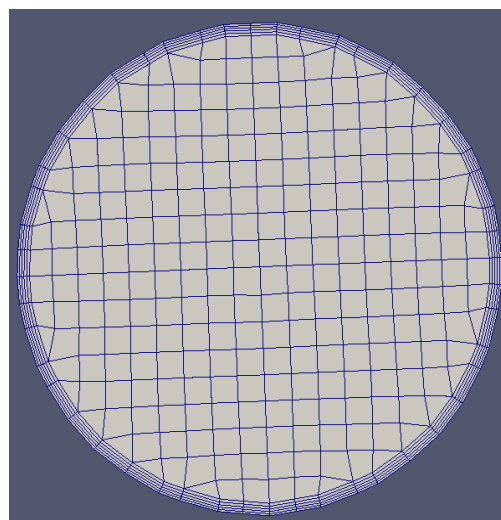
☞ **Az említett cikkekben a magassági dimenzió a tereptől van mérve, míg esetünkben a szerkezet felső pontjától, ez magyarázat az ezen paraméterben tapasztalható eltérésre.**

Méretarány Számos cikk foglalkozik a redukált CFD modell lehetőségével (Ai, Mak, 2014). Az előnye ezen modelleknek, hogy számottevően csökkenthető a háló finomsága. Ennek oka, hogy az y^+ , mely a sebesség változását mutatja a falak menti első cellában, számottevően kisebb a redukált modellek esetében. Az alacsonyabb y^+ értékű háló jellemzően pontosabban írja le a falak környezetének viselkedését, lásd lentebb.

Fal menti háló
finomsága (forrás:
simscale.com)



$y^+ \approx 30$



$y^+ \approx 1$

- ☞ **Nagyon fontos azonban, hogy a modell átskálázását csak Reynolds-szám független szerkezetek esetén szabad alkalmazni, ezért CFD modellezésben kevésbé jártas felhasználók esetén feltétlen maradjunk a valós méretarány mellett!**

4.1.2.2. Szerkezetmodellezési beállítások

Exportált elemek Kiválasztható, hogy mely elemeket vizsgálja az eljárás az áramlástani szimulációban. A számítás elvégezhető kizárólag az aktív részletben szereplő elemekre, ezáltal az áramlástani szempontból jelentőséggel nem bíró elemek kihagyhatóak, hogy célszerűen kihagyandóak a számításból.

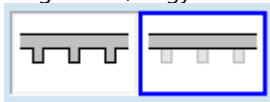
Teherpanelek A teherpanelek a statikai számítások során vastagsággal nem rendelkező elemek. Áramlástani szimulációban azonban minden elemnek kell lennie háromirányú kiterjedésének. A vastagsággal ezen kiterjedést tudjuk állítani. Ezen vastagságnak akkor van jelentősége, amennyiben a teherpanelnek van szabadon álló tartománya.

Találkozó elemek összemetszése Elemek szögtörései környezetében kialakuló nyílások hálózási nehézségeket okozhatnak, melyet az összemetszés bekapcsolása esetén egyszerűbb esetekben megszüntethetünk.

Szelvények Rúdelemek egyes esetekben számottevő számítási időnövekménnyel járnak. Ez megkerülhető oly módon, hogy a keresztmetszetet egyszerűsítjük, például a befoglaló méretével modellezzük.



Sűrűbordás födémek Megadható, hogy kizárólag a tartományt, vagy a bordákat is modellezni kívánjuk.



- ☞ **Törekedjünk a lehető legegyszerűbb geometriai modell vizsgálatára. Olyan elemeket, melyeknek az áramlásban nincs számottevő szerepük ne vegyünk figyelembe, hiszen az feleslegesen megnöveli a számítási időt. Például az esetek nagy részében, ha teherpanellel burkolt a modell, elegendő a panelt figyelembe venni, a további elemek exportálására nincs szükség.**

- ☞ **Statikai terhek kizárólag az exportált elemekre redukálódnak.**

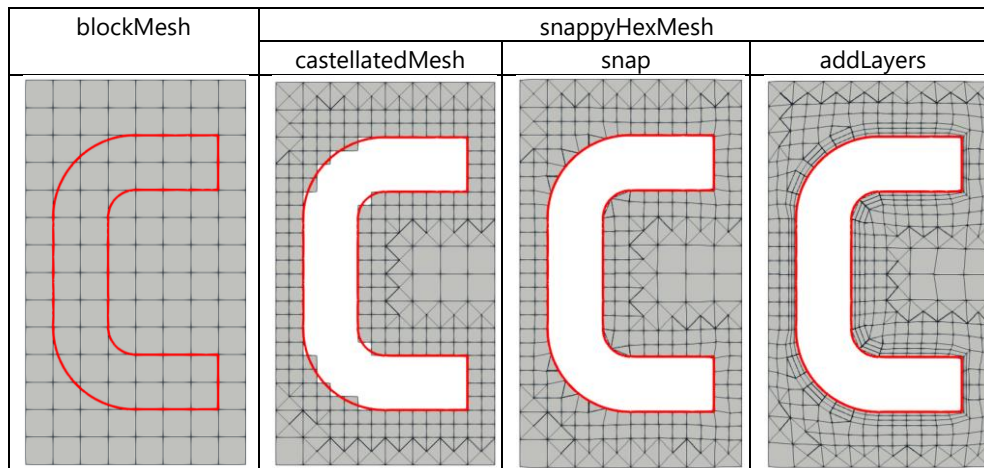
- ☞ **A számítás szempontjából a legnagyobb nehézséget a vékonyfalú szelvények modellezése jelenti. Általánosságban megállapítható, hogy a háló élének minimális mérete kisebb kell legyen, mint a modellezni kívánt szerkezeti elemek minimális szélessége. Ez vastag szerkezeti elemek esetén nem jelent nagyobb problémát, azonban néhány milliméteres falvastagságnál nagyon megnöveli a számítási időt. Ekkor célszerű lehet a keresztmetszetet a befoglaló téglalappal modellezni.**

4.1.3. Hálópáraméterek megadása

4.1.3.1. Bevezetés

Elsőként bemutatjuk a hálózás legfőbb lépéseit. Kezdetben létrehozunk egy alaphálót (továbbiakban *blockMesh*), majd ezen hálóból az objektumot "kivágjuk" (lásd *castellatedMesh*). Az így kapott "érdes" felületet oly módon deformáljuk, hogy a perempontok objektum felületére kerüljenek (lásd *snap*). Végül a fal környezetében további rétegeket helyezünk el (lásd *addLayers*), melyekre a sebesség gyors változása miatt van szükség (lásd y^+ , fentebb).

Hálózási
munkafolyamatok
(forrás:
CFDsupport)



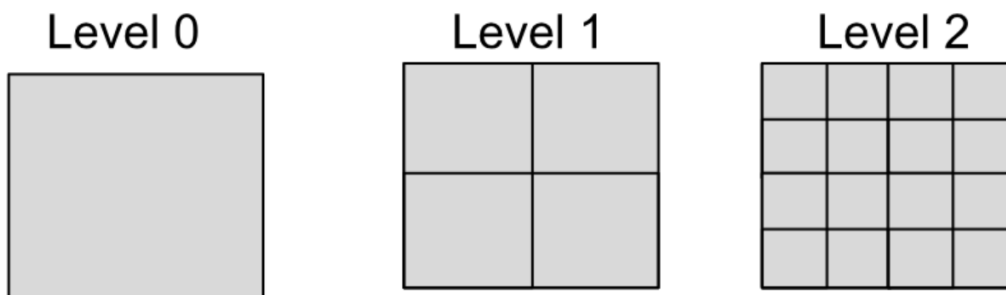
4.1.3.2. blockMesh

A hálózás első lépése az úgynevezett *blockMesh* létrehozása. Ezt tekinthetjük egyfajta alaphálónak, amely kizárólag a szélcsatorna téglatestjét hálózza. A szoftverben megadott *Hálóméret* ehhez a hálózathoz tartozik.

4.1.3.3. snappyHexMesh

A hálózás második lépése az áramlásban elhelyezkedő test figyelembevétele. Ezen eljárást *snappyHexMesh*-nek hívjuk, és ez a hálózási munkafolyamat legrobosztusabb része. Annak érdekében, hogy értelmezzük az itt látható paramétereket, definiálnunk kell az OpenFOAM hálózás során alkalmazott "level" fogalmat.

"Szintek", levelek
értelmezése
(forrás:
CFDsupport)



Értelemszerűen egy téglatest (továbbiakban cella) "n" szintig való felosztása 2^{3n} új cellát eredményez.

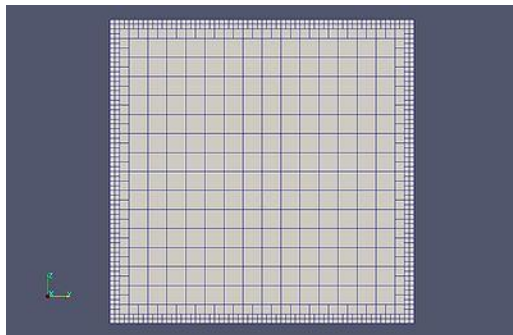
Hálósűrítés

A program a szerkezet befoglaló téglatestje közelében két lépésben sűríti az alaphálót. Először felméri az u , d , b , h értékek 20%-át, és ezen belül a minimális, majd az u , d , b , h értékek 10%-án belül a maximális hálósűrítést alkalmazza. A sűrítésre azért van szükség, hogy a sebesség gyors változásának tartományában is pontosan kövessük az alapvető változók viselkedését.

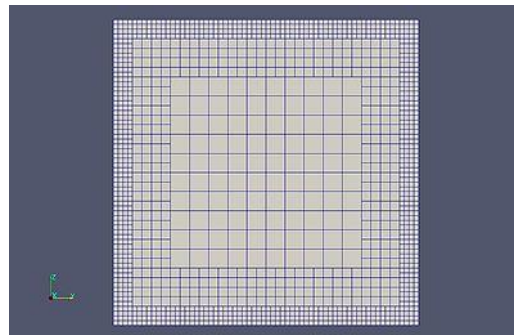
Szintek közötti
cellák száma

A felbontásváltozások között legalább ennyi réteg cellát használ egy adott finomítási szinten.

Szintek közötti
cellák száma
(forrás:
OpenFOAM)



1

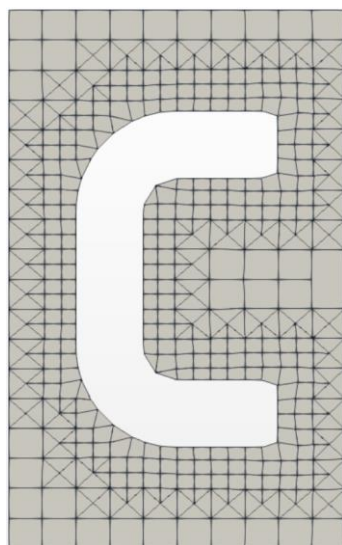


4

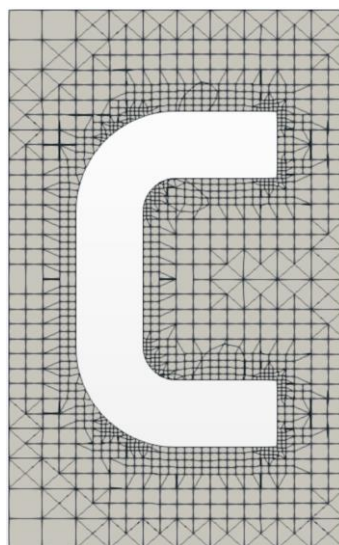
Minimális/
maximális felületi
hálósűrítés

OpenFOAM egy számpárossal írja le a felületek környezetében a cellasűrítés mértékét.

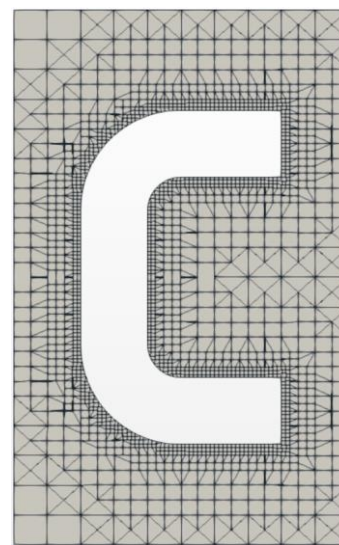
Felületi hálósűrítés
különböző (min-
max) szintek
esetén (forrás:
CFDsupport)



(1-1)



(1-3)



(3-3)

Határrétegek
száma

A falak (testek), illetve terep környezetében a sebességmező gradiense nagyon magas, ezáltal ezen felületek környezetében a hálót további rétegek beszúrásával célszerű sűríteni. A fentebb is bemutatott *addLayers* eljárás a határcellákat osztja oly módon, hogy a felületek normálisának irányában csökkenti a cellák méretét, így javítva a fal környezetében a megoldás pontosságán.

4.1.4. Megoldásvezérlés

Turbulencia-
modellek

A felhasználó legördülő menüből választhatja ki az alkalmazni kívánt turbulencia modellt.



Az alapértelmezett turbulenciamodell a $k-\epsilon$, lásd fentebb.

Megoldásvezérlés

További leállás feltételek adhatóak meg a sebességmezőre, illetve a turbulenciaparaméterekre.



Abban az esetben érdemes további konvergencia kritériumot megadni, ha azt tapasztaljuk, hogy bár a nyomás reziduális eléri a megkívánt határértéket, de a szélerők továbbra is meredeken változnak az iterációs lépések során.

4.1.5. Generált szélteher

Szélteher Ezen paraméterrel tudjuk a szélteher eloszlásának finomságát állítani. Közelítésként ajánljuk, hogy a szerkezeti modellben alkalmazott hálónál elegendő kb. 1 nagyságrenddel nagyobb hálóméretet alkalmazni.

☞ **Ennek a hálónak az alapértelmezett mérete 2 m.**

4.2. Peremfeltételek

Inlet Az $x=0$ felületet, ahol az áramló közeg belép a szélcsatornába inletnek hívjuk. Ezen peremen megadjuk az inlet peremfeltételeket, azaz a magasságfüggő sebességprofil, illetve turbulencia feltételeket.

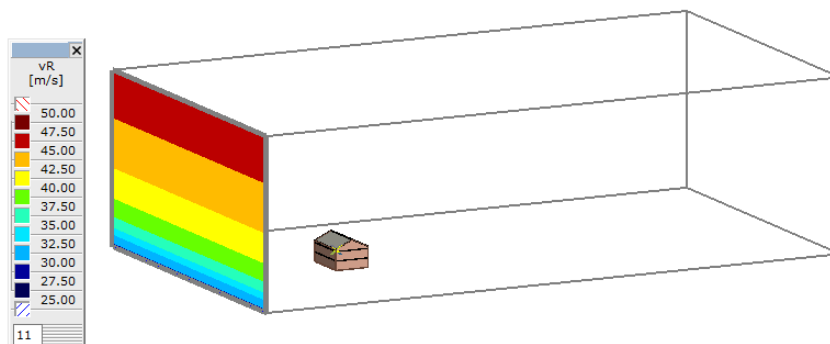
Sebesség inlet $U(z)$ kerül definiálásra, lásd fentebb.

Turbulens kinetikus energia Definíció szerint: $k(z) = \frac{3}{2} (U(z) \cdot I(z))^2$

ε Mivel három inlet paraméter szükséges, azonban kizárólag két adatot határoz meg a felhasználó, a harmadik paramétert egyéb megfontolás alapján határozzuk meg. Az úgynevezett turbulent length scale-t szakirodalmi adatok alapján közelítjük.

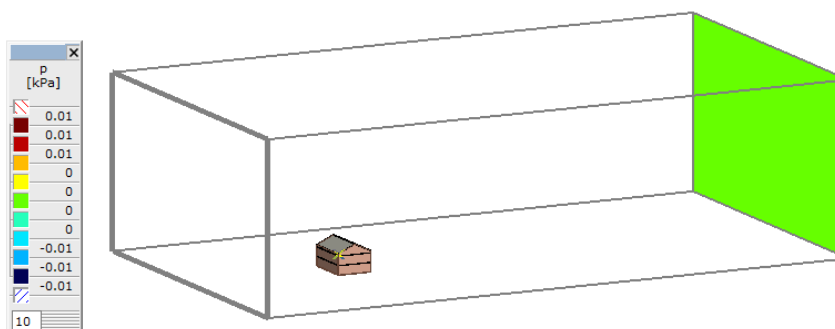
ω Definíció szerint adódik a fenti paraméterekből: $\omega(z) = \frac{1}{C_\mu} \frac{\varepsilon(z)}{k(z)}$, ahol $C_\mu = 0.09$.

Szabványos
sebességprofil az
inlet-en



Outlet Az inlet-tel párhuzamos perem, ahol az áramlás kilép a szélcsatornából. A nyomás növekménye az atmoszferikus nyomáshoz képest 0 értékű ezen a peremen. Ezen feltétel azt írja le, hogy az outlet felületén a nyomásmező nem különbözik a zavartalan áramlásban tapasztalt nyomástól.

Zérus pressure
outlet



Oldalsó és zárófelület Az áramlással párhuzamos két oldallap, illetve a szélcsatornát lezáró felületeken slip feltételt írunk elő, tehát a nyírófeszültségek zérusértékűek.

Terep Az áramlással párhuzamos negyedik felületen zérus sebességet írunk elő, úgynevezett no-slip peremfeltételt.

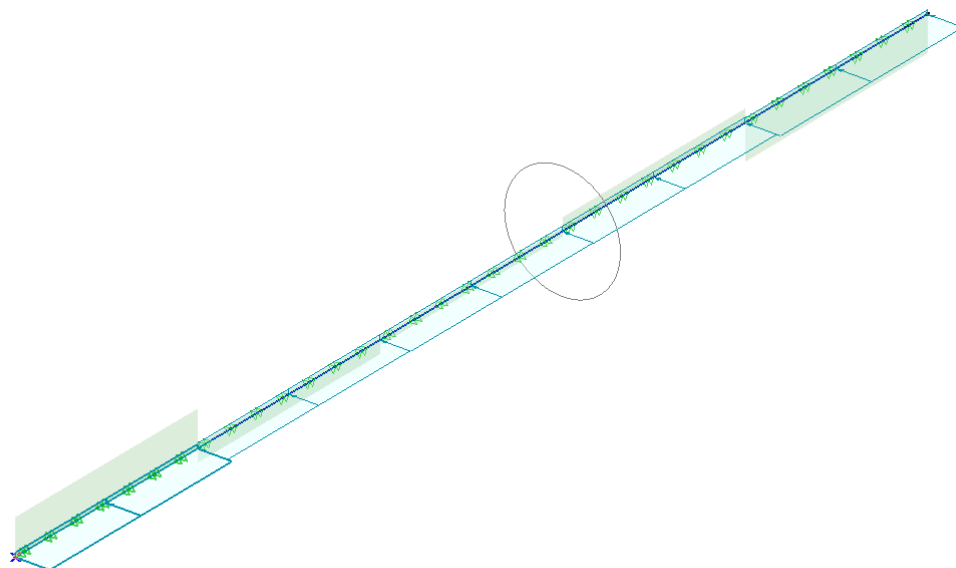
Szerkezet A szerkezet felületén szintén zérus sebességet írunk elő, azaz no-slip peremfeltételt.

☞ **A no-slip peremfeltételek, tehát a terep és a szerkezet esetén úgynevezett falfüggvények kerülnek előírásra.**

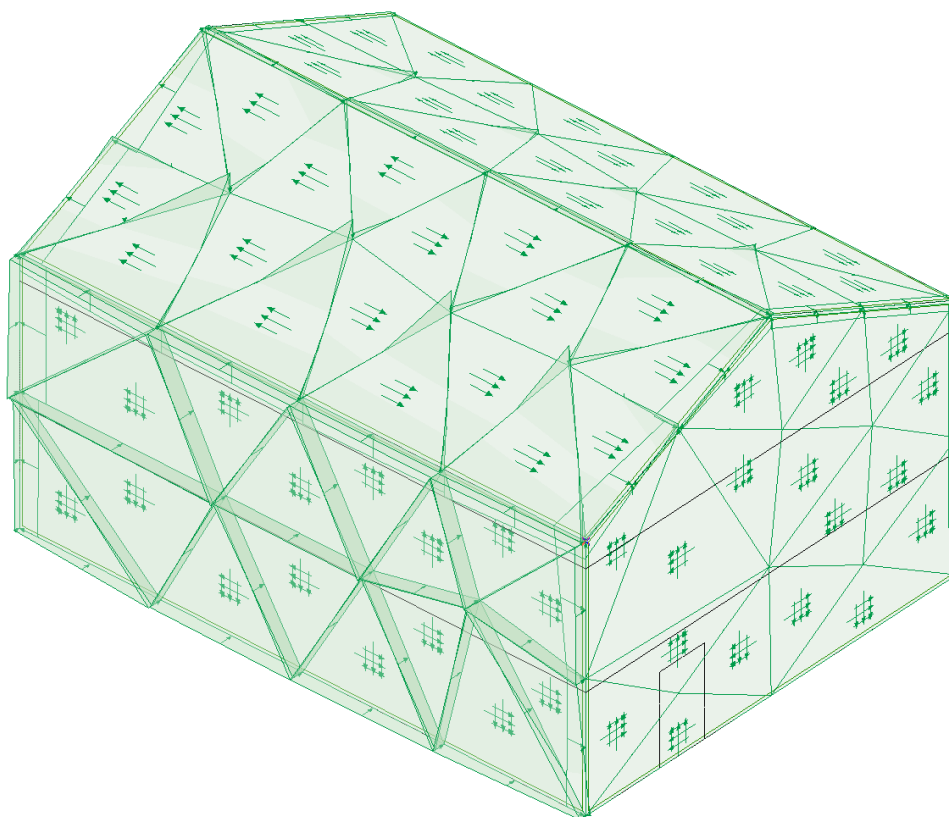
4.3. AxisVM terhek generálása

Elsőként meghatározzuk, hogy mely OpenFOAM cella, mely szerkezeti elemet terheli. A terhelt szerkezeti elemekhez a modul úgynevezett teherhálót rendel. A teherháló tartomány, illetve vonalmenti esetekben a következő két ábrán látható:

*Tetherháló:
vonalmonti háló
CFD terhek esetén
(hálófüggetlen)*



*Tetherháló:
háromszögháló
felületi CFD terhek
esetén
(hálófüggetlen)*



☞ **A fenti hálók finomsága a szélteher hálóméretének segítségével állítható (lásd fentebb).**

5. Eredmények

5.1. CFD teheresetek

Tehereset választása A legördülő menüből meghatározható, hogy mely teheresethez tartozó eredményeket kívánjuk megtekinteni. Ezen listába kizárólag a konvergens eredmények kerülnek, tehát amennyiben az analízis nem konvergált a tehereset eredményei nem lekérdezhetők.

5.2. Eredménykomponensek

Nyomás (p, strP) A nyomáseredmények megtekinthetők az adott hálón (lásd lentebb).

 **A nyomásértékek szélszívás esetén negatívak, míg nyomás esetén pozitívak.**

Nyomástényező, c_{pe} A WIND modulban a nyomástényezőt a következőképpen definiáljuk:

$$c_{pe} = \frac{p}{\frac{1}{2} \rho v^2(z)}$$

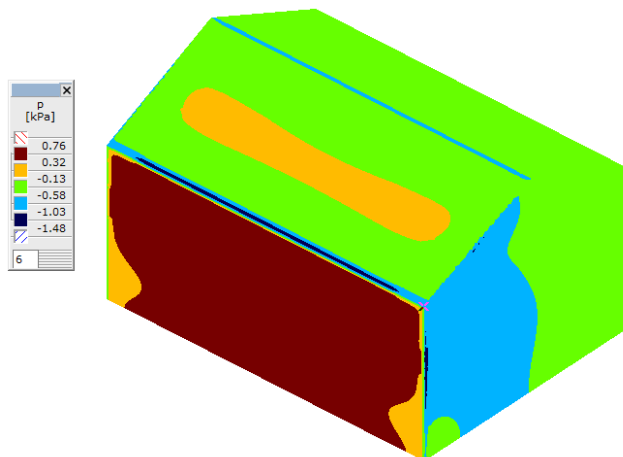
tehát az adott pontbeli nyomás, illetve az adott pont magasságára vonatkozó torlónyomás (dinamikus nyomás) hányadosa.

Sebesség (vx, vy, vz, vR, strV) A szélcsatornára illeszkedő lokális irányokban értelmezett szélsébségek, illetve az eredő szélsébség kérdezhető le.

 **A szerkezet burkoló felületén a sebességmező azonosan nulla (noslip feltétel), így az nem kerül ábrázolásra.**

5.3. Eredményábrázolás

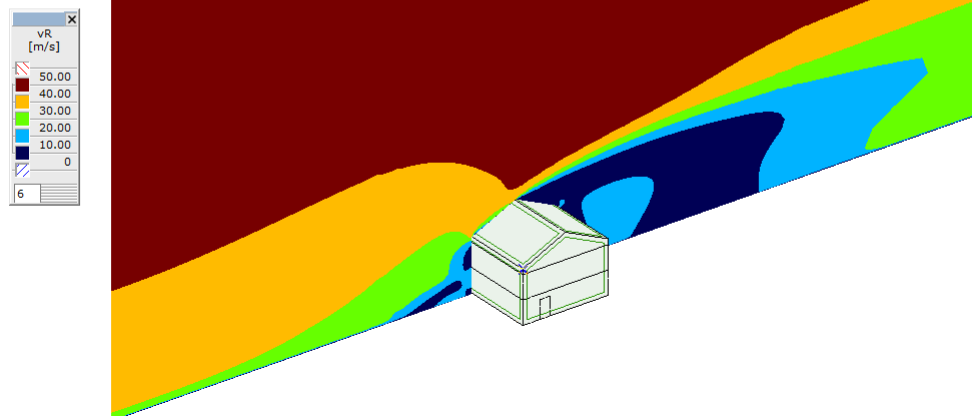
Szerkezet burkolófelülete A nyomáseredmények, illetve nyomástényezők megjeleníthetők a szerkezeti modell burkolófelületén.



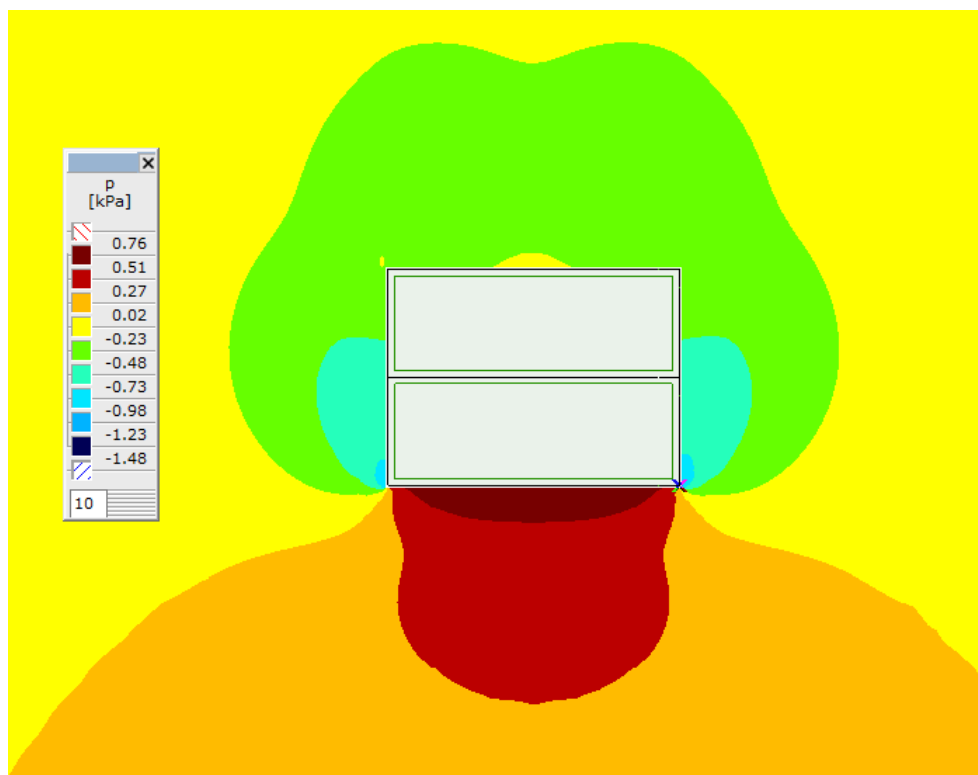
Metszősíkok Metszősíkok létrehozása után a testháló elmetszését követően ábrázolhatjuk a metszeten a mezőváltozók, úgymint nyomás, sebesség eredményeit.

Szkenner A szélteher lokális irányaiiban meghatározhatóak interaktív metszetek, melyeken a mezőváltozók eredményei ábrázolhatóak.

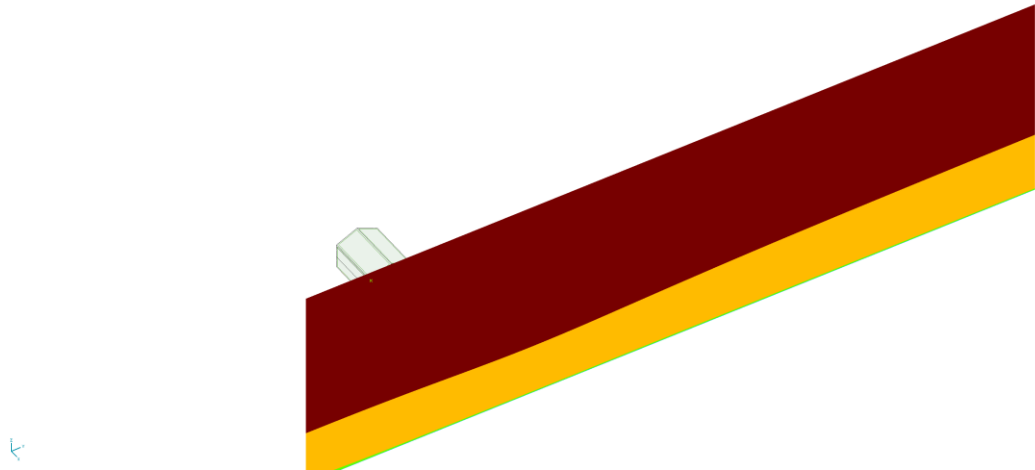
Szélesség y
normálisú
metszeten



Szélnyomás z
normálisú
metszeten



Szélesség y
normálisú
metszeten
(animáció)



Áramvonalak Az áramvonalak pontjait a következő időintegrálás segítségével tudjuk számítani:

$$\mathbf{r}(t) = \int_{\tau=0}^t \mathbf{v}(\mathbf{r}(\tau)) d\tau.$$

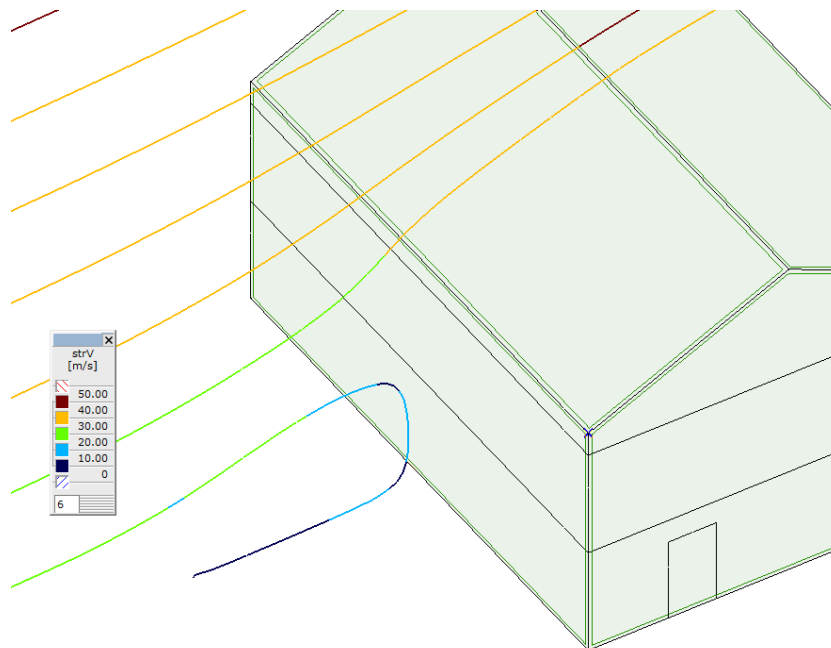
Annak érdekében, hogy a fenti integrál egyértelműen számítható legyen kezdőpontokat kell meghatároznunk, melyekből az áramvonalak kiindulnak. Ezen kezdőpontokat az áramvonalak megadásához szükséges formon tudjuk definiálni.

Elrendezés Megadható, hogy a kezdőpontok vízszintes, vagy függőleges egyenes mentén kerülnek kiosztásra.

Pozíció Relatív, vagy abszolút értelemben megadható a pontok helyzete. Függőleges kezdőpontok esetén vízszintes pozíció, míg vízszintes kiosztás esetén függőleges pozíció.

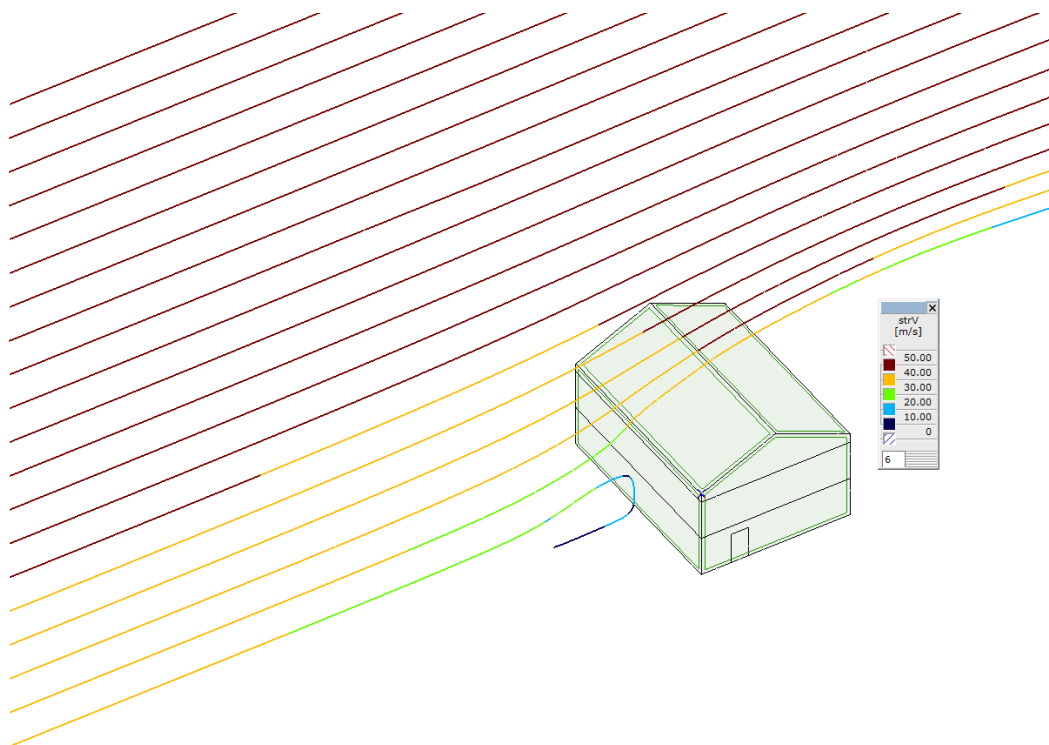
Kiindulópontok száma Megadható a kiindulópontok száma, mellyel az áramvonalak sűrűsége állítható.

☞ **Az áramvonalakat mind a sebesség, mind a nyomásértékek alapján van lehetőség színezn.**

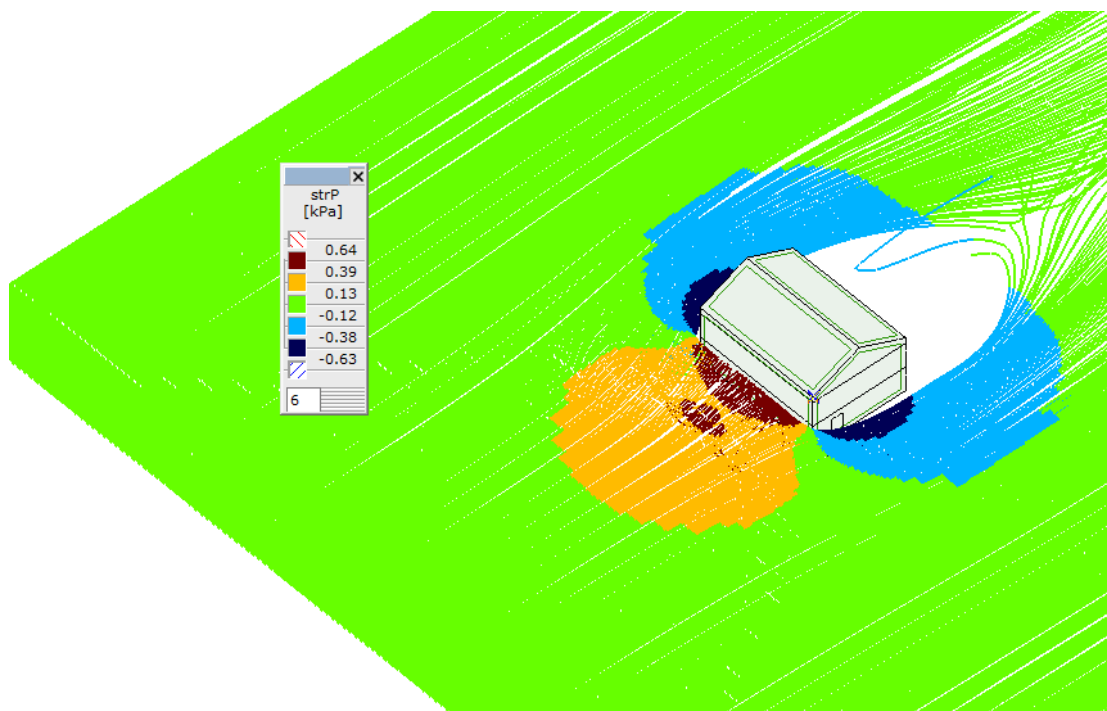


☞ **Amennyiben az időintegrálás során az áramvonal egy pontján a szélesség egy bizonyos érték alá esik, az áramvonal megszakad.**

Függőleges
kiosztású
áramvonalak, 20
kiindulópont

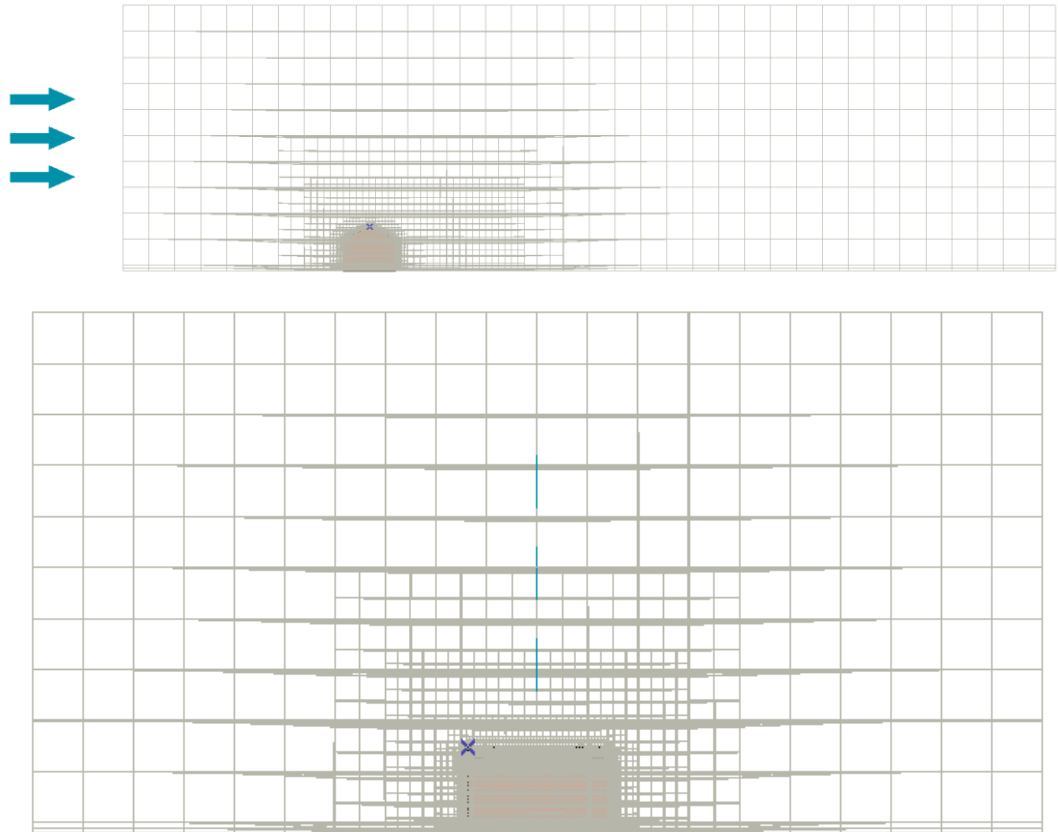


Vízszintes
kiosztású
áramvonalak, 500
kiindulópont



5.4. Hálóábrázolás

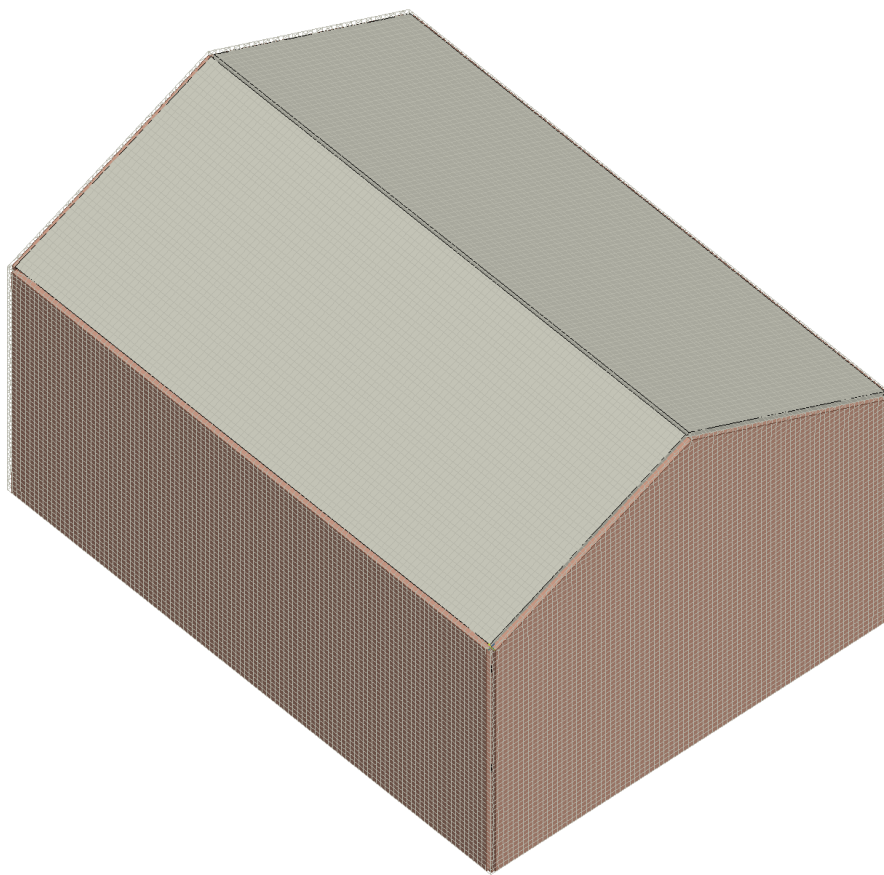
Áramlási modell testhálóját
A testelemeket tudjuk ezáltal ábrázolni:



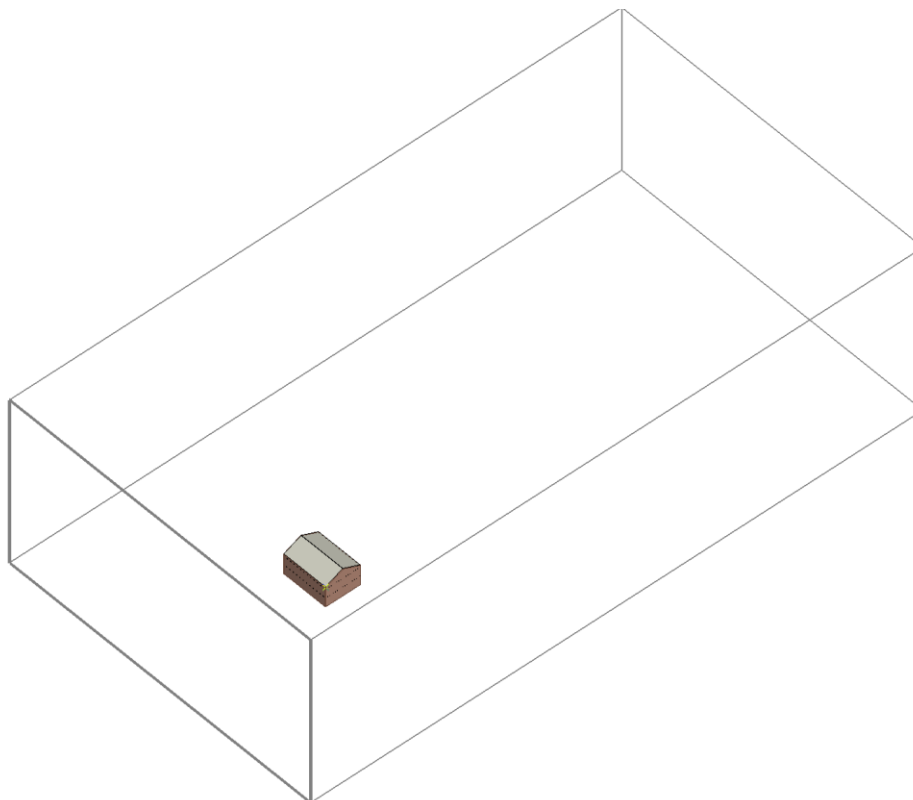
Szélcsatorna A szélcsatorna oldallapjainak felületi hálóját ábrázolja:



Az áramlási modell felületi hálóját
A szerkezet modelljének burkoló, felületi hálóját:



Áramlási modell tér
A szélcsatorna oldallapjait ábrázolja, a háló élek nélkül:

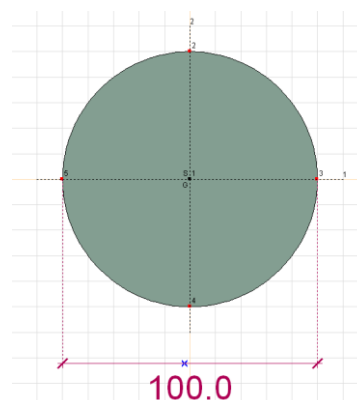


6. Verifikációs példák

6.1. Körhenger

Modellfile WIND_cylinder.axs

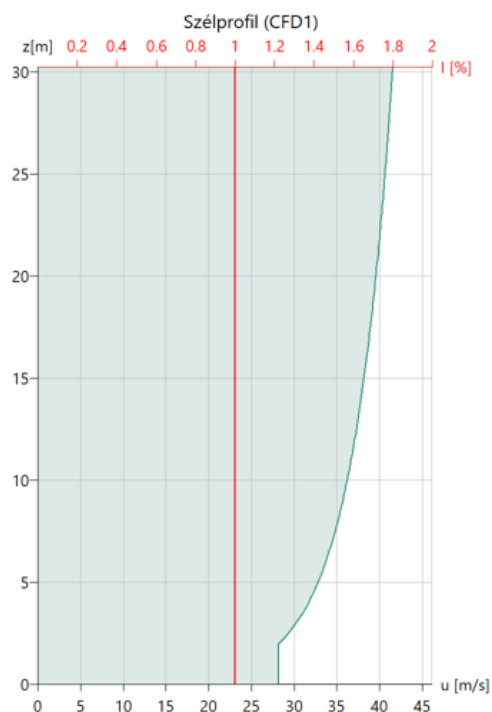
Vizsgált
rúdmodell,
keresztmetszet



10 m hosszúságú 1 m átmérőjű tömör csőszelvény, 5 m magasságban

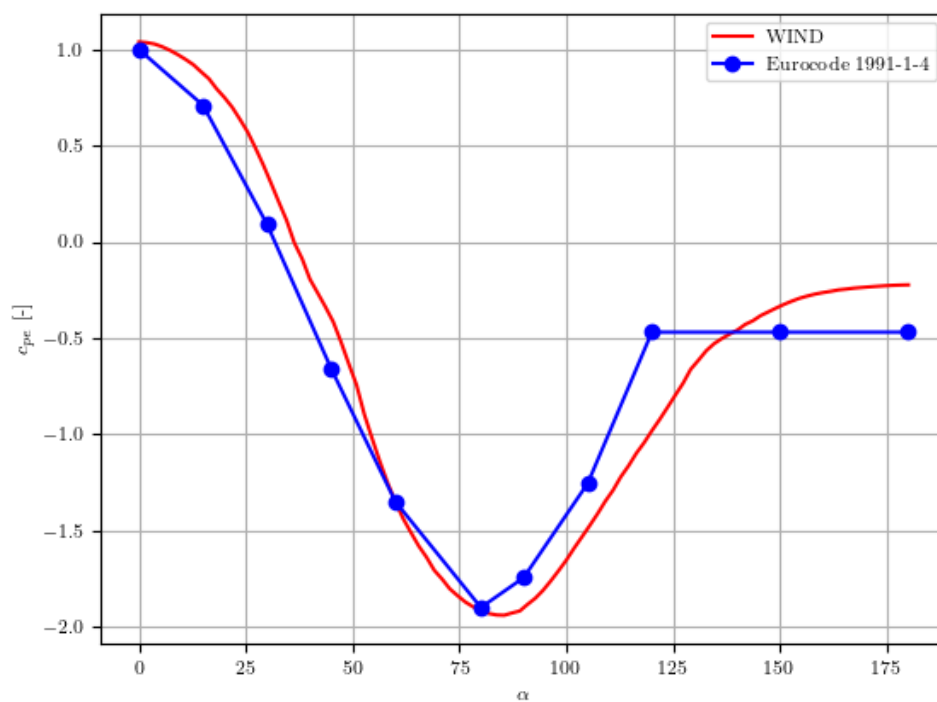
Szélprofil

Profil típusa: Szabványos
 Szabvány: Eurocode
 Terep, Z_0 : 0 m
 Beépítettség kategória II
 Sűrűség, ρ 1.25 kg/m³
 Kinematikus viszkozitás, ν 15 mm²/s
 V_{b0} 23.6 m/s
 C_{dir} , C_{season} , C_0 , C_s , C_d 1.0
 Turbulencia intenzitás 1 %



Turbulencia modell $k-\epsilon$

Eredmények A nyomástényező értéke a hengerpálást mentén:

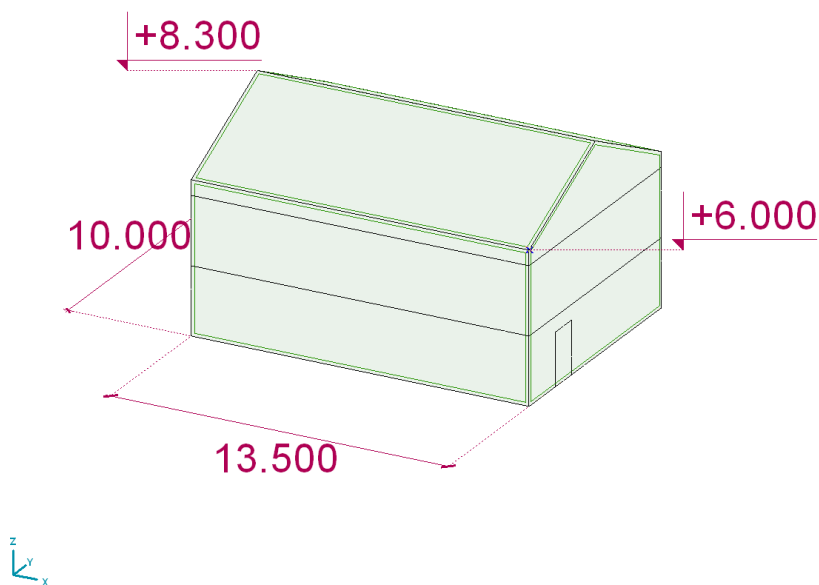


A numerikus és szabványban közölt eredmények jó egyezést mutatnak.

6.2. Nyeregtető

Modellfile WIND_duopitch.axs

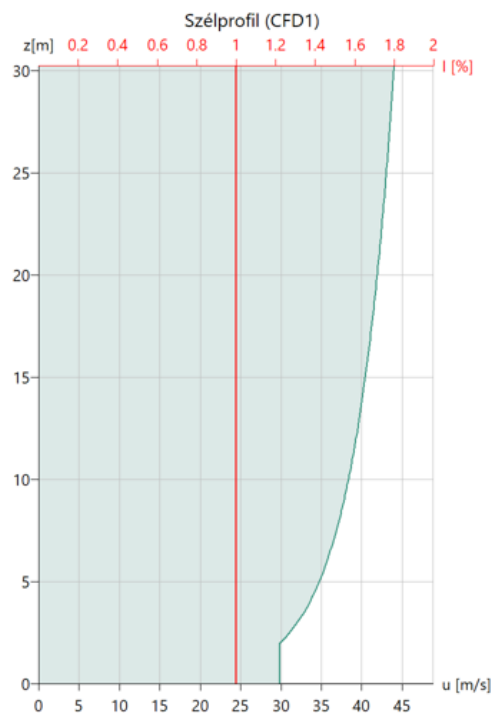
Vizsgált modell



Szélprofil

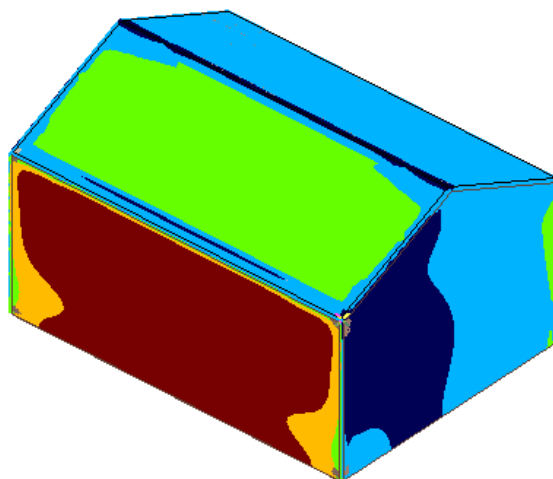
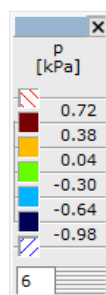
Profil típusa: Szabványos
 Szabvány: Eurocode
 Terep, Z_0 : 0 m
 Beépítettség kategória II
 Sűrűség, ρ 1.25 kg/m³
 Kinematikus viszkozitás, ν 15 mm²/s
 ν_{b0} 25.0 m/s
 C_{dir} , C_{season} C_0 C_s C_d 1.0
 Turbulencia intenzitás 10 %

Szélirány Globális +Y irány.



Turbulencia k- ϵ
 modell

Szélnyomások a
felületen:



	EN 1991-1-4	RWIND	WIND	Eltérés [%]
F_x [kN]	77.71	76.95	75.03	3.4
F_y [kN]	0.00	-0.22	0.10	-
F_z [kN]	48.02	52.53	46.03	4.1

7. Szakirodalom

Lengyel Gábor, Pál Gábor. A Szentendrei Duna-ág Feletti Kerékpároshíd Tervezése, MAGÉSZ, 19: 2. szám pp. 19-34. (2022).

Reynolds, Osborne. "An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels". *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 174 (0), 1883, P. 935–982

Andersson B, Andersson R, Håkansson L, Mortensen M, Sudiyo R, van Wachem B. *Computational Fluid Dynamics for Engineers*. Cambridge University Press; 2011.

Deck, Sébastien, Fabien Gand, Vincent Brunet, and Saloua Ben Khelil. 2014. "High-Fidelity Simulations of Unsteady Civil Aircraft Aerodynamics: Stakes and Perspectives. Application of Zonal Detached Eddy Simulation." *Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences* 372 (2022). The Royal Society.

Comparison of a DNS, LES and RANS. (2006). Italian National Agency for New Energy Technologies, Energy and Sustainable Economic Development.

L.S. Caretto, A.D. Gosman, S.V. Patankar, and D.B. Spalding. [Two Calculation Procedures for Steady, Three-Dimensional Flows With Recirculation](#). In *Proceedings of the Third International Conference on Numerical Methods in Fluid Mechanics*, volume 19 of *Lecture Notes in Physics*, pages 60–68. Springer, 1972.

T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu. A New k - ϵ Eddy-Viscosity Model for High Reynolds Number Turbulent Flows - Model Development and Validation. *Computers Fluids*, 24(3):227-238, 1995.

Wilcox, D.C., *Re-assessment of the scale-determining equation for advanced turbulence models*, AIAA Journal, vol. 26, no. 11, pp. 1299-1310, 1988.

Menter, F. R., *Zonal Two Equation k - ω Turbulence Models for Aerodynamic Flows*, AIAA Paper 93-2906, 1993

Yousef Abu-Zidan, Priyan Mendis, Tharaka Gunawardena, *Optimising the computational domain size in CFD simulations of tall buildings*, Heliyon, Volume 7, Issue 4, 2021, <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06723>.

Franke, J., Hirsch, C., Jensen, A.G., Krüs, H.W., Schatzmann, M., Westbury, P.S., et al. Recommendations on the use of CFD in wind engineering. In: van Beeck, J.P.A.J. (Ed.), *Proceedings of the international conference on urban wind engineering and building aerodynamics*. COST action C14, impact of wind and storm on city life built environment. Von Karman Institute, Sint-Genesius-Rode, Belgium, 5e7 May 2004.

Franke, Jörg & Baklanov, Alexander. (2007). Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment: COST Action 732 Quality Assurance and Improvement of Microscale Meteorological Models.

Bert Blocken, *Computational Fluid Dynamics for urban physics: Importance, scales, possibilities, limitations and ten tips and tricks towards accurate and reliable simulations*, Building and Environment, Volume 91, 2015, Pages 219-245, ISSN 0360-1323, <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.02.015>.

Z.T. Ai, C.M. Mak, *Potential use of reduced-scale models in CFD simulations to save numerical resources: Theoretical analysis and case study of flow around an isolated building*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 134, 2014, Pages 25-29, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.08.009>.

Yi Yang, Ming Gu, Suqin Chen, Xinyang Jin, *New inflow boundary conditions for modelling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in computational wind engineering*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 97, Issue 2, 2009, Pages 88-95, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.12.001>.

Mohammadreza Shirzadi, Parham A. Mirzaei, Mohammad Naghashzadegan, *Improvement of k -epsilon turbulence model for CFD simulation of atmospheric boundary layer around a high-rise building using stochastic optimization and Monte Carlo Sampling technique*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 171, 2017, Pages 366-379, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.10.005>.

D.M. Hargreaves, N.G. Wright, *On the use of the k - ϵ model in commercial CFD software to model the neutral atmospheric boundary layer*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Volume 95, Issue 5, 2007, Pages 355-369, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2006.08.002>.

OpenFOAM, The OpenFOAM Foundation, *User Guide*, version 10, 2022.