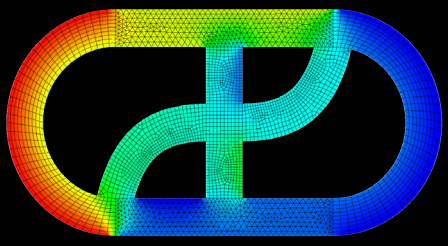


CFD EXPERTS

Simulate the Future

WWW.CFDEXPERTS.NET

مجموعه مقاله‌های آموزشی

شماره ۹

شرایط مرزی

Boundary Conditions

نویسنده

جواد سپاهی یونسی

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

چکیده

در CFD معادلات حاکم بر جریان به همراه یک سری شرایط مرزی و اولیه حل می‌شوند. انتخاب و اعمال درست شرایط مرزی تاثیر بسیار زیادی در دقت و پایداری حل عددی دارد. چه بسا انتخاب یک شرط مرزی نادرست موجب جواب‌های غیرفیزیکی شود. برای شبیه‌سازی یک جریان، شرط مرزی‌های مختلفی را می‌توان انتخاب کرد. محدودیت‌های هر شرط مرزی و این‌که برای هر جریان چه شرط مرزی بهتر است، در این مقاله مورد بررسی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی

دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD، Cell Zone، Face Zone، فشار کاری، خواص مواد، سلول مجازی

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

فهرست مطالب

صفحه

۹ شرایط مرزی ۵

۱.۹ تعیین فشار کاری (Operating Pressure) ۹

۲.۹ شرط مرزی فشار ورودی (Pressure Inlet) ۱۰

۳.۹ شرط مرزی فشار خروجی (Pressure Outlet) ۱۱

۴.۹ شرط مرزی سرعت ورودی (Velocity Inlet) ۱۲

۵.۹ شرط مرزی جریان خروجی (Outflow) ۱۲

۱.۵.۹ محدودیت‌های شرط مرزی جریان خروجی ۱۲

۲.۵.۹ مدل‌سازی چندین خروجی ۱۳

۶.۹ سایر شرط مرزی‌های ورودی و خروجی ۱۴

۷.۹ تعیین پارامترهای آشفتگی در شرایط مرزی ۱۵

۸.۹ شرط مرزی دیواره (Wall Boundary Condition) ۱۶

۹.۹ شرط مرزی تقارن (Symmetry) ۱۶

۱۰.۹ شرط مرزی متناوب (Periodic Boundary Condition) ۱۷

۱۱.۹ شرط مرزی محور (Axis Boundary Condition) ۱۸

۱۲.۹ تعریف Cell Zone سیال ۱۹

۱۳.۹ تعریف محیط متخلخل (Porous Media) ۱۹

۱۴.۹ نواحی متحرک (Moving Zones) ۲۰

۱۵.۹ تعریف Cell Zone جامد ۲۰

۱۶.۹ شرط مرزی‌های دسته Internal Face ۲۱

۱۷.۹ ترکیب درست شرایط مرزی در فلوئنت ۲۲

۱۸.۹ تعیین خواص مواد ۲۲

۱۹.۹ اعمال شرایط مرزی در یک کد عددی ۲۳

۱.۱۹.۹ شرط مرزی دیواره ۲۴

۲.۱۹.۹ شرط مرزی Pressure Far Field ۲۵

۳.۱۹.۹ شرط مرزی فشار خروجی ۲۵

۴.۱۹.۹ شرط مرزی محور ۲۶

۵.۱۹.۹ شرط مرزی بین بلوکی ۲۶

۲۰.۹ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ۲۶

منابع و مراجع ۲۷

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

۹ شرایط مرزی

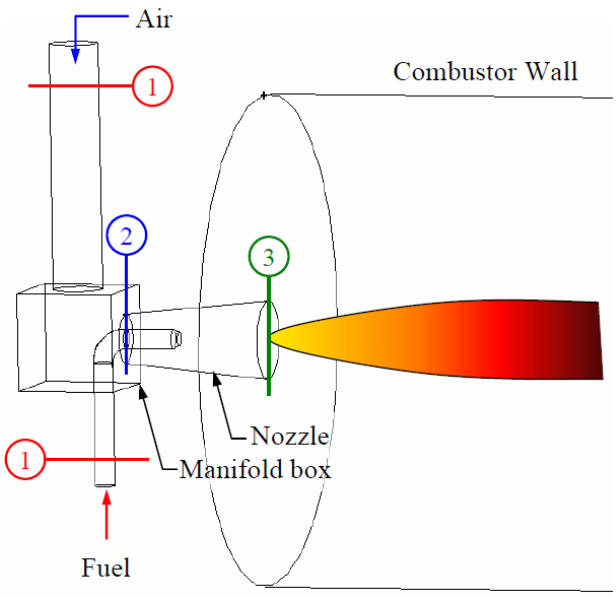
معادلات حاکم بر جریان در این مقاله معرفی شدند. این معادلات یک دستگاه معادلات PDE کوپل غیرخطی هستند که معادلات ناویر-استوکس (Navier-Stokes) نیز نامیده می‌شوند. هنگام حل این دستگاه معادلات لازم است شرایط مرزی و اولیه مناسب اعمال شوند تا جواب مخصوص مربوط به مسئله مورد بررسی به دست آید. در حقیقت مرزها هستند که جریان را داخل میدان حل هدایت و شارهای (جرم، مومنتم و انرژی) ورودی و خروجی از دامنه را تعیین می‌کنند. بنابراین مدل‌سازی درست آن‌ها بسیار مهم است.

منظور از تعیین شرایط مرزی انجام موارد زیر است:

- تعیین موقعیت مرزها، مرزها را باید جایی در نظر گرفت که در آنجا اطلاعات متغیرهای جریان معلوم است یا می‌توان آن‌ها را با تقریب خوبی تخمین زد.
- انتخاب شرط مرزی مناسب برای هر مرز با توجه به ماهیت مسئله که در این مقاله مورد بررسی قرار خواهد گرفت.
- ورود صحیح اطلاعات مورد نیاز برای هر شرط مرزی، اینکه برای هر شرط مرزی چه اطلاعاتی باید وارد شود، بستگی به نوع شرط مرزی و مدل‌های فیزیکی مورد استفاده در حل مسئله دارد.

به‌عنوان مثالی از تعیین موقعیت مرزها، فرض کنید هدف شبیه‌سازی جریان در منیفولد (Manifold) پاشش سوخت در ابتدای محفظه احتراق باشد. طبق شکل زیر سه انتخاب برای موقعیت شرط مرزی ورودی وجود دارد:

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



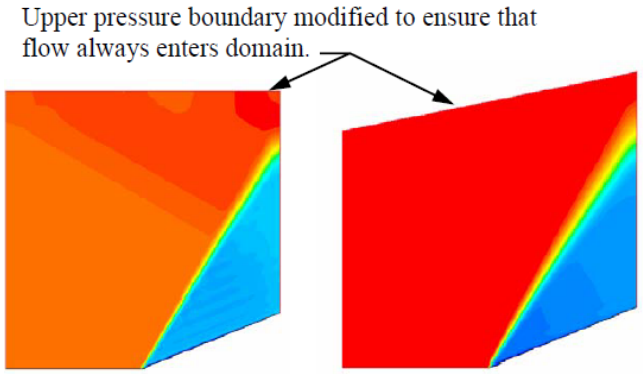
تعیین موقعیت شرط مرزی ورودی در مسئله منیفولد پاشش سوخت [۱]

- **حالت ۱: بالادست منیفولد، در این حالت:**
  - ✓ می‌توان از پروفیل‌های جریانی یکنواخت استفاده کرد.
  - ✓ اختلاط (Mixing) به‌درستی مدل می‌شود.
  - ✓ از مدل‌های واکنشی Non-premixed باید استفاده کرد.
  - ✓ سلول‌های محاسباتی بیش‌تری مورد نیاز است.
- **حالت ۲: صفحه ورودی نازل، در این حالت:**
  - ✓ از مدل‌های واکنشی Non-premixed باید استفاده کرد.
  - ✓ نیاز به پروفیل‌های دقیق جریانی دارد.
- **حالت ۳: صفحه خروجی نازل، در این حالت:**
  - ✓ از مدل‌های واکنشی Premixed باید استفاده کرد.
  - ✓ نیاز به پروفیل‌های دقیق جریانی دارد.

چند نکته کلی در مورد انتخاب محل مرزها:

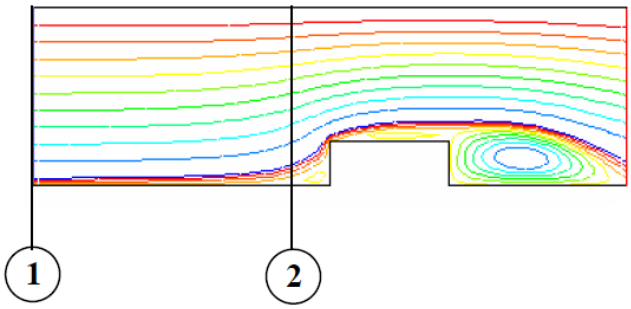
تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.

- بهتر است موقعیت و شکل مرزها را به نحوی انتخاب کرد که جریان یا وارد آن مرز شود و یا از آن خارج شود. این کار معمولا باعث همگرایی بهتر حل می‌شود.



تاثیر انتخاب درست موقعیت شرط مرزی [۱]

- در راستای عمود بر مرز نباید گرادیان جریان زیادی وجود داشته باشد.

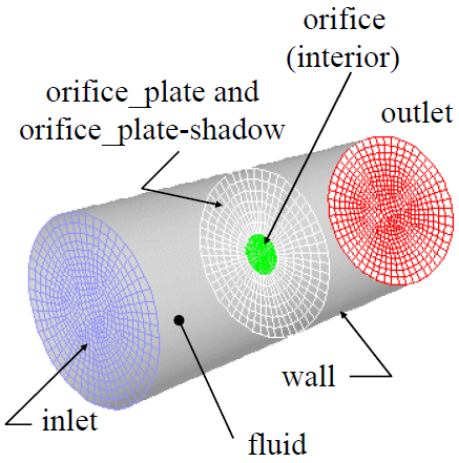


در حالت ۲ در راستای عمود بر مرز گرادیان وجود دارد [۱]

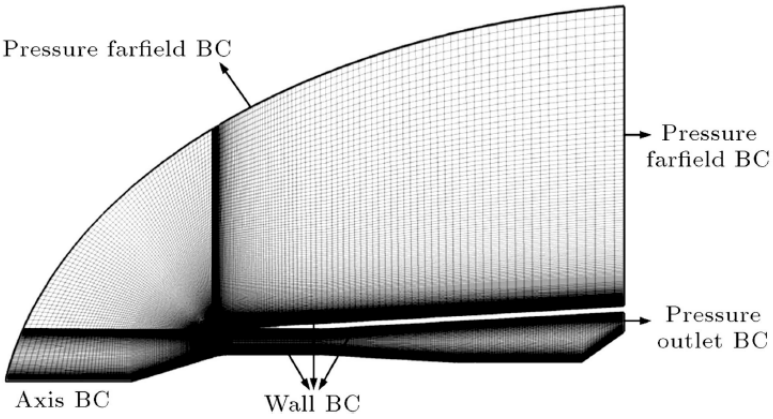
- در نزدیکی مرزها سعی کنید Skewness شبکه به حداقل برسد وگرنه خطا ایجاد می‌شود. برای آشنایی با Skewness و سایر ملاک‌های تعیین‌کننده کیفیت مش به این مقاله مراجعه کنید.

در بعضی نرم‌افزارهای تجاری مانند فلوئنت نواحی سیال (Fluid) و جامد (Solid) تحت عنوان Cell Zone نام‌گذاری می‌شوند. تعیین جنس مواد حاضر در مسئله و نیز چشمه‌ها (Sources) در Cell Zoneها انجام می‌شود. سطوح مرزی و داخلی تحت عنوان Face Zone نام‌گذاری می‌شوند. بنابراین اعمال شرایط مرزی در Face Zoneها انجام می‌شود [۲].

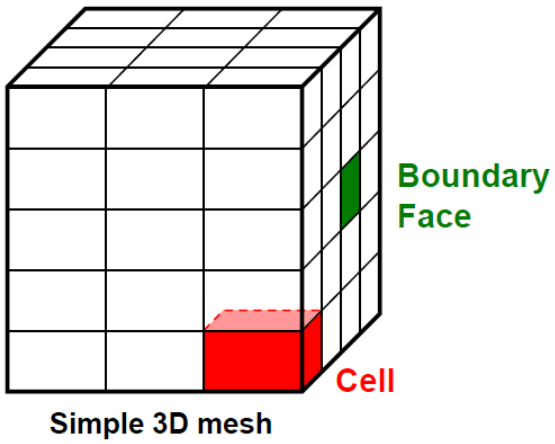
تمام حقوق برای سایت WWW.CFDEXPERTS.NET محفوظ است.



شرایط مرزی در مسئله جریان داخل لوله [۲]



شرایط مرزی در مسئله جریان داخل و اطراف یک ورودی هوای فراصوتی تقارن‌محوری [۳]



سلول‌ها و وجه‌ها (Faces) [۴]

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

شرط مرزی‌های مختلفی وجود دارد که با استفاده از آن‌ها می‌توان ورود و خروج جریان از دامنه حل را مدل کرد [۲]:

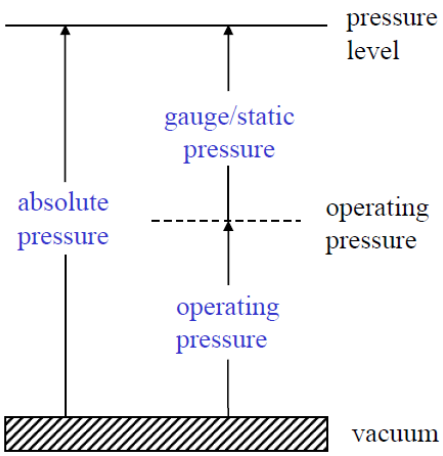
- برای تمام جریان‌ها: pressure inlet و pressure outlet
- برای جریان تراکم‌ناپذیر: velocity inlet و outflow
- برای جریان تراکم‌پذیر: mass flow inlet و pressure far-field
- حالات خاص: inlet vent، outlet vent، intake fan و exhaust fan

این‌که برای هر نوع شرط مرزی نیاز است چه اطلاعاتی وارد شود، بستگی به مدل‌های فیزیکی انتخاب‌شده برای حل مسئله مثلا آشفته یا آرام بودن جریان دارد.

۱.۹ تعیین فشار کاری (Operating Pressure)

فشارهای مشخص‌شده در شرایط مرزی و مقادیر اولیه جریان، نسبت به فشار کاری هستند.

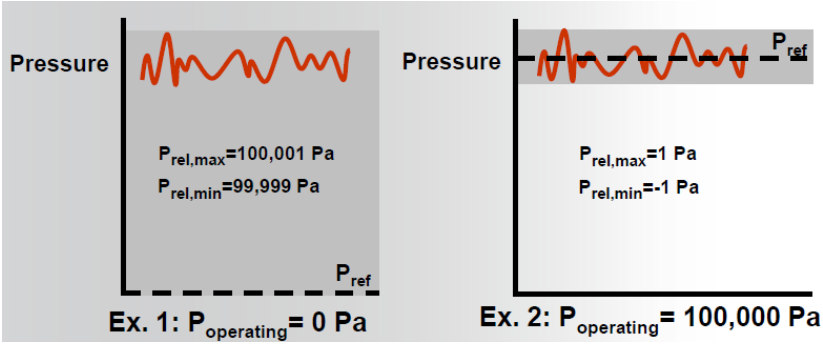
$$p_{absolute} = p_{operating} + p_{relative}$$



فشارهای نسبی و مطلق [۲]

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

استفاده از فشار کاری برای کاهش خطای گرد کردن (Round-off Error) است. این خطا هنگامی که اختلاف‌های فشار دینامیکی جریان در مقایسه با فشار مطلق کم است، اهمیت پیدا می‌کند که در شکل زیر نشان داده شده است [٤].



اثر تعیین فشار کاری [۴]

۲.۹ شرط مرزی فشار ورودی (Pressure Inlet)

در این شرط مرزی در حالت کلی باید فشار کل نسبی، دما و سایر کمیت‌های اسکالر تعیین شود. برای محاسبه فشار کل می‌توان از روابط زیر استفاده کرد:

$$p_{total} = p_{static} + \frac{1}{2}\rho V^2 ; \textit{for incompressible flow}$$

$$p_{total} = p_{static}\left(1+\frac{\gamma-1}{2}M^2\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} ; \textit{for compressible flow}$$

که در آن γ نسبت ضرایب حرارتی مخصوص ($\gamma=c_p/c_v$) و M عدد ماخ جریان است. اگر جریان فراصوتی باشد، فشار استاتیک هم باید تعیین شود.

این شرط مرزی برای جریان تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر مناسب است. شار جرمی عبوری از مرز بر اساس حل داخل میدان و جهت مشخص‌شده برای جریان تعیین می‌شود. بنابراین جهت جریان باید با دقت مشخص

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

شود وگرنه ممکن است جواب‌های غیرفیزیکی حاصل شود. ممکن است در برخی حالات خروج جریان (Outflow) از این مرز اتفاق افتد. در این حالت جهت جریان از حل داخلی گرفته می‌شود.

برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر غیرهم‌دما (Non-isothermal) باید دمای ورودی نیز در این شرط مرزی مشخص شود. برای جریان‌های تراکم‌پذیر باید دمای کل (T_0) تعیین شود:

$$T_0 = T_S\left(1+\frac{\gamma-1}{2}M^2\right)$$

که در آن T_S دمای استاتیک جریان است [۲].

۳.۹ شرط مرزی فشار خروجی (Pressure Outlet)

در این شرط مرزی باید فشار نسبی استاتیک به‌عنوان فشار استاتیک محیطی که سیال به آن تخلیه می‌شود، مشخص شود. معمولا یک فشار استاتیک ثابت اعمال می‌شود، ولی استفاده از یک توزیع شعاعی فشار استاتیک خصوصا هنگامی که جریان به‌شدت چرخشی است، توصیه می‌شود. وقوع جریان برگشتی (Backflow) در این شرط مرزی مرسوم است. جریان برگشتی عمود بر مرز فرض می‌شود. با تعیین شرایط واقعی برای کمیت‌های جریان برگشتی در این شرط مرزی، مشکلات همگرایی حل کم‌تر می‌شوند. هنگامی که جریان برگشتی اتفاق می‌افتد، مقدار مشخص‌شده برای فشار استاتیک به‌عنوان فشار کل استفاده می‌شود. همیشه هنگامی که از مرز فشار ورودی استفاده شده است، باید از شرط مرزی فشار خروجی استفاده شود.

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

۴.۹ شرط مرزی سرعت ورودی (Velocity Inlet)

در این شرط مرزی بردار سرعت و کمیت‌های اسکالر جریان تعیین می‌شوند. این شرط مرزی برای زمانی که پروفیل سرعت در ورودی مشخص است، مناسب است، اگرچه یک سرعت ثابت یکنواخت هم در آن قابل استفاده است. برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر مناسب است و استفاده از آن در جریان‌های تراکم‌پذیر ممکن است باعث جواب‌های غیرفیزیکی شود.

در شرط مرزی سرعت ورودی کمیت‌های کل جریان تعیین نمی‌شوند و با تغییر توزیع سرعت مشخص‌شده تغییر می‌کنند. از این شرط مرزی بسیار نزدیک به جسم نباید استفاده کرد، زیرا باعث حل غیرفیزیکی می‌شود. با وارد کردن یک سرعت منفی، می‌توان از این شرط مرزی به‌عنوان شرط مرزی Velocity Outlet استفاده کرد.

۵.۹ شرط مرزی جریان خروجی (Outflow)

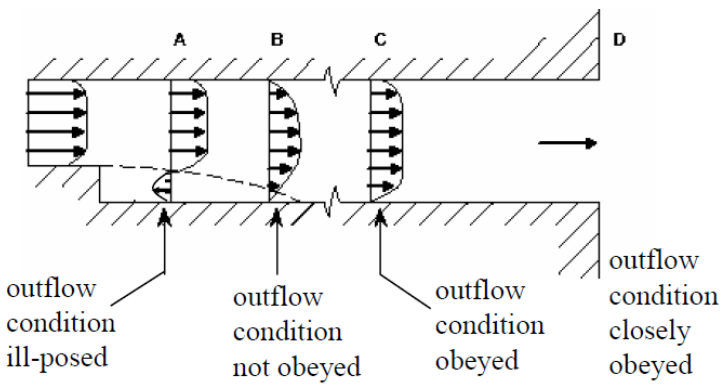
این شرط مرزی زمانی استفاده می‌شود که قبل از حل جریان، جزئیات سرعت و فشار جریان در خروجی مشخص نباشد. هنگامی که مرز خروجی نزدیک یک جریان کاملا توسعه‌یافته (Fully Developed) باشد، استفاده از این شرط مرزی مناسب است، زیرا در این شرط مرزی برای تمام کمیت‌های جریانی غیر از فشار فرض گرادیان عمودی صفر می‌شود. حل‌گر اطلاعات و کمیت‌های مورد نیاز را با استفاده از مقادیر داخلی برون‌یابی (Extrapolate) می‌کند. تصحیحی (Correction) برای توازن کلی جرم در این شرط مرزی اعمال می‌شود.

۱.۵.۹ محدودیت‌های شرط مرزی جریان خروجی

شرط مرزی جریان خروجی محدودیت‌هایی دارد که در زیر به آن‌ها اشاره می‌شود:

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

- این شرط مرزی برای جریان تراکم‌پذیر قابل استفاده نیست،
- این شرط مرزی به همراه شرط مرزی فشار ورودی قابل استفاده نیست، زیرا ترکیب این دو به‌صورت یکتا گرادیان فشار در کل دامنه را تنظیم نمی‌کند. به‌جای شرط مرزی فشار ورودی می‌توان از شرط مرزی سرعت ورودی استفاده کرد.
- در جریان ناپایا (Unsteady) که در آن چگالی متغیر است، نباید از این شرط مرزی استفاده کرد.
- هنگامی که جریان برگشتی وجود دارد، نمی‌توان از این شرط مرزی استفاده کرد. به‌جای آن می‌توان از شرط مرزی فشار خروجی استفاده کرد.
- هنگامی که گرادیان‌ها در جهت جریان چشم‌گیر باشند، نمی‌توان از این شرط مرزی استفاده کرد.
- هنگامی که شرایط پایین‌دست مرز خروجی روی جریان داخل میدان حل اثر دارد، نباید از این شرط مرزی استفاده کرد.



جاهای مناسب برای استفاده از شرط مرزی جریان خروجی [۲]

۲.۵.۹ مدل‌سازی چندین خروجی

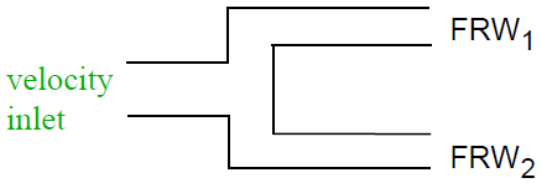
وقتی چند خروجی در دامنه حل وجود دارد، استفاده از شرط مرزی جریان خروجی به‌صورت پیش‌فرض باعث تقسیم مساوی دبی جرمی بین تمام شرط مرزی‌های جریان خروجی می‌شود. بنابراین به‌صورت

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

پیش‌فرش FRW (Flow Rate Weighting) برای تمام خروجی‌ها برابر ۱ خواهد بود. هنگامی که دبی جرمی خروجی‌ها یکسان نباشد، می‌توان FRW هر خروجی را مشخص کرد. در این حالت:

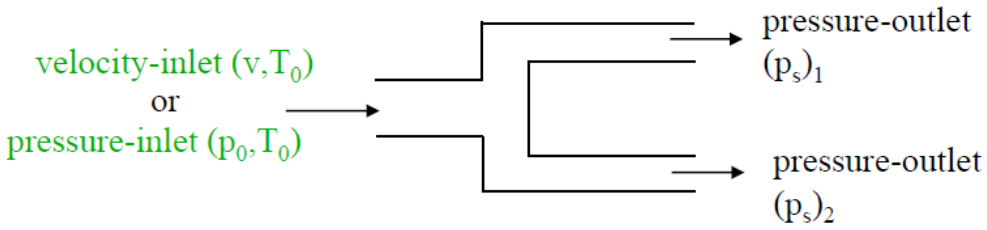
$$Percentage\ flow through\ boundary\ i = \frac{FRW_i}{\sum FRW}$$

در این حالت فشار استاتیک هر خروجی بر اساس دبی جرمی همان خروجی تنظیم خواهد شد.



تعیین FRW برای هر خروجی در شرط مرزی جریان خروجی [۲]

برای مدل کردن خروجی‌ها از شرط مرزی فشار خروجی نیز می‌توان استفاده کرد.



استفاده از شرط مرزی فشار خروجی برای مدل‌سازی چند خروجی [۲]

۶.۹ سایر شرط مرزی‌های ورودی و خروجی

در این قسمت گزینه‌های دیگری که می‌توان به‌عنوان شرط مرزی برای مدل‌سازی ورودی‌ها و خروجی‌های جریان استفاده کرد، به‌صورت خلاصه معرفی می‌شوند:

- شرط مرزی Mass Flow Inlet

✓ در جریان‌های تراکم‌پذیر برای تعیین دبی جرمی در ورودی استفاده می‌شود.

✓ برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر نیاز نمی‌شود.

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

- شرط مرزی Pressure Far Field

✓ هنگامی که چگالی از رابطه گاز ایده‌آل محاسبه می‌شود، در دسترس است.

✓ برای مدل کردن جریان آزاد تراکم‌پذیر در دوردست استفاده می‌شود و در آن باید عدد ماخ و فشار استاتیک دوردست مشخص شود.

- شرط مرزی Exhaust Fan/Outlet Vent

✓ در این شرط مرزی، External Exhaust Fan/Outlet Vent با تعیین پرش در فشار/ضریب اتلاف، دما و فشار تخلیه محیط مدل می‌شود.

- شرط مرزی Inlet Vent/Intake fan

✓ در این شرط مرزی، Inlet Vent/ External Intake fan با تعیین ضریب اتلاف/ پرش در فشار، جهت جریان، دما و فشار ورودی محیط مدل می‌شود.

۷.۹ تعیین پارامترهای آشفتگی در شرایط مرزی

هنگامی که جریان آشفته وارد دامنه یا از آن خارج می‌شود، برخی از شرایط مرزی مثل Pressure Far Field نیاز به تعیین پارامترهای آشفتگی به یکی از روش‌های زیر دارند:

- Set k (Turbulent Kinetic Energy) and ε (Turbulence Dissipation Rate) explicitly
- Set turbulence intensity and turbulence length scale
- Set turbulence intensity and turbulent viscosity ratio
- Set turbulence intensity and hydraulic diameter

شدت آشفتگی (Turbulence Intensity) که با I نشان داده می‌شود، به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۲]:

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

$$I = \frac{\sqrt{\frac{2}{3}k}}{u}$$

که در آن k انرژی جنبشی آشفتگی و u اندازه سرعت محلی است. شدت آشفتگی و مقیاس طول وابسته به شرایط جریان بالادست است [۲]:

- در خروجی یک توربین معمولا I=20 % و Length Scale=1-10 % of blade span
- پایین‌دست یک صفحه سوراخ‌دار معمولا I=10 % و Length Scale=Screen/Hole Size
- جریان کاملا توسعه‌یافته در یک مجرا یا لوله معمولا I=5 % و Length Scale=Hydraulic Diameter

۸.۹ شرط مرزی دیواره (Wall Boundary Condition)

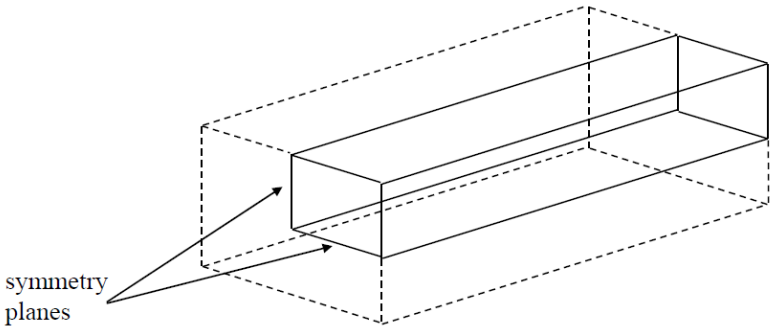
در جریان لزج شرط عدم لغزش (No-slip Condition) در دیواره اعمال می‌شود. در این حالت سرعت مماس بر دیواره برابر با سرعت دیواره و سرعت عمود بر دیواره صفر است. همچنین می‌توان در دیواره تنش برشی مشخص کرد. برای اعمال شرط دمایی روی دیواره چندین گزینه مثل دمای ثابت، شار ثابت و ... در دسترس است. برای محاسبه انتقال حرارت یک‌بعدی در صفحه نازک می‌توان جنس و ضخامت دیواره را مشخص کرد. همچنین می‌توان برای جریان‌های آشفته زبری دیواره را نیز مشخص کرد. علاوه بر همه این‌ها در صورت نیاز می‌توان سرعت انتقالی یا چرخشی برای دیواره در نظر گرفت.

۹.۹ شرط مرزی تقارن (Symmetry)

اعمال شرط تقارن در مسئله باعث کاهش هزینه محاسباتی می‌شود، زیرا در صورت وجود تقارن در هندسه و جریان، با اعمال این شرط مرزی به‌جای هندسه کامل، قسمتی از آن مدل‌سازی می‌شود. سرعت عمود بر

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

صفحه تقارن و نیز گرادیان تمام کمیت‌های جریانی عمود بر آن صفر است. این شرط مرزی ورودی خاصی نیاز ندارد، ولی در استفاده از آن باید دقت کرد و از تقارن مسئله مطمئن شد. از این شرط مرزی برای مدل‌سازی دیوار لغزشی در جریان لزج هم استفاده می‌شود. در این مقاله در مورد نحوه درست تعیین این شرط مرزی بیش‌تر صحبت شده است.



تعیین صفحات تقارن [۲]

۱۰.۹ شرط مرزی متناوب (Periodic Boundary Condition)

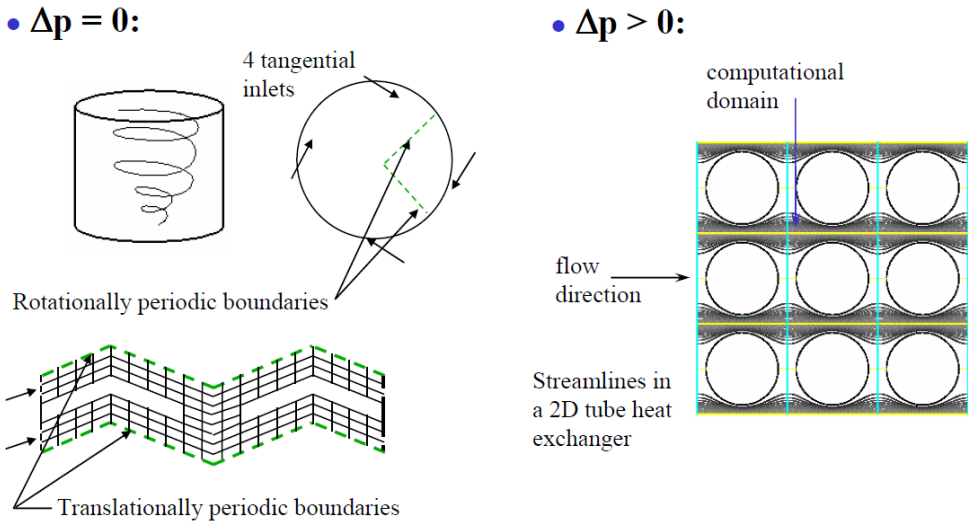
این شرط مرزی هنگامی استفاده می‌شود که هندسه، الگوی مورد انتظار برای جریان و میدان دمایی ذاتا دارای تناوب تکرارشونده باشند. استفاده از این شرط مرزی باعث کاهش هزینه محاسباتی می‌شود. دو نوع شرط مرزی متناوب وجود دارد.

- در عبور از صفحه متناوب $\Delta p=0$ است
  - ✓ این حالت برای مرزهای متناوب انتقالی (Translationally) و چرخشی (Rotationally) قابل استفاده است
  - ✓ برای مرزهای متناوب چرخشی نیاز به تعریف محور چرخش در ناحیه (Zone) سیال است
- در عبور از صفحه متناوب Δp مقدار مشخص غیر صفری دارد
  - ✓ تنها برای مرزهای متناوب انتقالی قابل استفاده است

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

- ✓ شرایط کاملا توسعه‌یافته را مدل‌سازی می‌کند
- ✓ مقدار متوسط Δp برای هر مرز متناوب و یا دبی جرمی برآیند باید تعیین شود

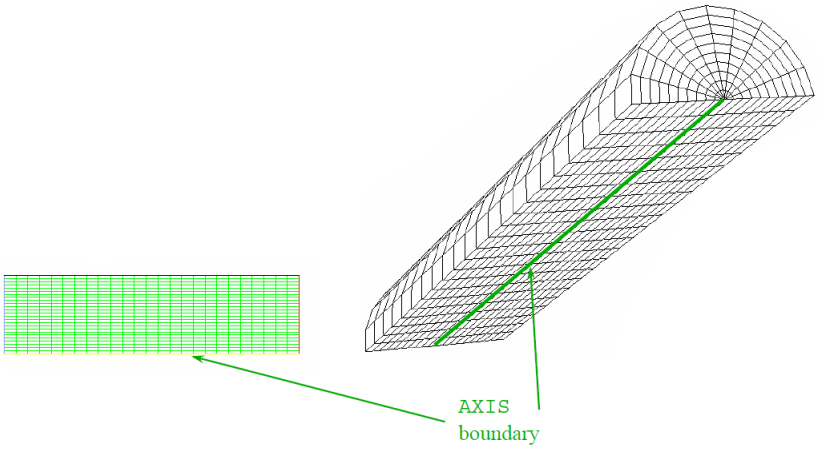
مثال‌هایی از شرط مرزی متناوب در شکل‌های زیر آمده است.



مثال‌هایی از شرط مرزی متناوب [۲]

۱۱.۹ شرط مرزی محور (Axis Boundary Condition)

این شرط مرزی به‌عنوان خط مرکزی و محور چرخش برای یک جسم دوبعدی تقارن‌محوری (2-D Axisymmetric) استفاده می‌شود. برای استفاده از این شرط مرزی نیازی به ورود اطلاعات خاصی نیست.



شرط مرزی محور [۲]

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

۱۲.۹ تعریف Cell Zone سیال

ناحیه سیال مجموعه‌ای از سلول‌ها است که معادلات فعال در آن‌ها حل می‌شوند. جنس سیال را باید در این قسمت مشخص کرد. علاوه بر این، مواردی به‌صورت اختیاری مثل چشمه‌های جرم، مومنتم، انرژی و ... هم می‌توان در این قسمت در صورت نیاز تعریف کرد. اگر جریان گذرا است، لازم است ناحیه سیال به‌صورت آرام تعریف شود. ناحیه سیال را می‌توان محیط متخلخل (Porous Media) تعریف کرد. برای جریان‌های متناوب چرخشی لازم است محور چرخش مشخص شود. برای ناحیه سیال همچنین می‌توان حرکت تعریف کرد.

۱۳.۹ تعریف محیط متخلخل (Porous Media)

محیط متخلخل به‌عنوان نوع خاصی از ناحیه سیال مدل می‌شود. در فلوئنت باید در قسمت تنظیمات Fluid، گزینه محیط متخلخل را در صورت نیاز فعال کرد. بنابراین هنگام ساخت هندسه و مش باید قسمت متخلخل را به‌صورت جدا از بقیه سیال تعریف کرد. این گزینه علاوه بر مدل‌سازی محیط متخلخل برای مدل‌سازی سایر مقاومت‌های گسترده (Distributed Resistances) مانند موارد زیر هم استفاده می‌شود:

- Packed Beds
- Filter Papers
- Perforated Plates
- Flow Distributors
- Tube Banks

یک نمونه محیط متخلخل [۲]

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

۱۴.۹ نواحی متحرک (Moving Zones)

اگر مسئله شامل تنها یک ناحیه و اصطلاحا Single Zone باشد، می‌توان از Rotating Reference Frame برای مدل‌سازی نواحی متحرک استفاده کرد. در این حالت باید تمام ناحیه را به‌عنوان یک Moving Reference Frame تعریف کرد. این نوع مدل‌سازی کاربردهای محدودی دارد.

برای مسائل شامل چند ناحیه (Multiple Zone Problems) هر ناحیه می‌تواند دارای Moving Reference Frame و اصطلاحا مدل Multiple Reference Frame باشد. این حالت کم‌ترین دقت و کم‌ترین هزینه محاسباتی را دارد. در این حالت همچنین می‌توان از Mixing Plane Model استفاده کرد که در آن اطلاعات میدان جریان در خروجی یک ناحیه متوسط‌گیری و به‌عنوان اطلاعات مرز ورودی برای ناحیه مجاور استفاده می‌شوند.

به‌عنوان یک رهیافت دیگر هر ناحیه می‌تواند با استفاده از Sliding Mesh Model به‌عنوان یک Moving Mesh تعریف شود. در این حالت نیاز به تعریف Interface است و موقعیت مش به‌عنوان تابعی از زمان محاسبه می‌شود. در این حالت حرکت نسبی باید مماسی باشد.

۱۵.۹ تعریف Cell Zone جامد

ناحیه جامد مجموعه‌ای از سلول‌ها است که در آن‌ها تنها انتقال حرارت هدایت حل می‌شود و هیچ معادله‌ای از جریان در آن‌ها حل نمی‌شود. تنها مورد ضروری که باید در این ناحیه تعریف شود، جنس جامد است. به‌صورت اختیاری می‌توان نرخ تولید حرارت حجمی (چشمه حرارتی) نیز تعریف کرد. در صورت وجود مرزهای متناوب چرخشی مجاور ناحیه جامد لازم است محور چرخش مشخص شود. برای ناحیه جامد همچنین می‌توان حرکت تعریف کرد.

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

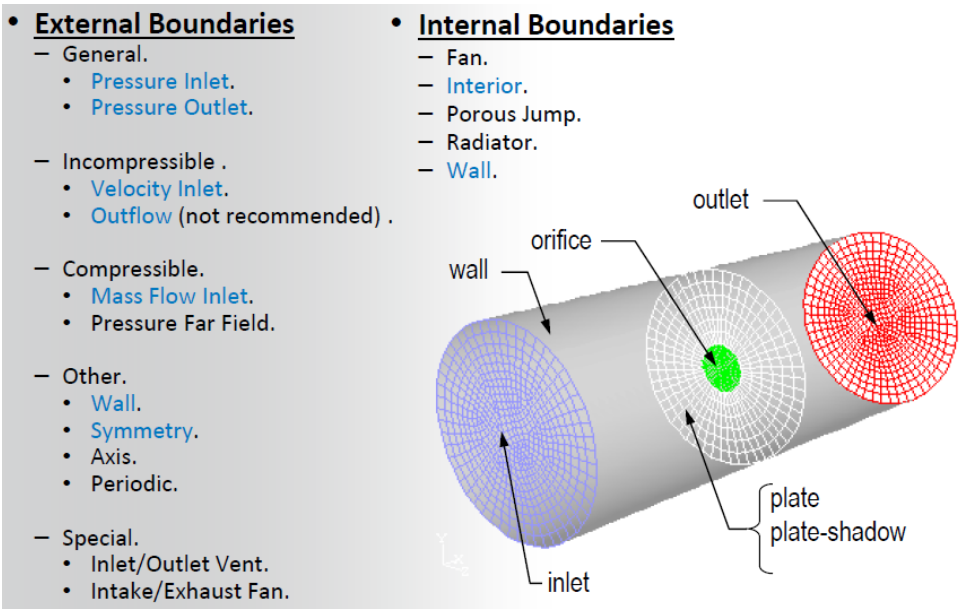
۱۶.۹ شرط مرزی‌های دسته Internal Face

این شرط مرزی‌ها روی وجه (Face) سلول‌ها تعریف می‌شوند، ضخامتی ندارند و به‌منظور ایجاد تغییرات پله‌ای در خواص جریان استفاده می‌شوند. مدل‌های فیزیکی زیر را با استفاده از این نوع شرط مرزی می‌توان اعمال کرد:

- Fans
- Radiators
- Porous Jumps
- Interior

باید توجه داشت که شرط مرزی Interface که در فلوئنت موجود است، در این دسته قرار نمی‌گیرد. این شرط مرزی برای Multiple Reference Frame، Sliding Mesh و مش‌های Non-conformal استفاده می‌شود.

در شکل زیر مواردی که تا اینجا در مورد انتخاب نوع شرط مرزی ذکر شد، به‌صورت خلاصه آمده است:



انواع شرایط مرزی فلوئنت و دامنه کاربرد آن‌ها [۴]

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

۱۷.۹ ترکیب درست شرایط مرزی در فلوئنت

اگر مسئله مورد بررسی شامل یک ورودی و یک خروجی باشد، ترکیب‌های مختلفی از شرایط مرزی قابل انتخاب است که در زیر مورد بررسی قرارگرفته‌اند:

- پایدارترین انتخاب- ورودی: Velocity Inlet و خروجی: Pressure Outlet
- انتخاب پایدار - ورودی: Mass Flow Inlet و خروجی: Pressure Outlet
- انتخاب حساس به حدس اولیه - ورودی: Pressure Inlet و خروجی: Pressure Outlet
- انتخاب‌های غیرقابل‌اعتماد
  - ✓ ورودی: Pressure Inlet و خروجی: Outflow
  - ✓ ورودی: Mass Flow Inlet و خروجی: Outflow (در صورتی که چگالی ثابت باشد، این انتخاب قابل قبول است)
  - ✓ ورودی: Velocity Inlet و خروجی: Velocity Outlet (از لحاظ عددی ناپایدار است)

۱۸.۹ تعیین خواص مواد

برای هر ناحیه (Zone) یک ماده و برای هر ماده موارد زیر لازم است مشخص شوند:

- چگالی
- ضریب لزجت
- ظرفیت حرارتی
- وزن مولکولی
- هدایت حرارتی
- ضرایب دیفیوژن (Diffusion)

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

بسته به مدل‌های فیزیکی استفاده‌شده برای حل مسئله، ممکن است تمام موارد بالا نیاز نباشد که مشخص شوند. برای مخلوط‌ها ممکن است نیاز باشد خواص به‌عنوان تابعی از ترکیب مخلوط تعیین شود. در نرم‌افزار فلوئنت برای مشخص کردن خواص مختلف سیال انتخاب‌های زیر در دسترس است:

Density – Constant. – Incompressible Ideal Gas. – Ideal Gas. – Real Gas (5 Built–in Models). – Temperature Dependent[1]. – Boussinesq. – User–defined.	**Viscosity** – Constant. – Temperature–Dependent[1]. – Sutherland. – Power Law. – Kinetic Theory. – Non–Newtonian (4 Built–in Models). – User–defined.
Thermal Conductivity – Constant. – Temperature–Dependent[1]. – Kinetic Theory. – User–defined.	**Specific Heat** – Constant. – Temperature–Dependent[1]. – User–defined.

[1] **Temperature–Dependent options include definition of properties as piecewise linear, polynomial or piecewise polynomial functions temperature.**

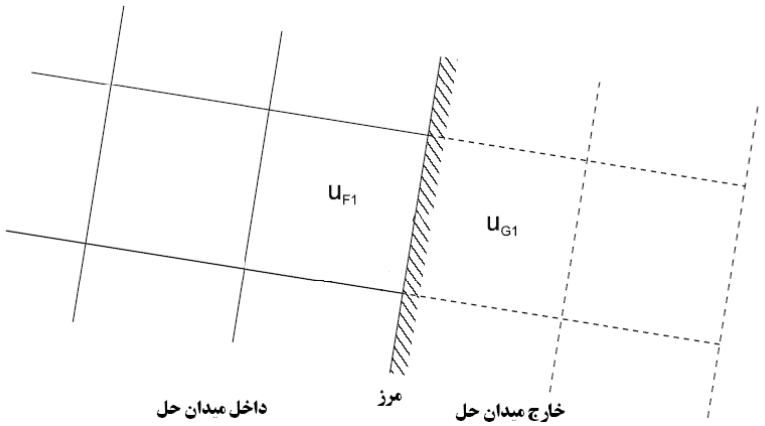
انتخاب‌های مختلف در دسترس برای خواص مواد در فلوئنت [۴]

۱۹.۹ اعمال شرایط مرزی در یک کد عددی

آنچه تا اینجا در این مقاله ذکر شد، درباره انتخاب درست نوع شرط مرزی بود که در نرم‌افزارهای تجاری مانند فلوئنت و نیز کدهای عددی کاربرد دارد. در این قسمت در مورد نحوه اعمال شرایط مرزی در یک کد عددی با ذکر چند نمونه شرط مرزی صحبت خواهد شد.

یکی از راه‌های اعمال شرایط مرزی در یک کد عددی استفاده از سلول‌های مجازی (Ghost Cells) است. این سلول‌ها به‌صورت فرضی در بیرون از دامنه حل و در مجاورت هر مرز در نظر گرفته می‌شوند تا با مقداردهی به آن‌ها اعمال شرایط مرزی راحت‌تر انجام شود. مقادیر کمیت‌های جریان در این سلول‌ها با توجه به نوع شرط مرزی تعیین می‌شود.

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



دامنه‌ی حل با سلول‌های اصلی (خط پر) و سلول‌های مجازی اطراف آن (خط‌چین)

۱.۱۹.۹ شرط مرزی دیواره

برای سیال لزجی که از روی یک دیواره عبور می‌کند، طبق شرط عدم لغزش، سرعت سیال مجاور دیواره برابر سرعت دیواره است. برای دیواره ساکن باید سرعت سیال در دیواره صفر باشد. بر این اساس اولا شار غیر لزج در وجهی از سلول که منطبق بر دیواره است به‌صورت زیر درمی‌آید:

$$F_c = \begin{bmatrix} 0 \\ n_x P \\ n_y P \\ n_z P \\ 0 \end{bmatrix},$$

ثانیا مقادیر کمیت‌های جریان (با فرض دیواره آدیاباتیک) در سلول‌های مجازی به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned} \rho_{G1} &= \rho_{F1} \\ v_{G1} &= -v_{F1} \\ u_{G1} &= -u_{F1} \\ P_{G1} &= P_{F1} \\ H_{G1} &= H_{F1}. \end{aligned}$$

در رابطه بالا H آنتالپی کل جریان است.

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

۲.۱۹.۹ شرط مرزی Pressure Far Field

در مورد شرط مرزی دوردست به دو نکته باید توجه داشت. یکی این‌که مرز به‌اندازه‌ی کافی دور در نظر گرفته شود تا تاثیری در حل نداشته باشد و دیگری این‌که هر اغتشاشی که از آن خارج می‌شود، نباید برگشتی به داخل میدان حل داشته باشد. برای این مرز:

$$\rho_{G1} = \rho_{\infty}$$
$$v_{G1} = v_{\infty}$$
$$u_{G1} = u_{\infty}$$
$$P_{G1} = P_{\infty}$$
$$H_{G1} = H_{\infty}.$$

۳.۱۹.۹ شرط مرزی فشار خروجی

در این مرز اگر جریان محلی فراصوتی باشد، تمام مقادیر جریانی در سلول‌های مجازی باید برابر با مقادیر داخل دامنه حل باشد و اگر جریان محلی فروصوتی باشد، یک کمیت (معمولا فشار) به سلول‌های مجازی تحمیل و بقیه کمیت‌های جریانی در سلول‌های مجازی برابر با مقادیر داخل دامنه حل در نظر گرفته می شود؛ یعنی:

$$\rho_{G1} = \rho_{F1}$$
$$v_{G1} = v_{F1}$$
$$u_{G1} = u_{F1}$$
$$P_{G1} = P_{imposed}.$$

با داشتن مقادیر بالا آنتالپی کل در سلول‌های مجازی به‌صورت زیر به دست می‌آید:

$$H_{G1} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}\frac{P_{G1}}{\rho_{G1}} + \frac{u_{G1}^2 + v_{G1}^2}{2}.$$

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

۴.۱۹.۹ شرط مرزی محور

در این مرز باید شار عبوری و سرعت عمود بر آن صفر باشد. بنابراین شار غیرلزج در این مرز مانند دیواره به دست می‌آید و مقادیر سلول‌های مجازی به‌صورت زیر قرار داده می‌شوند:

$$\rho_{G1} = \rho_{F1}$$
$$v_{G1} = -v_{F1}$$
$$u_{G1} = u_{F1}$$
$$P_{G1} = P_{F1}$$
$$H_{G1} = H_{F1}.$$

۵.۱۹.۹ شرط مرزی بین بلوکی

در این مرز سلول‌های مجازی در هر بلوکی که قرار گرفتند، مقادیر جریانی همان بلوک به‌عنوان مقادیر سلول‌های مجازی در نظر گرفته می‌شوند.

۲۰.۹ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله در مورد اهمیت تعیین درست شرایط مرزی و تاثیر آن در حل جریان صحبت شد. انواع شرط مرزی و تفاوت‌های آن‌ها بیان شد. علاوه بر آن تنظیمات لازم برای تعیین جنس مواد، فشار کاری و خواص سیال و جامد مورد بررسی قرار گرفت. در انتها نحوه اعمال برخی از شرایط مرزی در یک کد عددی به‌عنوان نمونه ذکر شد.

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] "Boundary Conditions, Introductory FLUENT Notes", 2006.

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

[۳] Soltani, M.R., Abbas Daliri and Sepahi Younsi, J., "Effects of Shock Wave/Boundary-Layer Interaction on Performance and Stability of a Mixed-Compression Inlet", Scientia Iranica B, Vol. 23, No. 4, 2016, pp. 1811-1825.

[٤] Introduction to Ansys Fluent, Lecture 2 : Boundary Conditions & Solver Settings, 14.5 Release,

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