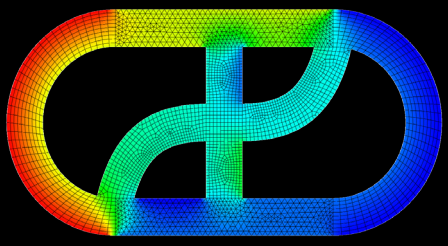


CFD EXPERTS

Simulate the Future

WWW.CFDEXPERTS.NET

مجموعه مقاله‌های آموزشی

شماره ۵

شبکه محاسباتی

Computational Grid

نویسنده

جواد سپاهی یونسی

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

چکیده

یکی از مراحل اصلی در شبیه‌سازی جریان به کمک CFD، تولید شبکه در دامنه محاسباتی است. کیفیت شبکه تاثیر بسیار زیادی در دقت و پایداری حل دارد. بنابراین لازم است با صرف وقت و حوصله کافی و با توجه به ماهیت مسئله، شبکه مناسبی تولید شود وگرنه در حین حل ممکن است با انواع و اقسام خطاهای نرم‌افزاری یا کدنویسی مواجه شوید و یا دقت نتایج مناسب نباشد. انواع شبکه و خواص هرکدام، روش‌های تولید شبکه، شکل سلول‌ها، مش لایه مرزی، معیارهای بررسی کیفیت شبکه و ویژگی‌های یک شبکه خوب از نکاتی است که در این مقاله بررسی خواهند شد.

واژه‌های کلیدی

دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD، شبکه محاسباتی، شبکه باسازمان، شبکه بی‌سازمان، شبکه غیریکنواخت، روش جبری، معیارهای Smoothness، Aspect Ratio و Skewness

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

فهرست مطالب

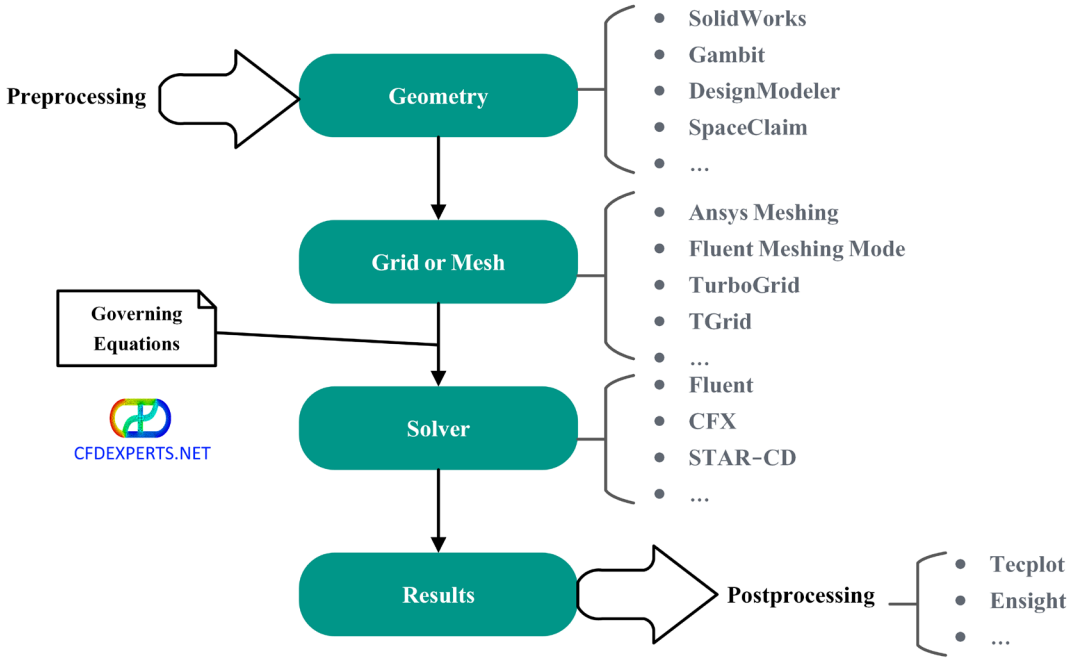
صفحه

۵ شبکه محاسباتی ۵
۱.۵ انواع شبکه محاسباتی ٦
۱.۱.۵ مش باسازمان (Structured) و مش بی‌سازمان (Unstructured) ٦
۲.۱.۵ مش کارتزین (Cartesian) و مش منطبق بر جسم (Body-fitted) ۱۰
۳.۱.۵ مش یکنواخت (Uniform) و مش غیریکنواخت (Non-uniform) ۱۳
۲.۵ دسته‌بندی مش بر اساس شکل سلول‌ها/المان‌ها ۱٦
۳.۵ روش‌های تولید شبکه ۱۷
۴.۵ مراحل تولید شبکه ۱۸
۵.۵ معیارهای بررسی کیفیت مش ۱۸
۱.۵.۵ معیار Smoothness ۱۸
۲.۵.۵ معیار ضریب منظری (Aspect Ratio) ۱۹
۳.۵.۵ معیار Skewness ۲۰
۶.۵ اداپشن شبکه (Grid Adaption) ۲۱
۷.۵ ویژگی‌های یک شبکه با کیفیت ۲۲
۸.۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۲٤
منابع و مراجع ۲۵

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

۵ شبکه محاسباتی

درباره مراحل شبیه‌سازی جریان سیال با استفاده از CFD در این مقاله صحبت شده است. همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است، یکی از این مراحل تولید شبکه (Grid Generation) است. هدف این مرحله تبدیل فضای فیزیکی واقعی که یک فضای پیوسته است به یک میدان حل گسسته است تا بعدا معادلات حاکم در آن میدان حل شوند. بنابراین خروجی این مرحله مختصات نقاط شبکه است. این مختصات بعدا در گسسته‌سازی معادلات حاکم استفاده خواهند شد.



مراحل شبیه‌سازی جریان به کمک CFD به همراه نرم‌افزارهای قابل استفاده در هر مرحله

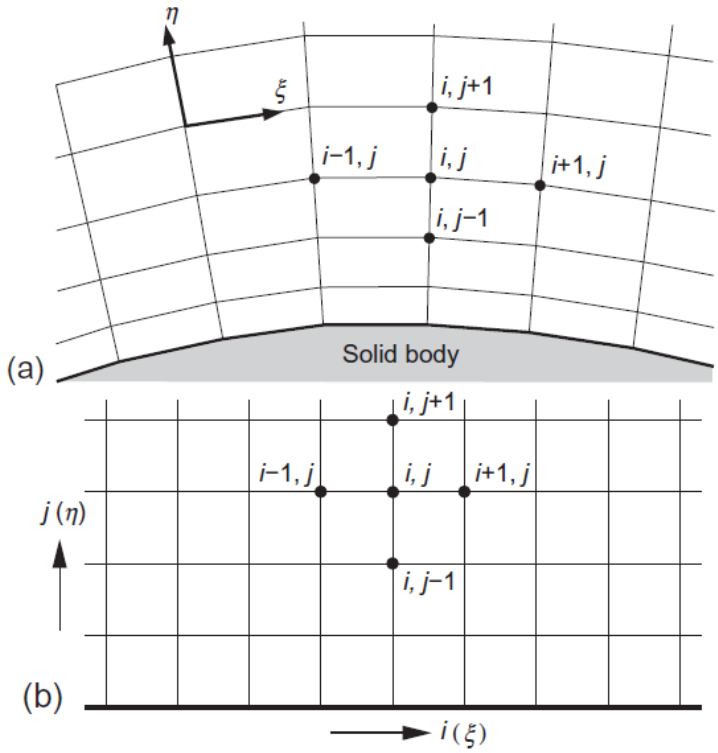
تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

۱.۵ انواع شبکه محاسباتی

شبکه یا مش (Mesh) را از جنبه‌های مختلفی می‌توان دسته‌بندی کرد. در این قسمت به‌منظور آشنایی شما با شبکه محاسباتی، دسته‌بندی‌ها و انواع مختلف شبکه محاسباتی مختصرا بیان می‌شود.

۱.۱.۵ مش باسازمان (Structured) و مش بی‌سازمان (Unstructured)

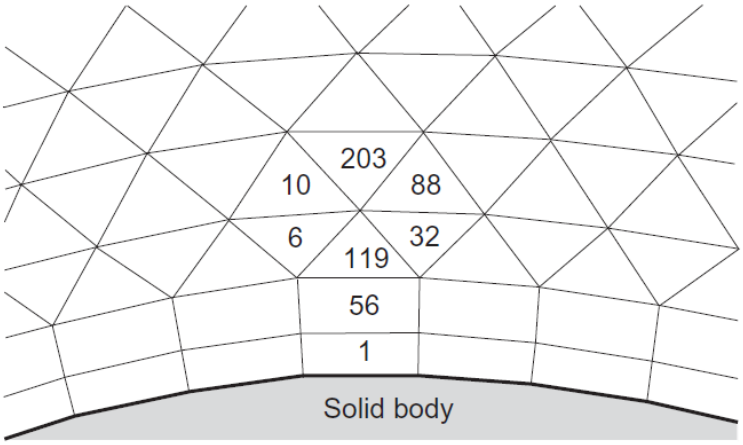
در یک نگاه کلی مش را می‌توان به مش باسازمان و مش بی‌سازمان تقسیم کرد. همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است، در مش باسازمان هر نقطه از شبکه که اصطلاحا Node یا Vertex نامیده می‌شود، به‌صورت یکتا توسط اندیس‌های i،j و k و مختصات کارتزین $x_{i,j,k}$، $y_{i,j,k}$ و $z_{i,j,k}$ مشخص می‌شود [۱]. در حقیقت در این شبکه حساب‌وکتاب نقاط شبکه مشخص و منظم است. در این شبکه در حالت دوبعدی سلول‌ها چهارضلعی (Quadrilateral) و در حالت سه‌بعدی شش‌وجهی (Hexahedron) هستند.



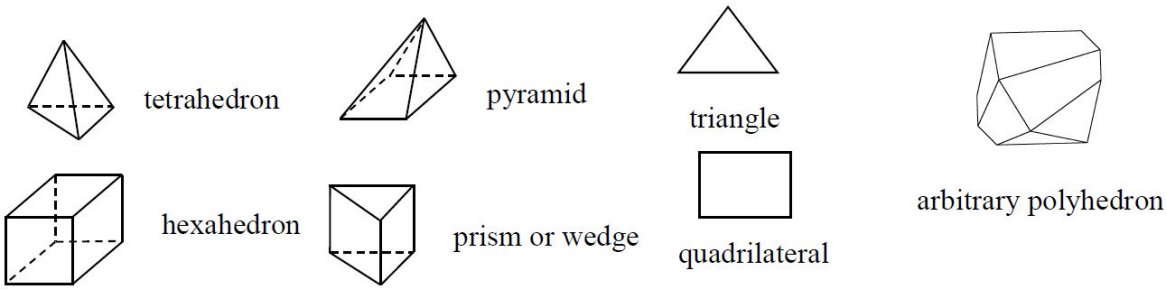
یک مش باسازمان در حالت دوبعدی، (a): فضای فیزیکی گسسته‌شده، (b): فضای محاسباتی [۱]

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

در شبکه بی‌سازمان سلول‌ها و نقاط شبکه نظم و ترتیب مشخصی ندارند و نقاط یا سلول‌های شبکه را نمی‌توان به‌صورت مستقیم توسط اندیس‌هایشان مشخص کرد (مثلا در شکل زیر سلول ٦ در مجاورت سلول ۱۱۹ قرار گرفته است) [۱]. در این شبکه در حالت دوبعدی سلول‌ها مثلثی، چهارضلعی یا چندضلعی و در حالت سه‌بعدی چهاروجهی (Tetrahedron)، منشوری (Prism)، هرمی (Pyramid)، شش‌وجهی (Hexahedron) یا چندوجهی (Polyhedral) هستند [۲].



یک مش بی‌سازمان در حالت دوبعدی [۱]

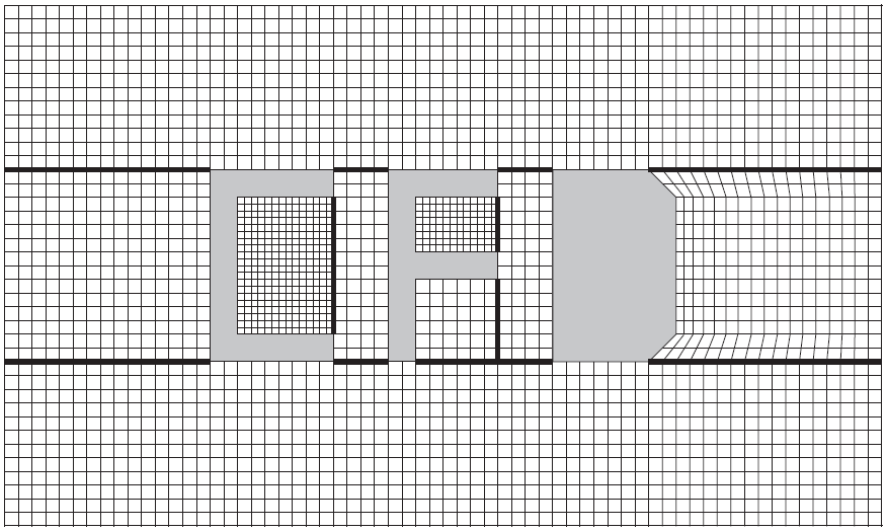


شکل‌های مختلف سلول‌های شبکه [۳]

مزیت اصلی مش باسازمان این است که اندیس‌ها یک فضای خطی و منظم تشکیل می‌دهند و پیدا کردن سلول‌ها و گره‌های مجاور یک سلول (بالا، پایین، چپ و راست) بسیار ساده است. درنتیجه محاسبه گرادیان‌ها و شارهای جریان و مدل‌سازی لایه مرزی در این مش بسیار ساده است. اشکال اصلی این مش هم این است که تولید آن در هندسه‌های پیچیده مشکل است. یک راه برای رفع این مشکل این است که

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

فضای محاسباتی به یک سری بلوک ساده‌تر که راحت‌تر مش زده می‌شوند، تبدیل شود که به آن شبکه Multiblock می‌گویند. البته یک اشکال شبکه Multiblock معاوضه اطلاعات بین بلوک‌ها هنگام حل جریان است [۱].

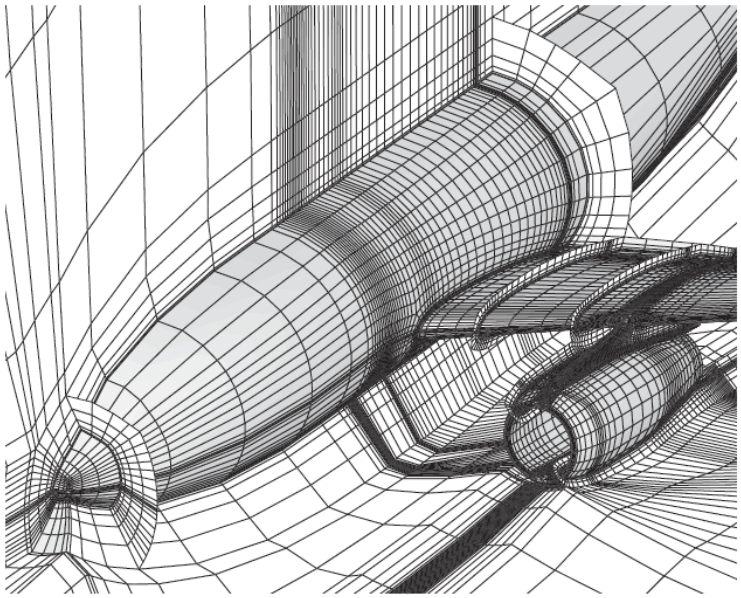


یک مش باسازمان Multiblock حول کلمه CFD، خطوط تیره‌تر مرزهای بلوک‌ها را نشان می‌دهند [۱]

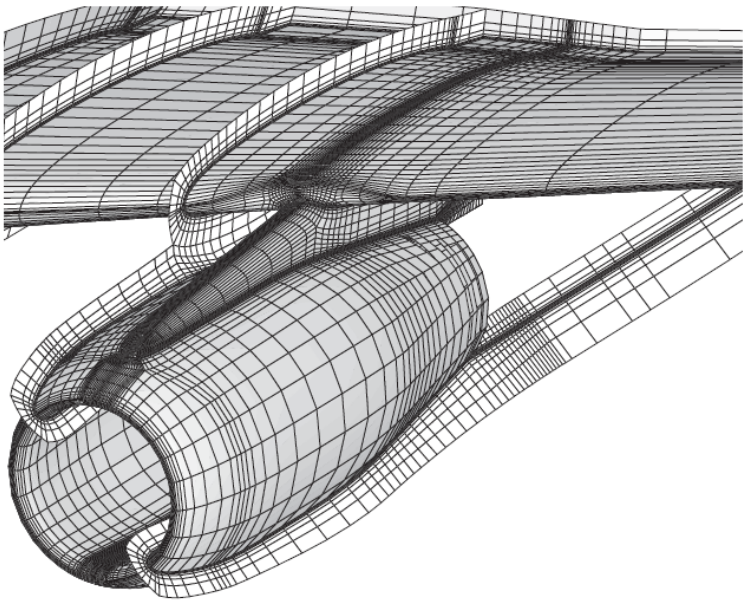
مزیت اصلی مش بی‌سازمان این است که با استفاده از آن تولید شبکه برای هندسه‌های پیچیده بسیار راحت‌تر از مش باسازمان Multiblock است. این مزیت بر پایه این واقعیت است که سلول‌های مثلثی (در حالت دوبعدی) و چهاروجهی (Tetrahedral) (در حالت سه‌بعدی) می‌توانند به‌صورت خودکار و مستقل از پیچیدگی دامنه تولید شوند. البته نباید از تولید مش با کیفیت غافل شد. برای مدل‌سازی صحیح لایه مرزی توصیه می‌شود در حالت دوبعدی از سلول‌های مستطیلی و در حالت سه‌بعدی از سلول‌های منشوری‌شکل یا شش‌وجهی در نزدیکی مرزهای جامد استفاده شود. در این حالت مش بی‌سازمان ترکیبی (Hybrid) خواهد بود، زیرا سلول‌ها شکل یکسانی ندارند. باوجود این‌که تولید یک مش بی‌سازمان ترکیبی برای یک هندسه پیچیده در حالت کلی ساده نیست، ولی زمانی که برای تولید آن صرف می‌شود معمولا بسیار کم‌تر از زمان لازم برای تولید یک مش باسازمان Multiblock است [۱].

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

از معایب مش بی‌سازمان می‌توان به ساختار پیچیده ذخیره‌سازی اطلاعات نقاط شبکه و متغیرهای جریان در آن اشاره کرد که می‌تواند هزینه محاسباتی را افزایش دهد. البته مزیت تولید نسبتا سریع مش در هندسه‌های پیچیده بر این عیب می‌چربد. به همین خاطر است که اکثر نرم‌افزارهای تجاری CFD به این نوع مش تمایل بیش‌تری دارند [۱].

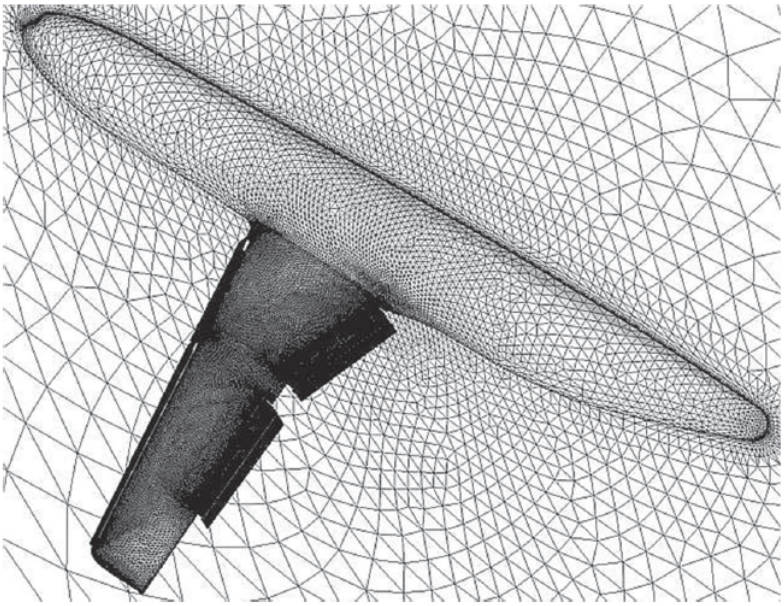


مش باسازمان حول بدنه و بال هواپیما [۱]

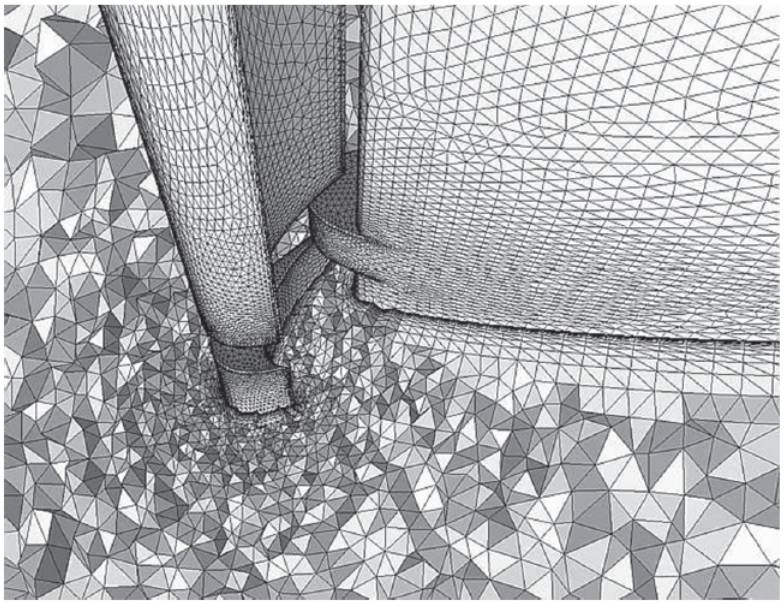


مش باسازمان شکل قبلی در اطراف موتور [۱]

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.



مش بی‌سازمان حول بدنه و بال هواپیما [۱]

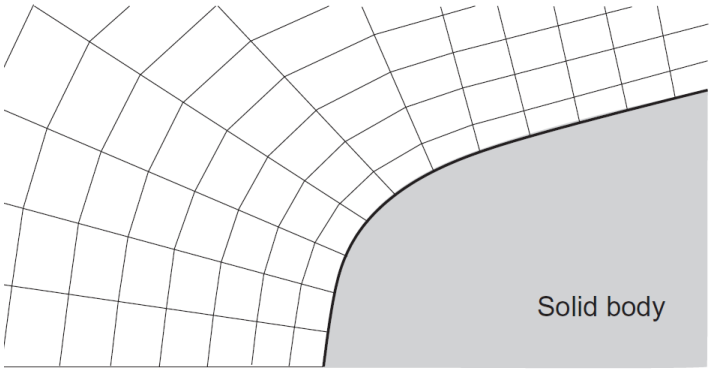


مش بی‌سازمان نزدیک بال هواپیما [۱]

۲.۱.۵ مش کارتزین (Cartesian) و مش منطبق بر جسم (Body-fitted)

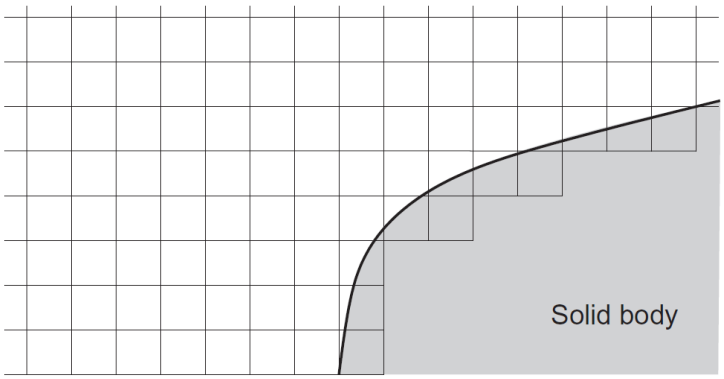
مشی که منطبق و هم‌راستا با مرزهای دامنه حل و جسم باشد، مش منطبق بر جسم نامیده می‌شود [۱].

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.



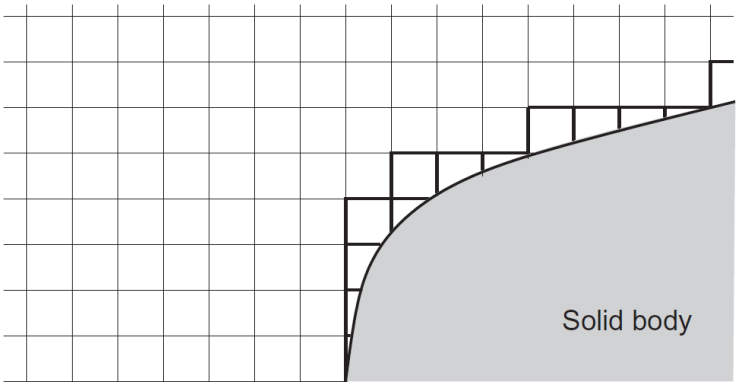
مش منطبق بر جسم دوبعدی [۱]

مزیت اصلی این مش این است که جریان در مجاورت مرزها با دقت بالایی محاسبه می‌شود و عیب اصلی آن این است که برای هندسه‌های واقعی تولید آن مشکل و پیچیده است. در مقابل، مش کارتزین وجود دارد که خطوط شبکه موازی با محورهای مختصات هستند و به‌سادگی تولید می‌شود. مزیت اصلی مش کارتزین این است که محاسبه شارهای جریان در این شبکه بسیار ساده می‌شود. اما همان‌طور که شکل‌های زیر نشان می‌دهد، مدل‌سازی صحیح لبه‌ها و مرزهای دامنه و هندسه در این مش مشکل است. به همین دلیل در حالت کلی استفاده از مش منطبق بر جسم یا ترکیبی از مش کارتزین و مش منطبق بر جسم توصیه می‌شود [۱].



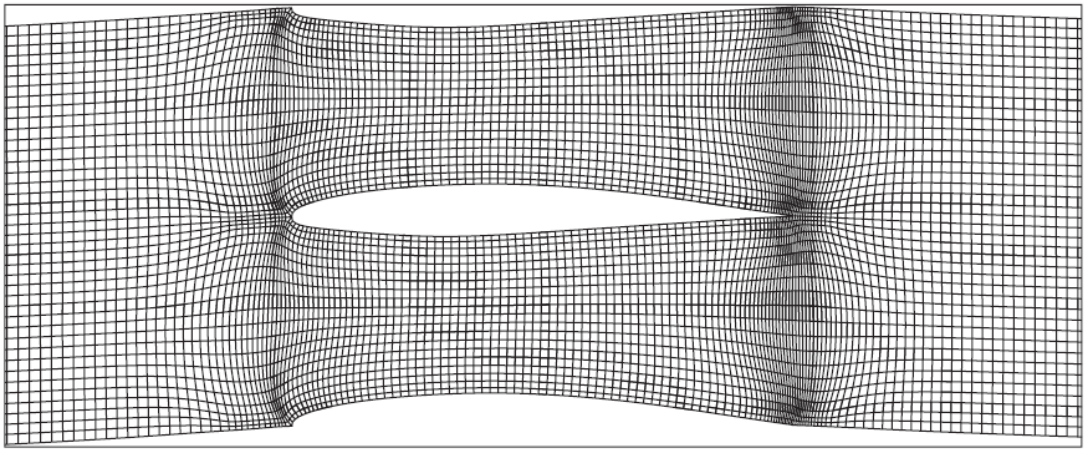
مش کارتزین دوبعدی با مرز غوطه‌ور (Immersed) در مش [۱]

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

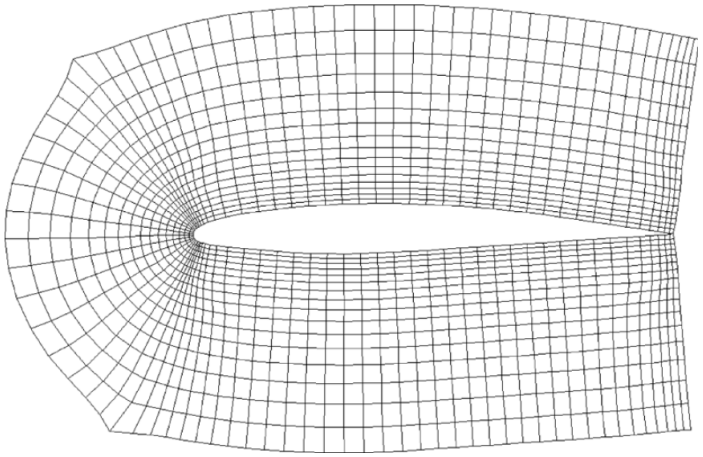


مش کارتزین دوبعدی با سلول‌های مرزی چندضلعی [۱]

بر اساس ظاهر خطوط مش، مش منطبق بر جسم به H-type، C-type، O-type و I-type تقسیم می‌شود که در شکل‌های زیر نشان داده شده‌اند.

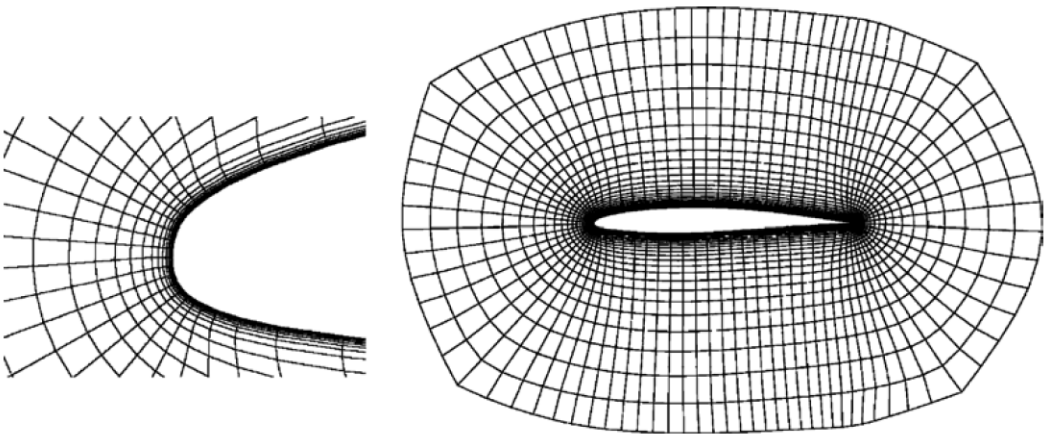


مش باسازمان منطبق بر جسم از نوع Hشکل [۲]

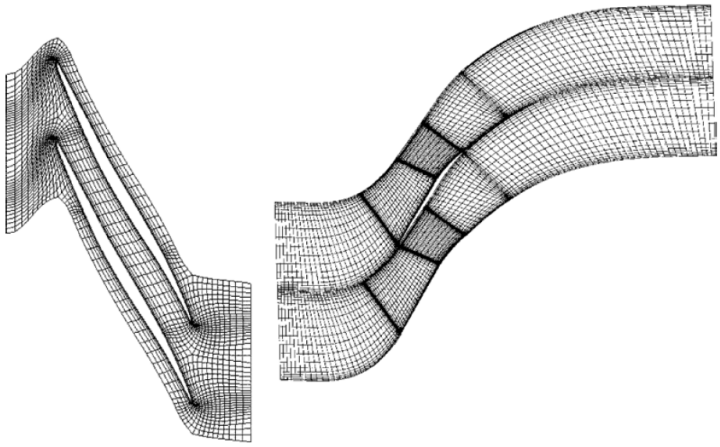


مش باسازمان منطبق بر جسم از نوع Cشکل [۲]

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.



مش باسازمان منطبق بر جسم از نوع Oشکل [۲]



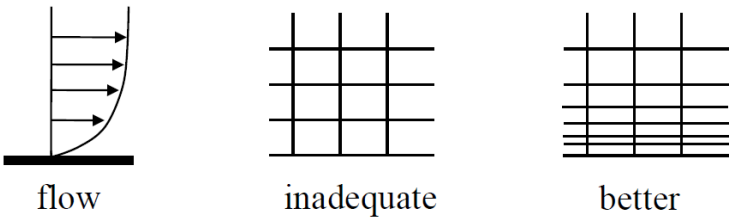
مش باسازمان منطبق بر جسم از نوع Iشکل برای پره‌های توربوماشین [۲]

۳.۱.۵ مش یکنواخت (Uniform) و مش غیریکنواخت (Non-uniform)

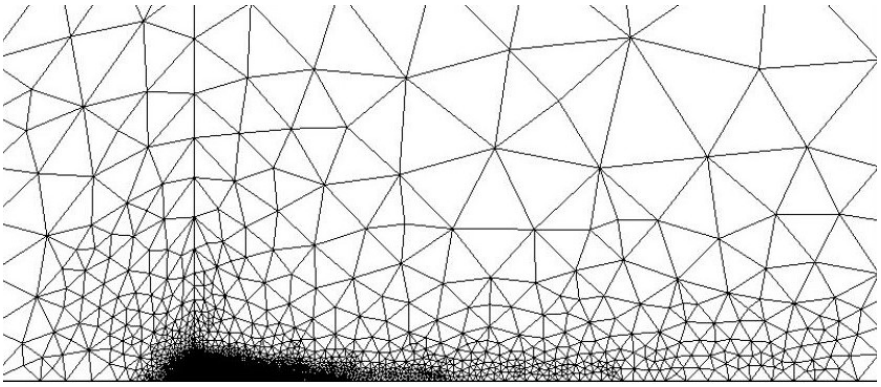
مشی یکنواخت است که اندازه سلول‌های آن در تمام دامنه یکسان و بدون تغییر باشد. معمولا استفاده از مش غیریکنواخت توصیه می‌شود، زیرا در آن در مکان‌های مورد نیاز می‌توان تراکم سلول‌ها را افزایش داد. سوالی که پیش می‌آید این است که کجا باید تراکم سلول‌ها را بالا برد و اصطلاحا مش را ریز کرد. پاسخ این است که هر کجا گرادیان (تغییر شدید) وجود داشته باشد. گرادیان دو نوع است، جریانی و هندسی. لبه تیز اجسام مثالی از گرادیان هندسی است که برای مدل‌سازی درست آن لازم است مش اطراف لبه تیز به‌اندازه

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

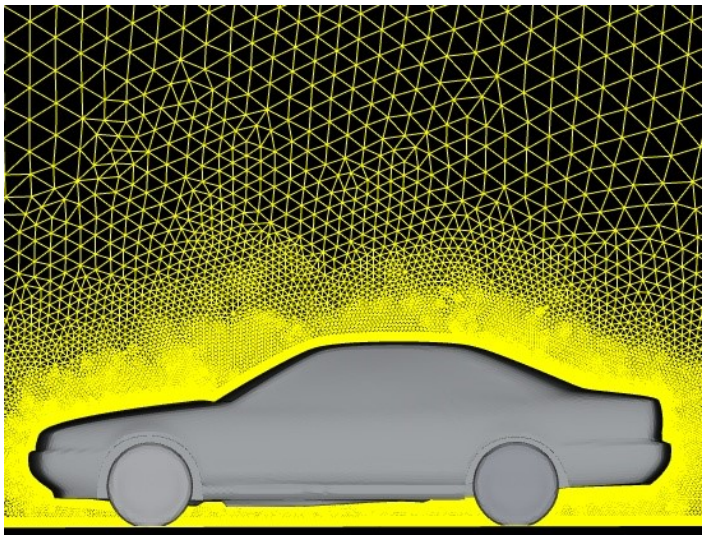
کافی ریز شود. لایه مرزی، امواج ضربه‌ای (Shock Waves) و جدایش جریان هم مثال‌هایی از گرادیان جریانی هستند. در شکل‌های زیر مثال‌هایی از شبکه غیریکنواخت آمده است.



مثالی از شبکه غیریکنواخت برای مدل‌سازی لایه مرزی [۳]



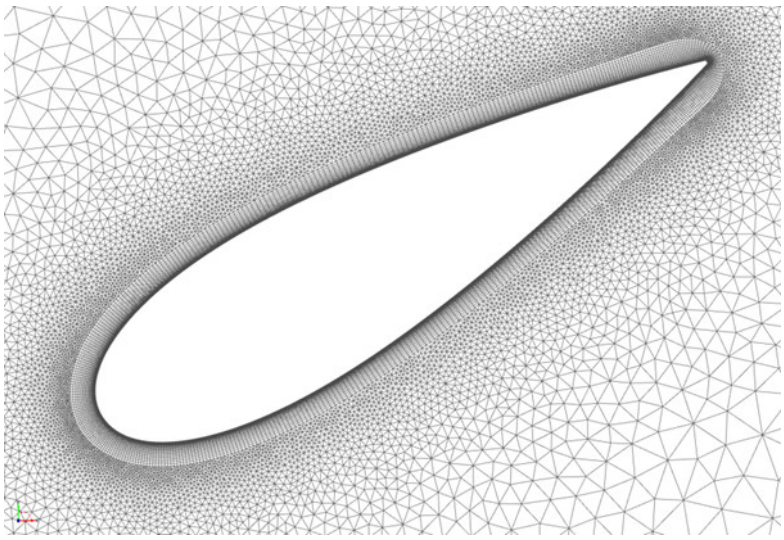
شبکه غیریکنواخت حول یک صفحه تخت



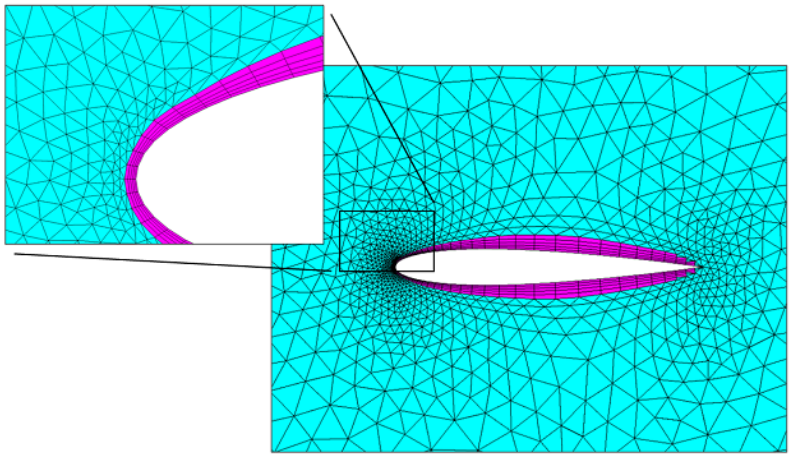
شبکه غیریکنواخت حول یک اتومبیل

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

یکی از مهم‌ترین جاهایی که لازم است در آنجا شبکه به‌اندازه کافی ریز شود، لایه مرزی است. برای این کار می‌توان از مش لایه مرزی (Boundary Layer Mesh) استفاده کرد. در این روش چند لایه سلول ریز که معمولا باسازمان هستند، روی دیواره‌های جسم در نظر گرفته می‌شود تا گرادیان‌های شدید جریانی موجود در داخل لایه مرزی و خصوصا در راستای عمود بر آن به‌درستی محاسبه شوند. خارج از لایه مرزی و دور از سطح جسم، از سلول‌های درشت‌تر استفاده می‌شود. معمولا سلول‌های موجود در مش لایه مرزی در حالت دوبعدی مستطیلی و در حالت سه‌بعدی منشوری‌شکل یا شش‌وجهی هستند. در شکل‌های زیر چند نمونه استفاده از مش لایه مرزی نشان داده شده است.

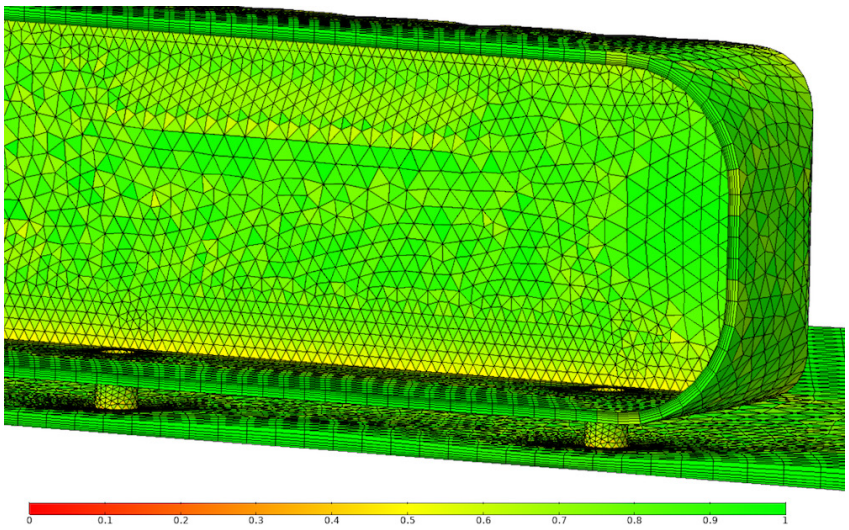


مش لایه مرزی حول ایرفویل، یک مش ترکیبی



مش لایه مرزی حول ایرفویلی دیگر

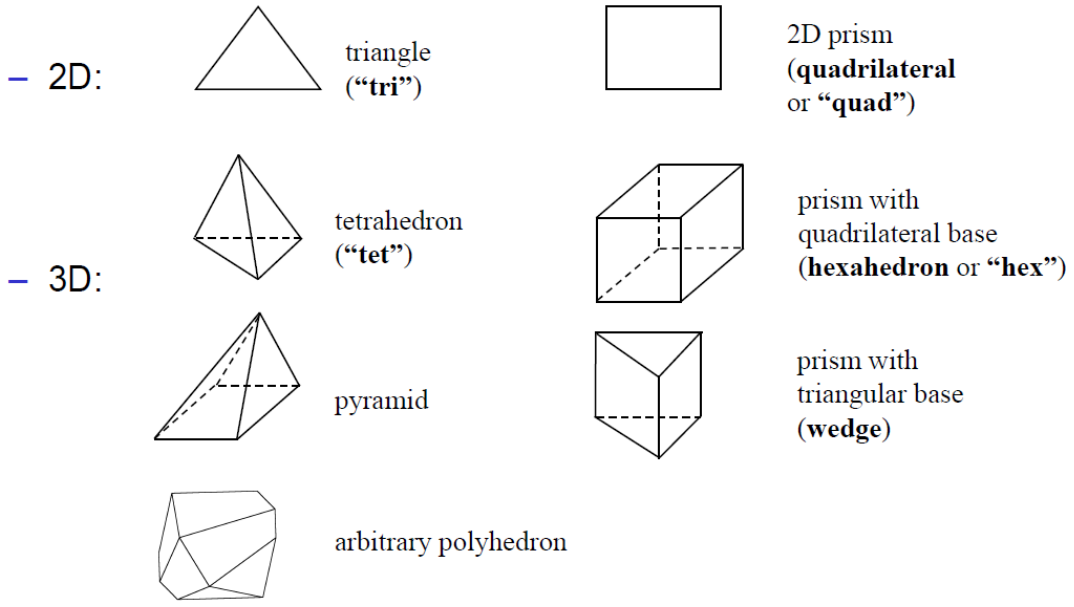
تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.



مش لایه مرزی در یک مدل سه‌بعدی

۲.۵ دسته‌بندی مش بر اساس شکل سلول‌ها/المان‌ها

همان‌طور که در شکل زیر نشان داده شده است، شکل‌های مختلفی برای سلول‌ها/المان‌های شبکه در دسترس است که انتخاب آن‌ها بستگی به مسئله مورد بررسی و حل‌گر CFD دارد.



شکل‌های مختلف سلول‌های دوبعدی و سه‌بعدی [۳]

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

در کدها و نرم‌افزارهای مختلف بر اساس شکل سلول‌های استفاده‌شده در مش، اسامی زیر ممکن است برای مش استفاده شود [۳]:

- مش Tri: مشی است دوبعدی که تمام سلول‌های آن مثلثی باشند،
- مش Quad: مشی است دوبعدی که تمام سلول‌های آن چهارضلعی باشند،
- مش Hex: مشی است سه‌بعدی که تمام سلول‌های آن شش‌وجهی باشند،
- مش Tet: مشی است سه‌بعدی که تمام سلول‌های آن چهاروجهی باشند،
- مش Hybrid: مشی است در یکی از حالات زیر:
  - ✓ در حالت دوبعدی سلول‌های آن بخشی مثلثی و بخشی چهارضلعی باشند،
  - ✓ در حالت سه‌بعدی سلول‌های آن هر ترکیبی از سلول‌های چهاروجهی، منشوری (Prism) یا هرمی (Pyramid) باشند،
  - ✓ مش لایه مرزی: در حالت سه‌بعدی در مجاورت دیواره‌ها سلول‌ها منشوری و در سایر نقاط چهاروجهی باشند،
  - ✓ مش Hexcore: در حالت سه‌بعدی در مرکز دامنه سلول‌ها شش‌وجهی و در مجاورت دیواره‌ها از انواع دیگر باشند،
- مش Polyhedral: مشی است سه‌بعدی که سلول‌های آن چندوجهی با شکل دلخواه باشند.

۳.۵ روش‌های تولید شبکه

سه روش برای تولید شبکه وجود دارد که عبارت‌اند از روش جبری، روش حل PDE و روش Conformal Mapping. در روش جبری که به آن روش هندسی هم می‌گویند، شبکه با استفاده از یک سری روابط جبری که ماهیت هندسی دارند، تولید می‌شود. در روش حل PDE یک سری معادله PDE که می‌توانند ماهیت بیضوی، سهومی و یا هذلولوی داشته باشند، حل و بر اساس آن شبکه تولید می‌شود. در روش Conformal

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

Mapping از انتقال (Transformation) استفاده می‌شود تا دامنه فیزیکی به دامنه محاسباتی تبدیل شود. این روش که در آن از جبر مختلط استفاده می‌شود، محدود به مسائل دوبعدی است.

۴.۵ مراحل تولید شبکه

۱. مش سطوح را تولید کن.
۲. کیفیت مش سطوح را بررسی کن. ویژگی‌های یک مش خوب و ابزارهای لازم برای بررسی کیفیت مش در ادامه معرفی خواهند شد.
۳. کیفیت مش سطوح را ارتقا بده و در صورت لزوم آن‌ها را تعمیر کن.
۴. مش حجم را تولید کن.
۵. در صورت لزوم مش را ریزتر کن.
۶. کیفیت مش حجم را بررسی کن.
۷. سلول‌های نامناسب را حذف کن.
۸. مش حجم را ذخیره کن [۳].

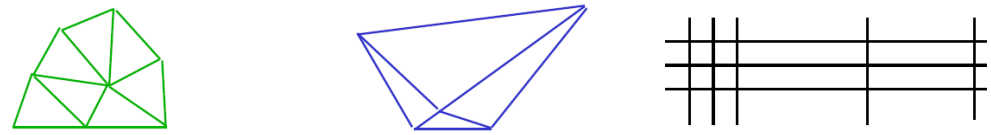
۵.۵ معیارهای بررسی کیفیت مش

برای بررسی کیفیت مش سه معیار اصلی وجود دارد که در این قسمت معرفی می‌شوند.

۱.۵.۵ معیار Smoothness

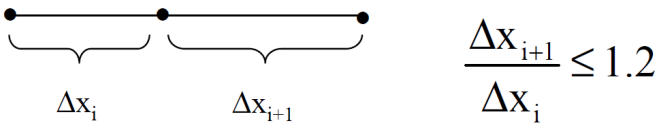
منظور از این معیار تغییر تدریجی اندازه سلول‌ها در تمام جهات است. تغییر شدید در اندازه سلول‌ها علاوه بر کاهش دقت حل می‌تواند باعث واگرایی آن شود.

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.



معیار Smoothness [۳]

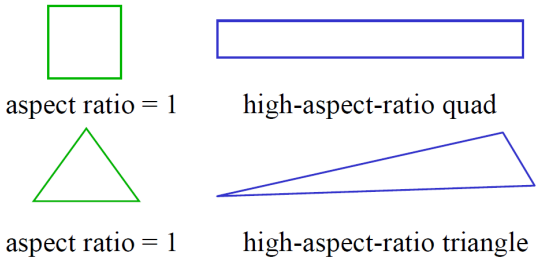
در حالت ایده‌آل، بیش‌ترین تغییر در فاصله گره‌ها باید کم‌تر از ۲۰ درصد باشد [۳].



Smoothness ایده‌آل [۳]

۲.۵.۵ معیار ضریب منظری (Aspect Ratio)

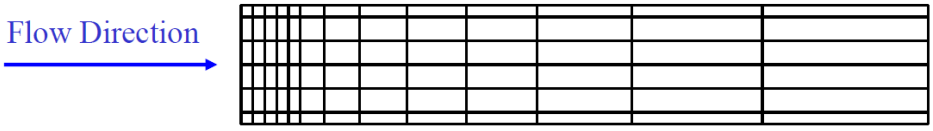
علاوه بر پیوستگی در اندازه سلول‌ها، دو معیار دیگر برحسب انحراف سلول‌ها از یک سلول ایده‌آل کارتزین تعریف می‌شود که کیفیت مش را نشان می‌دهند. یکی از این معیارها ضریب منظری سلول است که به‌صورت نسبت بلندترین ضلع سلول به کوتاه‌ترین ضلع آن تعریف می‌شود [۳]. مقدار ایده‌آل آن ۱ است. مش با ضریب منظری زیاد باعث دقت کم و کند شدن نرخ همگرایی حل می‌شود.



سلول‌های با ضریب منظری زیاد [۳]

استثنائا اگر جریان توسعه‌یافته (Fully-developed) و ذاتا یک‌بعدی باشد، سلول‌های quad و hex می‌توانند کشیده‌شده و دارای ضریب منظری بزرگ‌تر از یک باشند [۳].

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.



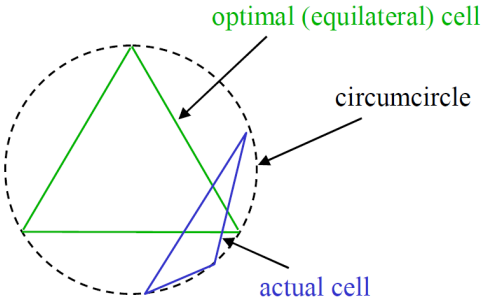
حالت مجاز برای ضریب منظری بزرگ‌تر از ۱ [۳]

۳.۵.۵ معیار Skewness

معیار دیگر برای بررسی کیفیت مش Skewness سلول‌ها است. دو روش برای تعیین Skewness وجود دارد.

روش اول بر اساس حجم سلول ایده‌آل متساوی‌الاضلاع است [۳]:

$$Skewness = \frac{optimal\ cell\ size - cell\ size}{optimal\ cell\ size}$$

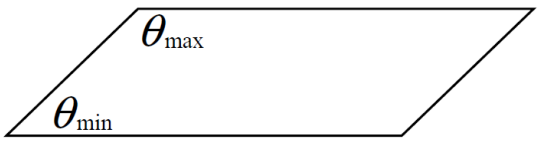


تعریف Skewness بر اساس حجم سلول

این روش فقط برای سلول‌های مثلثی و چهاروجهی استفاده می‌شود.

روش دوم بر اساس انحراف زاویه سلول از زاویه یک سلول متعامد است:

$$Skewness\ (for\ a\ quad) = max\left[\frac{\theta_{max} - 90}{90}, \frac{90 - \theta_{min}}{90}\right]$$



تعریف Skewness بر اساس زاویه سلول

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

این روش برای هر شکلی از سلول قابل استفاده است و همیشه برای سلول‌های منشوری و هرمی استفاده می‌شود.

رابطه اخیر برای سلول quad است. در حالت کلی:

$$Skewness=max\left[\frac{\theta_{max}-\theta_e}{180-\theta_e},\frac{\theta_e-\theta_{min}}{\theta_e}\right]$$

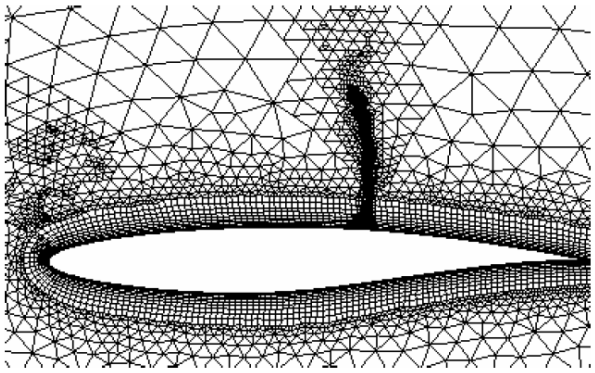
که در آن θ_e برای سلول quad برابر ۹۰ درجه و برای سلول مثلثی ۶۰ درجه است. به این تعریف برای Skewness بعضی اوقات Equiangle Skewness هم می‌گویند. محدوده Skewness بین صفر (بهترین حالت) و ۱ (بدترین حالت) است [۳].

۶.۵ اداپشن شبکه (Grid Adaption)

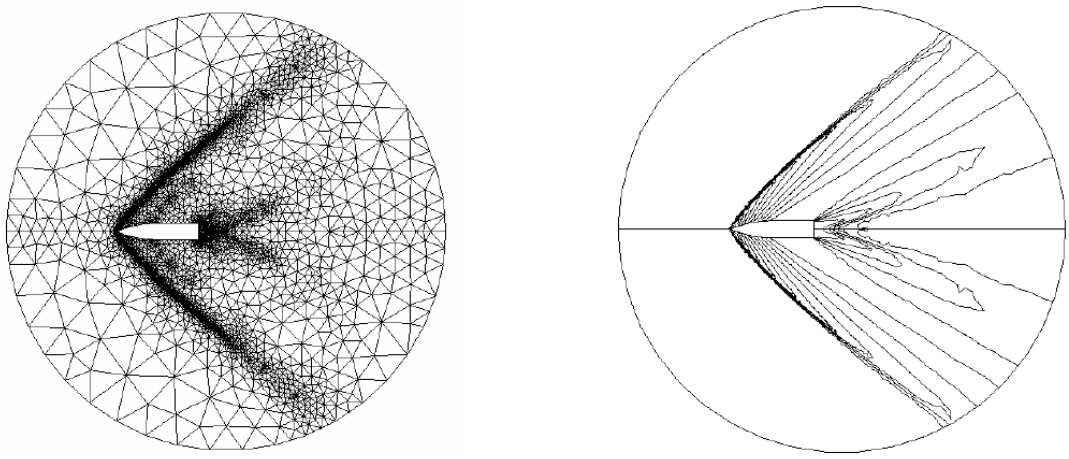
با توجه به مباحثی که مطرح شد، این‌گونه به نظر می‌رسد که برای تولید یک شبکه با کیفیت لازم است تعداد سلول‌های شبکه بسیار زیاد و اصطلاحا مش کاملا ریز باشد. اگرچه این مطلب درست است، ولی باید توجه کرد که در کنار کیفیت مش باید به زمان و هزینه محاسباتی هم توجه کرد. ممکن است برای یک مش با تعداد سلول زیاد رایانه با سخت‌افزار مناسب موجود نباشد و یا زمان شبیه‌سازی بسیار زیاد و طاقت‌فرسا شود. یکی از راه‌هایی که می‌توان هم مش با کیفیتی داشت و هم تعداد سلول را در حد معقول نگه‌داشت، اداپشن مش است. در این روش ابتدا با استفاده از یک مش نسبتا درشت یک حل اولیه از مسئله گرفته می‌شود. سپس بر اساس گرادیان‌های جریان در حل اولیه، هر جا گرادیان‌ها از حدی که کاربر تعریف می‌کند، بیش‌تر باشد، مش در آن نقطه ریز یا Adapt می‌شود (Refining). این روش اصطلاحا Solution-based Grid Adaption نام دارد. با استفاده از این روش، اگر بعد از حل اولیه مشخص شد در ناحیه‌ای گرادیان شدیدی وجود ندارد و مش در آن ناحیه بیش از اندازه ریز شده است، می‌توان مش را در آن نقطه درشت کرد

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

(Coarsening). همچنین ریز یا درشت کردن مش علاوه بر گرادیان‌های جریان می‌تواند بر اساس مقدار کمیت‌ها، در راستای یک مرز و یا در یک ناحیه تعریف‌شده توسط کاربر باشد.



یک نمونه مش اداپت‌شده به خاطر حضور موج ضربه‌ای عمودی (Normal Shock Wave) روی ایرفویل



2D planar shell - final grid

2D planar shell - contours of pressure final grid

نمونه‌ای دیگر از اداپشن مش

۷.۵ ویژگی‌های یک شبکه با کیفیت

بر اساس مطالب ذکرشده در قسمت‌های قبل، در ارتباط با کیفیت مش، پیشنهادهای زیر مطرح می‌شود:

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

- از ناپیوستگی و پرش در اندازه سلول‌ها به‌شدت پرهیز شود، زیرا باعث مشکلات جدی در پایداری حل می‌شود. همچنین لازم است تغییر اندازه سلول‌ها در تمام جهات به‌صورت پیوسته صورت گیرد.
- انحراف سلول‌ها از سلول ایده‌آل حداقل باشد. زاویه بین لبه‌های متوالی سلول نباید از حالت تعامد فاصله زیادی داشته باشد و اصطلاحا Orthogonality سلول‌ها لازم است زیاد باشد.
- از سلول‌هایی که یک یا چند لبه آن‌ها بسیار کوچک باشد، پرهیز شود. استفاده از این‌گونه سلول‌ها که ضریب منظری بالایی دارند، فقط در لایه مرزی مجاز است.
- اگر سلول‌ها تورفتگی یا تداخل داشته باشند، منجر به سطح یا حجم منفی می‌شود و مش دیگر قابل استفاده نخواهد بود.
- مش با سلول‌های شش‌وجهی، خصوصا اگر خطوط شبکه هم‌راستا با جریان باشند، منجر به حل دقیق‌تری می‌شود.
- مش باید به نحوی ریز شده باشد که تمام اتفاقات جریانی داخل میدان حل به‌درستی شبیه‌سازی شوند.
- در مجاورت دیواره‌ها مش باید به‌اندازه کافی ریز شود تا لایه مرزی به‌درستی مدل‌سازی شود. در لایه مرزی استفاده از سلول‌های quad، hex و prism/wedge بر سلول‌های tri، tet و pyramid ارجحیت دارد.
- مقدار Equiangle Skewness را تا جایی که می‌توان باید کم کرد:
  - ✓ برای سلول‌های hex و quad این کمیت نباید بیش‌تر از ۰٫۸۵ باشد،
  - ✓ برای سلول‌های tri این کمیت نباید بیش‌تر از ۰٫۸۵ باشد،
  - ✓ برای سلول‌های tet این کمیت نباید بیش‌تر از ۰٫۹ باشد،
- تغییر موضعی در اندازه سلول‌ها را تا جایی که می‌توان باید کم کرد. سلول‌های مجاور نباید نسبت اندازه (Size Ratio) بیش‌تر از ۲۰ درصد داشته باشند.

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

- جدول زیر می‌تواند راهنمای خوبی برای قضاوت در مورد کیفیت مش بر اساس معیار Skewness باشد [۳]:

Value of Skewness	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.99	0.99-1.00
Cell Quality	excellent	good	acceptable	poor	sliver	degenerate

احراز شرایط بالا در جریان‌ها و مناطقی که گرادیان شدید وجود دارد، دارای اهمیت بیش‌تری می‌شود [۲].

۸.۵ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

شبکه باسازمان اگر تولید راحتی داشته باشد، بیش‌ترین دقت را خواهد داشت. در مقابل شبکه بی‌سازمان برای هندسه‌های پیچیده و برای تولید خودکار مش انتخاب بهتری است. سعی شود از ناپیوستگی در اندازه سلول‌ها، سلول‌های با ضریب منظری و Skewness بالا خصوصا در نواحی با گرادیان بالا اجتناب شود. همچنین لازم است شبکه در نواحی دارای گرادیان بالا به‌اندازه کافی ریز شود. استفاده از مش لایه مرزی در مجاورت دیواره‌ها برای مدل‌سازی دقیق لایه مرزی توصیه می‌شود.

هنگامی که جریان در حالت کلی هم‌راستا با مرزهای هندسه است، شبکه باسازمان انتخاب مناسبی است، زیرا یک سری از خطوط شبکه در راستای خطوط جریان خواهند بود. از لحاظ دقت و هزینه محاسباتی، شبکه باسازمان بر شبکه بی‌سازمان ارجحیت دارد. البته تولید شبکه Multiblock باسازمان برای هندسه‌های پیچیده در مقایسه با شبکه بی‌سازمان سخت و زمان‌بر است.

نظرات خود را در مورد این مقاله با ما در میان بگذارید.

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

منابع و مراجع

[۱] J. Blazek, "Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications", 3rd Ed., Elsevier, 2015.

[۲] C. Hirsch, "Numerical Computation of Internal and External Flows", Elsevier, Vol. 1, 2007.

[۳] André Bakker, "Applied Computational Fluid Dynamics", a Course at Dartmouth College, 2002-2006.

تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.