«به نام خدا»

گروه دینامیک سیالات محاسباتی

دانشگاه صنعتی اصفهان

شرائط مرزی و پارامترهای آشفتگی

در نرم افزار FLUENT

محمد جدیدی

هرگونه نقل و یا نشر مطالب این مقاله آزاد است، به شرطی که در صورت

استفاده، از نویسنده و همچنین هسته دینامیک سیالات محاسباتی دانشگاه صنعتی اصفهان قدردانی گردد.

http://CFD.iut.ac.ir

مقدمه:

برای حل عددی فرم گسسته معادلات دیفرانسیلی پاره‌ای، تعیین شرائط مرزی و اولیه الزامیست. این موضوع در بحث ریاضی یک اصل محسوب می‌شود. در شبیه‌سازی عددی جریان سیال نیز علاوه بر مطرح بودن بحث ریاضی حل معادلات، باید نوع و فیزیک جریان نیز در مرزهای دامنه محاسباتی به حلگر شناسانده شود. بنابراین هدف از تعریف شرائط مرزی در دینامیک سیالات عددی، مقید ساختن فرم گسسته معادلات برای حل آن در یک چهارچوب خاص و نیز تعریف ویژگی جریان در مرزهای دامنه محاسباتی می‌باشد. فرمهای متعددی از شرائط مرزی برای شبیه‌سازی جریان وجود دارد. بعضی از شرائط مرزی حالت خاص داشته و بعضی از آن نیز بطور گسترده‌ای برای آنالیز انواع جریان استفاده می‌شود. استفاده از شرط مرزی مناسب تابعی از نوع رژیم جریان، اطلاعات موجود در ورودی و خروجی جریان و نیز سازگاری نوع حلگر و الگوریتم عددی استفاده شده با شرط مرزی است. در صورت انتخاب نامناسب شرط مرزی، نه تنها دقت شبیه‌سازی کاهش می‌یابد بلکه در مواقعی نیز موجب همگرائی کند و یا حتی واگرائی در روند حل می‌شود.

یکی از مزیتهای نرم‌افزار فلوئنت، جامع بودن شرائط مرزی موجود در این نرم‌افزار می‌باشد. خوشبختانه در این نرم‌افزار، تقریباً تمامی شرائط مرزی موجود در نظر گرفته شده است. البته در نسخه ۶ نرم‌افزار فلوئنت قابلیتهای جدیدی در تعریف شرائط مرزی نسبت به نسخه ۵.۲۳ این نرم‌افزار وجود دارد. در این فصل سعی شده تا انواع شرائط مرزی موجود در این نرم‌افزار بهمراه تئوری و راهکارهای استفاده از آنها و همچنین قابلیتهای اضافه شده به نسخه ۶ این نرم‌افزار، بطور کامل تشریح گردد.

۱-۷ کلیات تعریف شرائط مرزی در فلوئنت

شرائط مرزی، متغیرهای حرارتی و جریان سیال را روی مرزهای دامنه محاسباتی را مشخص می‌کند. بنابراین تعیین شرائط مرزی یک موضوع حساس در شبیه‌سازی عددی جریان سیال بوده و تعریف مناسب آن از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. بطور کلی شرائط مرزی در نرم‌افزار فلوئنت به چند دسته زیر تقسیم می‌شود:

- مرزهای ورودی و خروجی جریان؛ عبارتست از شرائط مرزی فشار ورودی، سرعت ورودی، دبی جرمی ورودی، دریچه ورودی، فن ورودی، فشار خروجی، فشار در بی‌نهایت[۱]، جریان خروجی[۲]، دریچه خروجی و فن خروجی.
- مرزهای دیواره، تکرار و قطبی؛ عبارتست از شرائط مرزی دیواره، پریودیک، تقارن[۳] و شرط مرزی تقارن محوری[۴].
- نواحی داخلی؛ عبارتست از نواحی سیال، جامد (در نرم‌افزار فلوئنت، نواحی متخلخل نیز جزء نواحی سیال در نظر گرفته شده است).
- سطوح داخلی؛ عبارتست از شرائط مرزی فن، رادیاتور، پرش متخلخل[۵]، دیواره و درونی[۶]

شرائط مرزی سطوح داخلی روی وجوه المانهای داخلی تعریف می‌شود. با تعریف این نوع مرزها، ضخامت وجوه المانها کم نبوده و پارامترهای جریان در قبل و بعد از وجوه المانها با یکدیگر تفاوت چشمگیری دارد. از این نوع مرزها برای تحمیل شرائط فیزیکی متناظر با وسایلی نظیر فنها، نواحی متخلخل کم ضخامت و رادیاتورها استفاده می‌شود. البته شرط مرزی درونی از این قاعده مستثنی است. استفاده از شرط مرزی درونی بدین معناست که سطح انتخاب شده هیچ گونه مانعی در جریان سیال نداشته و بواقع سطح انتخاب شده جزء مرز نمی‌باشد.

---

[۱]–Pressure Far Field

[۲]-Outflow

[۳]-Symmetry

[۴]-Axis

[۵]–Porous Jump

[۶]-Interior

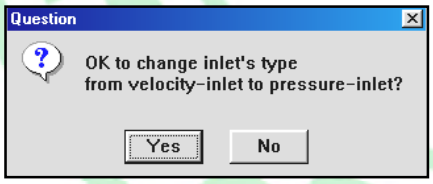
۷-۱-۱ چگونگی استفاده از پانل شرائط مرزی

با استفاده از پانل شرائط مرزی (شکل ۷-۱) می‌توان شرائط مرزی را تعریف و یا تصحیح کرد. برای استفاده از این پانل کافیست روی گزینه Boundary Conditions در منوی Define کلیک کرد:

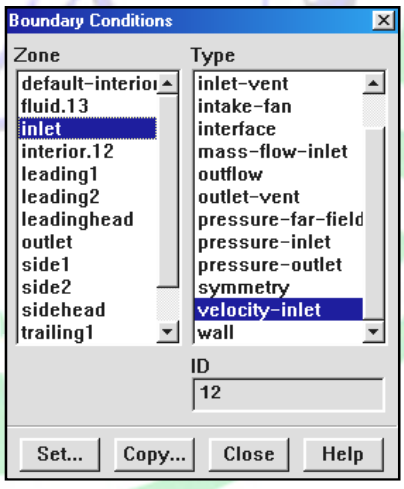
Define → Boundary Conditions...

پس از انتخاب مرز در کادر فهرست Zone، نوع آن بطور خودکار در کادر فهرست Type پانل شرائط مرزی مشخص می‌شود. با کلیک کردن روی سوئیچ Set پانل شرط مرزی مربوطه باز شده و می‌توان پارامترهای مرز انتخاب شده را تنظیم نمود. البته با دوبار کلیک کردن روی نوع شرط مرزی در کادر فهرست Type نیز، پانل شرط مرزی مربوطه باز می‌شود. قبل از تنظیم شرط مرزی باید درستی نوع مرز انتخاب شده چک شود. در صورتیکه لازم باشد نوع مرز انتخاب شده تغییر یابد، باید نوع مرز مناسب در کادر فهرست Type مشخص گردد. با انتخاب نوع جدید کادر محاوره پرسشی مبنی بر اطمینان کاربر در تغییر نوع شرط مرزی در پنجره اصلی ظاهر می‌شود (شکل ۷-۲). با کلیک کردن روی گزینه Yes، پانل مربوط به نوع شرط مرزی انتخاب شده باز می‌شود و کاربر می‌تواند شرط مرزی را تعریف کند.

باید توجه داشت که برای تغییر نوع مرزها نیز محدودیتهایی وجود دارد. بعنوان مثال نمی‌توان یک مرز پریودیک را به نوع دیگری تغییر داد. برای اینکار لازمست که در ابتدا کوپلینگ بین مرزهای پریودیک از بین رفته و سپس آنرا به مرز دیگری تبدیل کرد. بطور کلی نوع هر مرز تنها با یکی از مرزهای هم دسته خود قابل تغییر است. این دسته بندی مرزها در جدول (۷-۱) درج شده است. بعنوان مثال شرط مری درونی را می‌توان تنها به یکی از شرایط مرزی دیواره، پرش متخلخل، فن و یا رادیاتور تغییر داد.



شکل ۷-۲ کادر محاوره‌ای پرسشی برای تغییر نوع شرط مرزی



شکل ۷-۱ پانل Boundary Conditions.

جدول ۱-۷ دسته‌بندی انواع شرائط مرزی در فلوئنت.

Zone Types	Category
axis, outflow, mass flow inlet, pressure far-field, pressure inlet, pressure outlet, symmetry, velocity inlet, wall, inlet vent, intake fan, outlet vent, exhaust fan	Faces
fan, interior, porous jump, radiator, wall	Double-Sided Faces
periodic	Periodic
fluid, solid (porous is a type of fluid cell)	Cells

انتخاب ناحیه مرزی در پنجره نمایش گرافیکها

با استفاده از ماوس در پنجره نمایش گرافیکها نیز می‌توان ناحیه مرزی را مشخص نمود. در مواقعی که تعداد مرزها زیاد بوده و چند ناحیه مرزی از یک نوع شرط مرزی باشد، یا کاربر آشنایی کافی با اسامی تعریف شده برای مرزها ندارد، از این روش استفاده می‌شود. برای انجام اینکار باید بصورت زیر عمل کرد:

- پانل شرائط مرزی باز شود.
- شبکه با استفاده از دستور Display/Grid نمایش داده شود.
- نشانگر ماوس را روی مرز مورد نظر برده و روی کلید سمت راست ماوس (طبق پیش‌فرض) کلیک شود.

با انجام اینکار مرز انتخاب شده و نوع آن، بطور خودکار در کادرهای فهرست Zone و Type مشخص می‌شود. ادامه روند تنظیم شرط مرزی همانند توضیحات بالا می‌باشد.

تغییر نام ناحیه مرزی

در صورتیکه نواحی مرزی در نرم‌افزارهای تولید شبکه نام‌گذاری نشود، نرم‌افزارهای یاد شده بطور خودکار مرزهای تعریف شده را نام‌گذاری می‌کند. بدیهی است که با افزایش تعداد مرزها، مدیریت تعیین شرائط مرزی در نرم‌افزار فلوئنت نیز مشکلتر می‌شود. بهمین خاطر در این نرم‌افزار نامگذاری مجدد نواحی مرزی امکان‌پذیر است. اینکار کمک بسیار زیادی در شناسایی آسان ناحیه مرزی و مکان قرار گیری آن، می‌کند. باید توجه داشت که نام‌گذاری مجدد یک مرز، نوع آن را تغییر نمی‌دهد.

بطور کلی برای تغییر نام یک مرز باید به ترتیب زیر عمل نمود:

- مرزی که قرار است اسم آن تغییر یابد، در قسمت Zone پانل شرائط مرزی انتخاب گردد.
- روی سوئیچ Set در پانل شرائط مرزی کلیک شود.
- با کلیک کردن روی گزینه Set در پانل شرائط مرزی، پانل تنظیم شرط مرزی انتخاب شده باز می‌شود. پس از باز شدن این پانل، اسم جدید مرز در کادر متن Zone Name تایپ شود.
- روی سوئیچ فرمان OK در پانل تنظیم شرط مرزی کلیک شود.

۷-۱-۲ ورودیهای غیر یکنواخت برای شرائط مرزی

دقیقترین تعریف پارامترهای جریان، تعریف واقعی آن بوده و تعریف مقدار ثابت در اکثر موارد تعریف دقیقی نیست. بعنوان مثال در صورت تعریف یک مقدار ثابت برای سرعت در شرط مرزی سرعت ورودی برای یک لوله تعریف دقیقی نیست (اگر فرض لزج بودن جریان مطرح باشد.). بنابراین بهتر است در چنین حالتهایی پارامترهای مرزی بصورت توابع پروفایل مشخص شود. اینکار با تعریف یا تابع ساده یا یک فایل پروفایل انجام می‌شود. توابع ساده در پروفایلهای شرائط مرزی (Boundary Profile) و فایل پروفایل بصورت توابع تعریف شده توسط کاربر (User Define Function) تعریف می‌شود.

۷-۲ ورودیها و خروجی‌های جریان

در نرم‌افزار فلوئنت موارد متعددی از انواع شرائط مرزی تعریف شده که با استفاده از آنها می‌توان مشخصات جریان را در ورودیها و خروجیهای جریان به راحتی مشخص نمود. بهمین خاطر برای اگاهی بیشتر کاربران، موارد کاربرد و خصوصیات هر یک از شرائط مرزی ورودی و خروجی جریان مورد بررسی قرار گرفته است.

۷-۲-۱ چگونگی استفاده از شرائط مرزی

در این قسمت کلیاتی در مورد شرائط مرزی موجود در نرم‌افزار فلوئنت و موارد استفاده از آن توضیح داده شده است. در نرم‌افزار فلوئنت ده نوع شرط مرزی مختلف برای مرزهای ورودی و خروجی جریان در نظر گرفته شده است. شرائط مرزی فشار ورودی، سرعت ورودی، دبی جرمی ورودی، فشار خروجی، فشار در بی‌نهایت، جریان خروجی، دریچه ورودی، فن ورودی، دریچه خروجی و فن خروجی، جزئ ده نوع شرط مرزی ورودی و خروجی جریان می‌باشد. خلاصه موارد کاربرد هریک از این شرائط مرزی عبارتست از:

- *شرط مرزی سرعت ورودی*؛ برای تعیین سرعت و خواص اسکالر جریان در مرزهای ورودی استفاده می‌شود.
- شرط مرزی فشار ورودی؛ برای تعیین فشار سکون و دیگر کمیتهای جریان در مرز ورودی استفاده می‌شود.
- *شرط مرزی دبی جرمی ورودی*؛ در جریانهای تراکم‌پذیر برای تعیین نرخ دبی جرمی ورودی جریان استفاده می‌شود. باید توجه داشت، استفاده از این شرط مرزی برای جریانهای تراکم‌ناپذیر لازم نیست، چراکه با ثابت بودن چگالی، شرط مرزی سرعت ورودی، دبی جرمی ورودی جریان را ثابت نگه می‌دارد.

- *شرط مرزی فشار خروجی*؛ برای تعیین فشار استاتیک و سایر متغیرهای اسکالر جریان در مرز خروجی استفاده می‌شود. استفاده از این شرط مرزی بجای شرط مرزی جریان خروجی، اغلب موجب بهتر شدن نرخ همگرائی در زمانیکه جریان برگشتی در طول مراحل تکرار اتفاق می‌افتد، می گردد.
- *شرط مرزی فشار در بی‌نهایت*؛ برای تعیین عدد ماخ جریان آزاد و شرائط استاتیک مشخص شده، در جریانهای تراکم‌پذیر خارجی استفاده می‌شود. از این مرز تنها برای شبیه‌سازی جریان تراکم‌پذیر خارجی استفاده می‌شود.
- *شرط مرزی جریان خروجی*؛ برای شبیه‌سازی جریانهایی که جزئیات خصوصیات جریان در خروجی مشخص نیست استفاده می‌شود. این شرط مرزی برای حالتهایی که جریان در خروجی کاملاً توسعه یافته باشد (نظیر جریان در داخل لوله‌های بلند) مناسب است. همچنین برای محاسبه جریانهای تراکم‌پذیر استفاده از این شرط مرزی در خروجی به هیچ عنوان مناسب نیست.
- *شرط مرزی دریچه ورودی*؛ برای مدلسازی یک دریچه ورودی با ضریب افت، جهت جریان و فشار و دمای سکون محیط مشخص، استفاده می‌شود.
- *شرط مرزی فن ورودی*؛ برای مدلسازی یک فن ورودی (که در قبل از ورود به قلمروفیزیکی قرار گرفته) با پرش فشار، جهت جریان و فشار و دمای سکون محیط مشخص، استفاده می‌شود.
- *شرط مرزی دریچه خروجی*؛ برای مدلسازی یک دریچه خروجی با ضریب افت، فشار و دمای استاتیک مشخص، استفاده می‌شود.
- *شرط مرزی فن خروجی*؛ برای مدلسازی یک فن خروجی با پرش فشار، جهت جریان و فشار و دمای سکون محیط مشخص، استفاده می‌شود.

۲-۲-۷ تعیین پارامترهای آشفتگی

در رژیمهای جریان آشفته لازمست مقادیر اسکلر مربوط به پارامترهای آشفتگی در مرزهای ورودی و خروجی و همچنین مرز بی‌نهایت، مشخص شود. نرم‌افزار فلوئنت نیز از این قاعده مستثنی نیست. تعیین صحیح مقادیر اسکلر موجب افزایش دقت نتایج محاسبه شده می‌شود. در این قسمت سعی شده تا راهکارهای موجود در این نرم‌افزار برای تعریف دقیق پارامترهای اسکلر جریان به کاربر معرفی گردد.

تعیین مقادیر پارامترهای آشفتگی با استفاده از پروفایلها

در صورتیکه به تعریف دقیق پارامترهای جریان در لایه مرزی یا جریان آشفته کاملاً توسعه یافته در مرز ورودی نیاز باشد، می‌توان مقادیر آشفتگی را با استفاده از پروفایلهای تهیه شده از مقادیر آزمایشگاهی و یا فرمولهای تجربی مشخص کرد. در صورت داشتن اطلاعات بصورت مقادیر نقطه‌ای نیز می‌توان از UDF (توابع تعریف شده توسط کاربر) نیز بهره گرفت. البته برای هر مدل شبیه‌سازی جریان آشفته، پارامترهای مختلفی را باید در ورودی جریان تعریف نمود. بطور کلی چگونگی استفاده از توابع پروفایل برای هر مدلی عبارتست از:

- مدل آشفتگی یک معادله‌ای اسپالارت آلماراس[۱]؛ در مواقع استفاده از این مدل باید گزینه Turbulent Viscosity Ratio را از کادر فهرست ریزشی Turbulence Specification Method انتخاب کرده و اسم فایل پروفایل مربوطه با استفاده از کادر فهرست موجود در سمت راست کادر متن Turbulence Viscosity Ratio انتخاب شود. نرم‌افزار فلوئنت مقادیر اصلاح شده لزجت آشفتگی، υ، را با ترکیب μ_t/μ و با مقادیر مناسب چگالی و لزجت ملکولی محاسبه می‌کند.
- مدل آشفتگی دو معادله‌ای $k-\varepsilon$؛ در مواقع استفاده از این مدل باید گزینه K & Epsilon را از کادر فهرست ریزشی Turbulence Specification Method انتخاب کرده و اسامی فایلهای پروفایل مربوطه با استفاده از کادرهای فهرست موجود در سمت راست کادرهای متن Turb. Kinetic Energy و Turb. Dissipation Rate انتخاب شود.

[۱]–Spalart-Almaras One Equation Turbulence Model

- مدل آشفتگی دو معادله‌ای $k-\omega$ (FLUENT V.۶)؛ در مواقع استفاده از این مدل باید گزینه K & Omega را از کادر فهرست ریزشی Turbulence Specification Method انتخاب کرده و اسامی فایلهای پروفایل مربوطه با استفاده از کادرهای فهرست موجود در سمت راست کادرهای متن Turb. Kinetic Energy و Spec. Dissipation Rate انتخاب شود.
- مدل تنش رینولدز؛ در مواقع استفاده از این مدل باید گزینه K & Epsilon را از کادر فهرست ریزشی Turbulence Specification Method انتخاب کرده و اسامی فایلهای پروفایل مربوطه با استفاده از کادرهای فهرست موجود در سمت راست کادرهای متن Turb. Kinetic Energy و Turb. Dissipation Rate انتخاب شود. همچنین لازم است گزینه Reynolds-Stress Component در کادر فهرست ریزشی Reynolds-Stress Specification Method انتخاب شده و فایلهای پروفایل مربوط به هریک از مولفه‌های این روش نیز در کادرهای فهرست مربوطه فراخوانی گردد.

تعیین پارامترهای آشفتگی بصورت مقادیر ثابت

در بعضی ازمسائل تعیین مقادیر ثابت برای پارامترهای آشفتگی مناسب است. در مسائلی مانند ورود سیال به یک مجرا، مرزهای بی‌نهایت و یا حتی جریان توسعه یافته در یک کانال که پروفایل مقادیر آشفتگی بطور دقیق مشخص نیست، می‌توان پارامترهای آشفتگی را ثابت فرض کرد.

در اکثر جریانهای آشفته گرادیانهای پارامترهای آشفتگی در لایه‌های برشی بسیار بیشتر از ورودی جریان بوده و بنابراین محاسبات انجام شده نسبت به مقادیر تعریف شده پارامترهای آشفتگی در ورودی جریان حساسیت کمتری دارد. بهرصورت باید به این نکته توجه داشت که تعیین این پارامترها نباید آنقدر غیر فیزیکی باشد که روی همگرائی حل و یا حتی نتایج بدست آمده تأثیر داشته باشد. این موضوع بویژه برای جریانهای خارجی و در جائیکه تعین مقادیر بسیار زیاد و غیر فیزیکی لزجت موثر در جریان آزاد می‌تواند لایه‌های مرزی را مختل نماید، صادق است.

مقادیر ثابت جریان در کادرهای متن مربوط به قسمت Turbulence Specification Method وارد می‌شود. علاوه بر موارد یاد شده، پارمترهای آشفتگی می‌تواند بصورتهای دیگری مانند شدت آشفتگی[۲]، نسبت

لزجت گردابه‌ای[۱] به لزجت ملکولی[۲]، قطر هیدرولیکی[۳] و مقیاس طولی آشفتگی[۴] نیز تعیین شود.

شدت آشفتگی

شدت آشفتگی، I، بصورت نسبت تغییرات سرعت آشفتگی، u'، به سرعت متوسط جریان، u_{avg} ، تعریف می‌شود (معادله ۱-۷). در شدت آشفتگی کمتر از ۱٪، آشفتگی جریان کم و در شدت آشفتگی بیشتر از ۱۰٪، آشفتگی جریان زیاد می‌باشد.

۲–Turbulence Intensity

۱–Eddy (Turbulence) Viscosity

۲–Molecular Viscosity

۳–Hydraulic Diameter

۴–Turbulence Length Scale

بطور ایده‌ال، می‌توان شدت آشفتگی در مرزهای ورودی را از مقادیر اندازه گیری شده در محیط، تخمین زد. بعنوان مثال در صورت شبیه‌سازی یک تونل باد، شدت آشفتگی در جریان آزاد معمولاً از خواص تونل قابل اندازه‌گیری است. در تونلهای باد پیشرفته، شدت آشفتگی جریان آزاد کمتر از ۰.۰۵٪ می‌باشد. بنابراین برای شبیه‌سازی چنین تونلهایی می‌توان شدت آشفتگی در ورودی جریان را همان ۰.۰۵٪ در نظر گرفت.

برای جریانهای داخلی، شدت آشفتگی در مرز ورودی کاملاً به تاریخچه جریان بالادست بستگی دارد. اگر جریان در بالادست توسعه نیافته باشد، می‌توان شدت آشفتگی را کم فرض کرد. اگر جریان در بالادست کاملاً توسعه یافته باشد، شدت آشفتگی چند درصد زیادتر درنظر گرفته می‌شود. بطور کلی شدت آشفتگی در هسته جریان کاملاً توسعه یافته در یک مجرا از رابطه تجربی (۷-۱) محاسبه می‌شود. بعنوان مثال بر اساس این رابطه شدت آشفتگی برای جریان در یک لوله با عدد رینولدز ۵۰.۰۰۰، ۴٪ می‌باشد.

$$I \equiv \frac{u'}{u_{avg}} \cong 0.16\left(\mathrm{Re}_{D_H}\right)^{-1/8} \qquad (۷-۱)$$

طول آشفتگی و قطر هیدرولیکی

مقیاس طول آشفتگی، l، یک کمیت فیزیکی وابسته به اندازه گردابهای بزرگ دارای انرژی در جریان آشفته، می‌باشد. در جریان کاملاً توسع یافته داخل مجرا، طول آشفتگی به اندازه مجرا محدود می‌شود. چراکه بزرگترین گردابه‌ای که ممکن است در داخل یک مجرا تولید شود، نمی تواند از اندازه مجرا بزرگتر باشد. رابطه تقریبی بین طول آشفتگی، l، و اندازه فیزکی مجرا، L، در معادله (۷-۲) نشان داده شده است. L اندازه مجرا می‌باشد.

$$l = 0.07L \qquad (۷-۲)$$

ضریب ۰.۰۷ براساس بیشترن طول آشفتگی در جریان آشفته کاملاً توسعه یافته در داخل مجرا که L اندازه قطر مجرا می‌باشد، تعریف شده است. در صورتیکه سطح مقطع مجرا دایروی نباشد، می‌توان L را همان قطر هیدرولیکی فرض کرد. اگر آشفتگی از هندسه خاص مدل نظیر وجود یک مانع یا یک سوراخ، پدید آمده، بهتر است بجای ابعاد اصلی مجرا، ابعاد مانع یا قطر سوراخ برای پارامتر L در نظر گرفته شود.

لازم نیست که در تمام مسائل از رابطه (۷-۲) استفاده شود. اما باید این نکته را نیز بخاطر داشت که برای بیشتر موارد محاسباتی این گزینه، بهترین انتخاب است. بطور کلی برای استفاده از طول آشفتگی و قطر هیدرولیکی بعنوان پارامترهای آشفتگی باید به موارد زیر توجه شود:

- برای جریانهای داخلی آشفته و کاملاً توسعه یافته، بهتر است شدت آشفتگی و قطر هیدرولیکی بعنوان پارامترهای آشفتگی در نظر گرفته شده و مقادیر آن مشخص گردد. در چنین حالتهایی، $L = D_H$ می باشد.
- برای جریانهای پایین دست یک پروانه دوار، صفحات مشبک و از این قبیل موارد، مد نظر قرار دادن شدت آشفتگی و قطر هیدرولیکی بعنوان پارامترهای آشفتگی، مناسبتر است. در چنین مواردی طول مشخصه سیال انبساط یافته برای L در کادر متن قطر هیدرولیکی، وارد می‌شود.
- برای جریانهای کاملاً چسبیده به دیواره که ورودی جریان از لایه مرزی آشفتگی نیز تشکیل شده، باید کمیتهای شدت آشفتگی و طول آشفتگی بعنوان پارامترهای آشفتگی انتخاب شود. در این مسائل طول آشفتگی، l، از رابطه $l = 0.4\delta_{99}$ محاسبه می‌شود.

نسبت لزجت گردابه‌ای به لزجت ملکولی

نسبت لزجت گردابه‌ای به لزجت ملکولی، μ_t/μ، با عدد رینولدز آشفته، $\mathrm{Re}_t \equiv k^2/(\varepsilon\upsilon)$، رابطه مستقیم دارد. در لایه مرزی، لایه‌های برشی و جریان کاملاً توسعه یافته داخل مجرا، Re_t بزرگ است (از مرتبه ۱۰۰ یا ۱۰۰۰). در مرزهای جریان آزاد، مقدار μ_t/μ کوچک است. معمولاً

برای این نوع جریانها (جریانهای خارجی)، مقدار μ_t/μ بر روی مرزهای جریان آزاد بین ۱ تا ۱۰ منظور می‌شود. البته مقدار ایده‌ال صفر می‌باشد. ولی بخاطر ماهیت حل عددی جریان این مقدار بین ۱ تا ۱۰ فرض می‌شود. برای وارد کردن این مقادیر باید گزینه Turbulence Viscosity Ratio برای مدل اسپالارت-آلماراس یا گزینه‌های Turbulence Intensity و Turbulence Viscosity Ratio برای مدلهای $k-\varepsilon$، $k-\omega$ و RSM در قسمت Turbulence Specification Method انتخاب شود.

۱-۲-۲-۷ چگونگی محاسبه مقادیر پارامترهای آشفتگی

پارمترهای آشفتگی معمولاً بصورت کمیتهای مناسب نظیر I، l، μ_t/μ و روابط تجربی مشخص می‌شود. در این قسمت روابط مناسب برای تعیین این پارامترها که اغلب توسط نرم‌افزار فلوئنت نیز استفاده می‌شود، معرفی شده است.

محاسبه مقدار بهینه لزجت آشفتگی برای مدل اسپالارت-آلماراس

مقدار بهینه لزجت آشفتگی، $\tilde{\upsilon}$، براساس سرعت متوسط جریان، شدت آشفتگی، مقیاس طول آشفتگی و بصورت رابطه (۳-۷) محاسبه می‌شود.

$$\tilde{\upsilon} = \sqrt{\tfrac{3}{2}}u_{avg}Il \qquad (۳-۷)$$

اگر از شدت آشفتگی و قطر هیدرولیکی بعنوان پارامترهای آشفتگی جریان برای مدل اسپالارت-آلماراس، استفاده شود، نرم‌افزار فلوئنت از رابطه فوق برای محاسبه مقدار لزجت آشفتگی استفاده می‌کند. در معادله (۳-۷)، طول آشفتگی، l، با استفاده از رابطه (۲-۷) بدست می‌آید.

تقریب مقدار انرژی جنبشی آشفتگی از پارامتر شدت آشفتگی

مقدار تقریبی انرژی جنبشی آشفته، k، بر حسب سرعت متوسط جریان و شدت آشفتگی، I، براساس معادله (۴-۷) محاسبه می‌شود.

$$k = \frac{3}{2}\left(u_{avg}I\right)^2 \qquad (۴-۷)$$

اگر شدت آشفتگی و قطر هیدرولیکی، شدت آشفتگی و مقیاس طول آشفتگی و یا شدت آشفتگی و نسبت لزجت گردابه‌ای به لزجت ملوکولی، بعنوان پارامترهای آشفتگی تعیین گردد، نرم‌افزار فلوئنت از رابطه (۴-۷) برای بدست آوردن مقادیر k و ε، بجای محاسبه صریح این پارامترها، استفاده می‌کند.

تقریب مقدار نرخ اتلاف آشفتگی از پارامتر مقیاس طول آشفتگی

با معلوم بودن مقیاس طول آشفتگی، l، می‌توان نرخ اتلاف آشفتگی، ε، را از معادله (۵-۷) محاسبه کرد.

$$\varepsilon = C_{\mu}^{\frac{3}{4}}\frac{k^{\frac{3}{2}}}{l} \qquad (۵-۷)$$

C_μ ثابت تجربی تعیین شده (تقریباً ۰.۰۹) در مدل آشفتگی است. اگر شدت آشفتگی و قطر هیدرولیکی ویا شدت آشفتگی و مقیاس طول آشفتگی، بعنوان پارامترهای آشفتگی تعیین گردد، نرم‌افزار فلوئنت از رابطه (۵-۷) برای بدست آوردن مقادیر k و ε، بجای محاسبه صریح این پارامترها، استفاده می‌کند.

تقریب مقدار نرخ اتلاف **آشفتگی از پارامتر نسبت لزجت گردابه‌ای به لزجت ملکولی**

با استفاده از معادله (۶-۷) می‌توان نرخ اتلاف آشفتگی را بر حسب انرژی جنبشی لآشفتگی و نسبت لزجت گردابه‌ای به لزجت ملکولی، بدست آورد.

$$\varepsilon = \rho C_\mu \frac{k^2}{\mu}\left(\frac{\mu_t}{\mu}\right)^{-1} \qquad (۶-۷)$$

C_μ ثابت تجربی تعیین شده (تقریباً ۰.۰۹) در مدل آشفتگی است. اگر شدت آشفتگی و قطر هیدرولیکی ویا شدت آشفتگی و نسبت لزجت گردابه‌ای، بعنوان پارامترهای آشفتگی تعیین گردد، نرم‌افزار فلوئنت از رابطه (۵-۷) برای بدست آوردن مقادیر k و ε، بجای محاسبه صریح این پارامترها، استفاده می‌کند.

تقریب مقدار نرخ اتلاف **آشفتگی بر اساس زوال آشفتگی**[۱]

برای شبیه‌سازی وضعیت تونل باد، که مدل در پایین دست صفحات مشبک (هانیکوم) یا توربهای سیمی (شبکه) قرار دارد، می‌توان نرخ اتلاف آشفتگی را با استفاده از معادله (۷-۷) تقریب زد.

$$\varepsilon \approx \frac{\Delta k U_\infty}{L_\infty} \qquad (۷-۷)$$

که Δk تقریبی از کاهش انرژی آشفتگی در مسیر جریان می‌باشد (معمولاً حدود ۱۰٪ از مقدار اولیه انرژی جنبشی فرض می‌شود). U_∞، سرعت جریان و L_∞ طول هم راستا با جهت دامنه جریان تعریف شده است. معادله (۷-۷) یک تقریب خطی از قانون توانی[۲] بوده که در رینولدزهای بالای آشفتگی ایزوتروپیک مشاهده می‌شود. قابل توجه است که فرم دقیق معادله (۷-۷) بصورت $U\partial k/\partial x = -\varepsilon$ می‌باشد.

در صورت استفاده از این روش، لازمست مقادیر نسبت لزجت گردابه‌ای به لزجت ملکولی μ_t/μ نیز با استفاده از معادله (۶-۷) نیز چک شود تا مقدار آن بیش از اندازه بزرگ نباشد. همچنین اگرچه نرم‌افزار فلوئنت بطور مستقیم از این تقریب استفاده نمی‌کند، اما درصورتیکه در مرز جریان آزاد، نرخ اتلاف و انرژی جنبشی آشفتگی بعنوان پارامترهای آشفتگی انتخاب شود، می‌توان برای محاسبه نرخ اتلاف آشفتگی در مرزهای جریان آزاد، از این تقریب استفاده کرد. انرژی جنبشی آشفتگی نیز با استفاده از معادله (۴-۷) بدست می‌آید.

---

[۱]–Decaying Turbulence

[۲]–Power-Low

تخمین مؤلفه‌های تنش رینولدز[1] از انرژی جنبشی آشفتگی

در مواقع استفاده از RSM[2] برای شبیه‌سازی جریانهای آشفته، اگر مولفه‌های تنش رینولدز بطور صریح در ورودی جریان معلوم نباشد، می‌توان آنرا براساس مقادیر مشخص شده برای انرژی جنبشی آشفتگی، تقریب زد. از آنجا که آشفتگی یک پدیده ایزوتروپیک فرض شده، بنابراین رابطه زیر بر جریان حاکم است:

$$\overline{u_i u_j} = 0 \qquad (۷-۸)$$

و

$$\overline{u_\alpha u_\alpha} = \frac{2}{3}k \qquad (۷-۹)$$

باید توجه داشت، در معادله بالا، α یک زیر نویس یکتاست و بنابراین جمع کردن مؤلفه‌ها براساس آن، انجام نمی‌شود. در صورت استفاده از انرژی جنبشی یا شدت آشفتگی بعنوان پارامترهای آشفتگی در قسمت Reynolds-Stress Specification Method، نرم‌افزار فلوئنت این روش برای محاسبه مؤلفه‌های تنش رینولدز استفاده می‌کند.

۷-۳ شرط مرزی فشار ورودی

شرط مرزی فشار وردی برای تعیین فشار سیال در وردیهای جریان و سایر خواص سایر خواص اسکالر جریان بکار می‌رود. این شرط مرزی هم برای جریانهای تراکم‌ناپذیر و هم برای جریانهای تراکم‌پذیر قابل استفاده است. در مواقعی که سرعت یا دبی جرمی وردی معلوم نباشد اما فشارهای استاتیک و سکون سیال در وردی مشخص باشد، از شرط مرزی فشار وردی استفاده می‌شود. این موضوع در بسیاری از موارد عملی نظیر جریانهای دارای نیروی شناوری صادق است. همچنین شرط مرزی فشار ورودی برای تعیین مرز آزاد در جریانهای خارجی یا جریان در بی‌نهایت، نیز بکار گرفته می‌شود.

۷-۳-۱ ورودیها در شرط مرزی فشار ورودی

در شبیه‌سازی عددی جریان، تعیین دقیق متغیرها و اسکالرهای جریان در مرزها از اهمیت بسیاری برخوردار است. بسته به نوع رژیم جریان پارامترهای ورودی نیز با یکدیگر متفاوت است. شرط مرزی فشار ورودی نیز از قانون مستثنی نیست. بطور کلی ورودیهای مربوط به شرط مرزی فشار ورودی عبارتست از:

- فشار کل (سکون)[3]

---

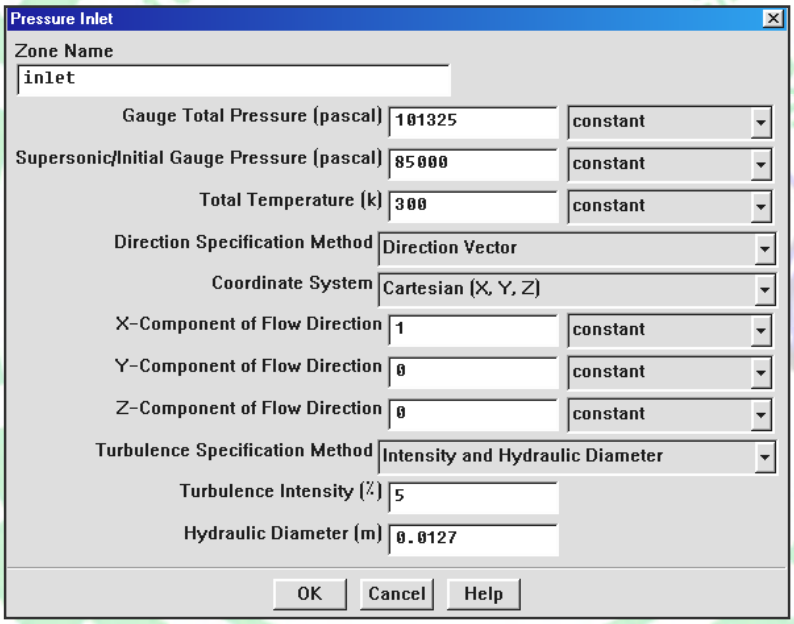
[1]–Reynolds Stress

[2]–Reynolds Stress Model

[3]–Total (Stagnation) Pressure

- دمای کل (سکون)
- جهت جریان
- فشار استاتیک
- پارامترهای آشفتگی (برای شبیه‌سازی جریانهای آشفته)
- پارمتهای تابش (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با انتقال حرارت تابشی با استفاده از مدلهای P-۱، DTRM و DO)
- نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با واکنشهای شیمیایی)
- نسبت ترکیب و واریانس (برای محاسبه احتراق PDF)
- متغیر پیشرفت[۱] (برای محاسبه احتراق پیش آمیخته[۲])
- شرائط مرزی فاز گسسته[۳] (برای محاسبه جریان همراه با فاز گسسته)
- نسب حجمی فازهای ثانویه (برای جریانهای چند فازی)

بسته به نوع رژیمهای جریان که در بالا عنوان شده، پارامترهای مربوطه در پانل شرط مرزی فشار ورودی ظاهر شده که باید به درستی تعیین گردد (شکل ۳-۷).



شکل ۳-۷ پانل شرط مرزی فشار ورودی.

ورودیهای فشار و هد هیدرواستاتیک

میدان فشار، p'_s، و فشار ورودی تعیین شده توسط کاربر، p'_s یا p'_0، شامل هد هیدرواستاتیک، $\rho_0 gx$ نیز می‌باشد. در نرم‌افزار فلوئنت روابط بین این فشارها بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$p'_s = \rho_0 gx + p_s \qquad (۷-۱۰)$$

---

[۱]–Progress Variable

[۲]–Premixed Combustion

[۳]–Discrete Phase

یا

$$\frac{\partial p'_s}{\partial x} = \rho_0 g + \frac{\partial p_s}{\partial x} \qquad (۷-۱۱)$$

با توجه به تعریف بالا، در جریانهای تراکم‌ناپذیر، هد هیدرواستاتیکی وارد ترم نیروی وزنی شده، $(\rho - \rho_0)g$، و از محاسبات فشار خارج می گردد. بنابراین ورودیهای فشار نباید شامل مشار هیدرواستاتیک بوده و نتایج فشار، p'_s، نباید تأثیر فشار هیدرواستاتیک را نشان دهد.

چگونگی تعریف فشارو دمای سکون در مرز فشار ورودی

فشار و دمای سکون به ترتیب در کادرهای متن Gauge Total Pressure و Total Temperature پانل شرط مرزی فشار ورودی، تعیین می‌شود. باید توجه داشت که فشار سکون، همان فشار Gauge نسبت به فشار مرجع[۱] تعریف شده در پانل Operating Condition (شکل ۴-۷) می‌باشد. برای جریانهای تراکم‌ناپذیر، فشار سکون طبق رابطه (۷-۱۲) تعریف می‌شود.

$$P_0 = p_s + \frac{1}{2}\rho|V|^2 \qquad (۷-۱۲)$$

و برای جریانهای تراکم‌پذیر فشار سکون از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_0 = p_s\left[1 + \frac{\gamma - 1}{2}M^2\right]^{\gamma/\gamma-1} \qquad (۷-۱۳)$$

که

P_0: فشار سکون

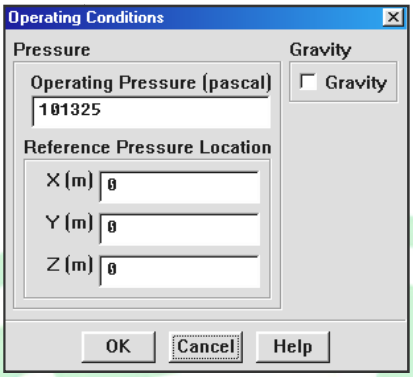
p_s: فشار استاتیک

M: عدد ماخ و

γ: نسبت حرارت ویژه (C_p/C_v) می‌باشد.

در صورت شبیه‌سازی جریانهای چرخشی و متقارن محوری، مقدار سرعت، V، در معادله (۷-۱۲) شامل مؤلفه سرعت چرخشی نیز می‌باشد.

[۱]–Operating Pressure



شکل ۴-۷ پانل تعیین فشار مرجع

درصورتیکه المانهای مجاور مرز ورودی متحرک باشد (بعنوان مثال از روشهای قالب یا قالبهای متحرک[۲]، سطوح اختلاط[۳] و یا شبکه‌های لغزشی[۴] استفاده شود)، در حلگر Segregated می‌توان از فرمولاسیون مطلق یا نسبی برای سرعت یا عدد ماخ، استفاده کرد. باید توجه داشت که در حلگر Coupled تنها استفاده از فرمولاسیون مطلق امکان‌پذیر است.

تعیین جهت جریان

در نرم‌افزار فلوئنت، دو روش برای تعیین جهت جریان در مرزهای فشار ورودی وجود دارد. تعیین جهت جریان عمود بر مرز ورودی و تعریف مؤلفه‌های بردار یکه محورهای مختصات روشهای تعیین جهتهای جریان در مرزهای فشار ورودی می‌باشد. در روش اول کاملاً مشخص است که جریان عمود بر مرز، وارد دامنه محاسباتی می‌شود. اما روش دوم باید نوع دستگاه مختصات مورد نظر نیز مشخص گردد. دستگاه‌های مختصات کارتزین، استوانه‌ای و استوانه‌ای محلی در نرم‌افزار فلوئنت در نظر گرفته شده است. همچنین باید بخاطر داشت که در حلگر Segregated می‌توان از هر دو فرمولاسیون مطلق و نسبی برای پارامترهای جریان استفاده کرد در حالیکه در حلگر Coupled تنها استفاده از فرمولاسیون مطلق امکان‌پذیر است. بطور کلی مراحل تعیین جهت جریان در مرز فشار وردی بصورت زیر می‌باشد:

۱- نوع روش تعیین جهت جریان در کادر فهرست Direction Specification Method انتخاب شود.

۲- برای جریانهای چرخش متقارن محوری، در صورت انتخاب گزینه Normal to Boundary باید مقدار مناسب برای مؤلفه مماسی جریان ورودی در کادر متن Tangential Component of Flow Direction وارد شود. برای جریانهای دو بعدی و سه بعدی به وارد کردن پارامترهای اضافی دیگر، نیازی نیست.

۳- در صورت انتخاب گزینه Direction Vector برای جریانهای سه بعدی، باید نوع سیستم دستگاه مختصات تعیین شده و سپس مؤلفه‌های بردار مشخص گردد، بطوریکه بردار جهت یک بردار واحد باشد. فرم کلی مؤلفه‌های بردار برای سیستم مختصات استوانه‌ای در شکل (۵-۷) نشان داده شده است.

- برای مسائلی که در آنها از قالبهای مرجع متحرک یا شبکه‌های لغزشی استفاده شده، برای تعریف انتقال یا دوران باید جهت انتقال و دوران و همچنین مرکز دوران در پانلهای Fluid یا Solid (بخشهای ۷-۱۷.۱۸) نیز مشخص شود.
- جهتها در سیستم مختصات استوانه‌ای از همان قانون دست راست تبعیت می‌کند.

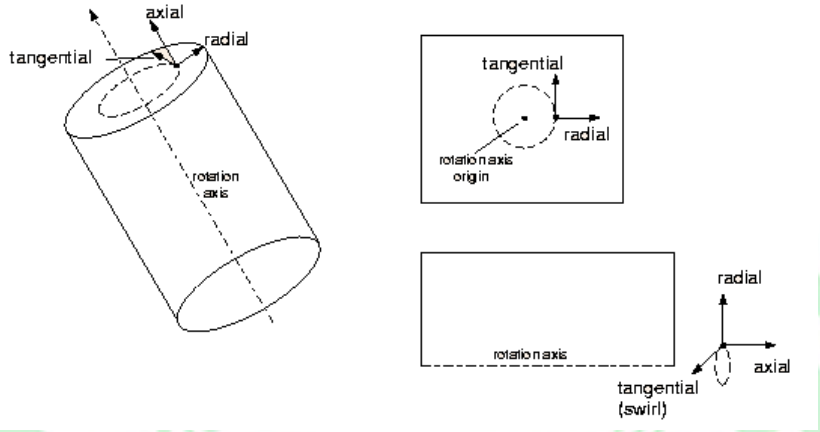
---

[۲]–Moving (Multiple) Reference Frame

[۳]–Mixing Planes

[۴]–Sliding Mesh

- استفاده از سیستم مختصات محلی برای مسئلی که جریان در مرزهای ورودی آن، از محورهای دوران متفاوت برخوردار است، بسیار مفید می‌باشد.



شکل ۵-۷ وضعیت و جهت قرارگیری مولفه‌های مختصات سیستم استوانه‌ای در

دامنه‌های محاسباتی ۲ و سه بعدی و همچنین مسائل تقارن محوری.

تعیین فشار استاتیک

فشار استاتیک (گزینه Supersonic/Initial Gauge Pressure) در مسائلی که جریان مافوق صوت است یا اینکه حدس اولیه برای آنالیز جریان براساس فشار ورودی انجام می‌شود، تعیین می‌گردد. باید بخاطر داشت که فشار استاتیک نسبت به فشار مرجع تعیین گردد. همچنین برای تعیین فشار استاتیک، نباید فشار هیدرواستاتیک منظور شود.

در نرم‌افزار فلوئنت، از مقدار فشار استاتیک تعیین شده، برای جریانهای زیر صوت صرفنظر می‌شود، چراکه در اینحالت فشار استاتیک براساس مقادیر سکون، محاسبه می‌گردد. درصورتیکه حدس اولیه برای آنالیز جریان، براساس شرط مرزی فشار ورودی انجام شود، برای محاسبه مقادیر اولیه، از مقدار فشار استاتیک در کادر متن Supersonic/Initial Gauge Pressure، بهمراه مقادیر سکون، طبق روابط ایزنتروپیک (برای جریانهای تراکم‌پذیر) و یا طبق رابطه برنولی (برای جریانهای تراکم‌ناپذیر) استفاده می‌شود. بنابراین در ورودی جریان زیر صوت، معمولاً فشار استاتیک بر حسب عدد ماخ ورودی (برای جریانهای تراکم‌پذیر) یا سرعت ورودی (برای جریانهای تراکم‌ناپذیر) محاسبه شده و در کادر متن Supersonic/Initial Gauge Pressure، وارد می‌شود.

تعیین مقادیر سایر پارامترهای اسکالر

بسته به نوع رژیم جریان، لازمست پارامترهای اسکالر مختلفی را در شرط مرزی فشار ورودی تعیین کرد. انواع پارامترهای اسکالر موجود برای رژیمهای جریان مختلف در قسمت (۱-۳-۷) معرفی شده است. چگونگی تعریف پارمترهای آشفتگی نیز در بخش (۲-۷) توضیح داده شده است.

۷-۳-۲ فرآیند محاسبات در مرز فشار ورودی

رفتار مرز فشار ورودی در نرم‌افزار فلوئنت، می‌تواند بصورت افت آزاد انتقال[۱] از شرائط سکون به شرائط ورودی مطرح شود. در جریان تراکم‌پذیر این مورد با استفاده از روابط ایزنتروپیک و برای جریانهای تراکم‌ناپذیر با استفاده از معادله برنولی صورت می‌گیرد.

محاسبات جریان تراکم‌ناپذیر در مرزهای فشار ورودی

با تعریف فشار سکون، P_0، و فشار استاتیک، p_s، نرم‌افزار فلوئنت با استفاده از رابطه برنولی (معادله ۷-۱۴) سرعت جریان در مرز ورودی را محاسبه می‌کند.

$$P_0 = p_s + \frac{1}{2}\rho v^2 \qquad (۷-۱۴)$$

با محاسبه اندازه سرعت و همچنین معلوم بودن جهت جریان (که توسط کاربر تعیین می‌شود)، مؤلفه‌های سرعت نیز بدست می‌آید. بنابراین مقدار دبی جرمی ورودی، شارهای ممنتم، انرژی و گونه‌های شیمیایی نیز با معلوم بودن مؤلفه‌های سرعت، محاسبه می‌گردد.

در جریانهای تراکم‌ناپذیر چگالی ثابت بوده و یا اینکه تابعی از دما یا نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی است. نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی (برای جریانهای همراه با واکنش شیمیایی) بصورت شرط ورودی مشخص می‌شود. اگر مسئله بگونه‌ای باشد که جریان از مرز فشار ورودی خارج می‌شود، از فشار سکون تعیین شده بصورت فشار استاتیک در حل معادلات حاکم بر جریان استفاده می‌شود. همچنین برای جریانهای تراکم‌ناپذیر، مقدار دمای سکون با دمای استاتیک برابر است.

محاسبات جریان تراکم‌پذیر در مرزهای فشار ورودی

در جریانهای تراکم‌پذیر از روابط ایزنتروپیک برای ارتباط دادن مقادیر فشار سکون، فشار استاتیک و سرعت در مرز ورودی استفاده می‌شود. اگر در مرز فشار ورودی، فشار سکون، p_0' و فشار استاتیک p_s' باشد، نرم‌افزار فلوئنت از معادله (۷-۱۵) برای محاسبه پارامترهای جریان در المانهای همسایه مرز ورودی استفاده می‌کند.

$$\frac{p_0' + p_{op}}{p_s' + p_{op}} = \left[1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2\right]^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \qquad (۷-۱۵)$$

که

$$M = \frac{v}{c} = \frac{v}{\sqrt{\gamma R T_s}} \qquad (۷-۱۶)$$

[۱]–Loss-Free Translation

و c سرعت صوت، و $\gamma = C_p/C_v$ می‌باشد.

از آنجا که در نرم‌افزار فلوئنت، فشارها در شرط مرزی فشار ورودی فشارهای نسبی نسبت به فشار مرجع، p_{op} ، است، لذا فشار مرجع نیز در روابط ایزنتروپیک منظور می‌گردد. از مقادیر فشارهای سکون و استاتیک تعریف شده در مرز ورودی، برای محاسبه سرعت در مرز ورودی استفاده می‌شود. با معلوم بودن جهت جریان در ورود، مؤلفهای سرعت ورودی نیز بدست می‌آید.

در جریانهای تراکم‌پذیر، چگالی سیال از قانون گازهای ایده‌آل (معادله ۱۷-۶) محاسبه می‌گردد.

$$\rho = \left(p'_s + p_{op}\right)/RT_s \qquad (۷-۱۷)$$

اگر جریان همراه با واکنش شیمیایی باشد، ثابت گازها، R ، براساس نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی (که توسط کاربر مشخص می‌گردد) بدست می‌آید. دمای استاتیک نیز با استفاده از معادله (۱۸-۷) و با معلوم بودن دمای سکون محاسبه می‌شود.

$$\frac{T_0}{T_s} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \qquad (۷-۱۸)$$

۷-۴ شرط مرزی سرعت ورودی

از شرط مرزی سرعت ورودی برای تعیین سرعت و پارامترهای اسکالر جریان در مرز ورود استفاده می‌شود. در شرط مرزی سرعت ورودی، خواص سکون سیال ثابت نبوده بلکه بسته به مقدار و توزیع سرعت در ورودی تغییر می‌کند. از این شرط مرزی تنها برای شبیه‌سازی جریانهای تراکم‌ناپذیر استفاده می‌شود. چراکه در جریانهای تراکم‌پذیر شرائط سکون می‌تواند به هر اندازه‌ای افزایش یافته بطوریکه ممکن است منجر به کسب نتایج غیرفیزیکی شود. همچنین ممکن است در مواردی از شرط مرزی سرعت ورودی بعنوان شرط مرزی در خروج جریان استفاده شود (در اینصورت از پارامترهای اسکالر تعیین شده نقشی در محاسبات ندارد). در چنینی مواردی باید از صحت پیوستگی جریان در تمام دامنه محاسباتی مطمئن بود.

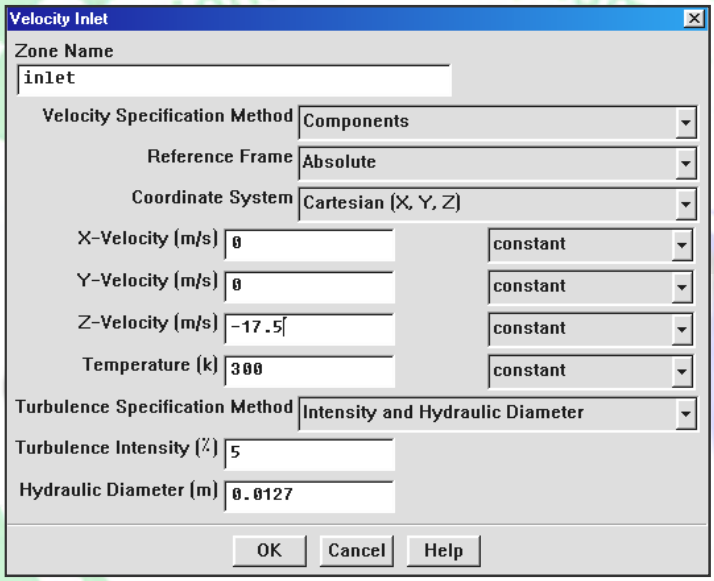
۷-۴-۱ ورودیها در شرط مرزی سرعت ورودی

در شبیه‌سازی عددی جریان، تعیین دقیق متغیرها و اسکالرهای جریان در مرزها از اهمیت بسیاری برخوردار است. بسته به نوع رژیم جریان، پارامترهای ورودی در مرز سرعت ورودی با یکدیگر متفاوت است. بطور کلی ورودیهای مربوط به شرط مرزی سرعت ورودی عبارتست از:

- مقدار سرعت و جهت جریان یا مقدار مؤلفه‌های سرعت
- سرعت چرخش (برای جریانهای دو بعدی تقارن محوری همراه با چرخش)
- دما (برای محاسبه معادله انرژی)
- فشار استاتیک در جریان خروجی (برای محاسبات همراه با حلگر Coupled)
- پارامترهای آشفتگی (برای شبیه‌سازی جریانهای آشفته)

- پارمتهای تابش (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با انتقال حرارت تابشی با استفاده از مدلهای P-۱، DTRM و DO)
- نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با واکنشهای شیمیایی)
- نسبت ترکیب و واریانس (برای محاسبه احتراق PDF)
- متغیر پیشرفت (برای محاسبه احتراق پیش آمیخته)
- شرائط مرزی فاز گسسته (برای محاسبه جریان همراه با فاز گسسته)
- نسب حجمی فازهای ثانویه (برای جریانهای چند فازی)

بسته به نوع رژیمهای جریان که در بالا عنوان شده، پارامترهای مربوطه در پانل شرط مرزی سرعت ورودی ظاهر شده که باید به درستی تعیین گردد (شکل ۶-۷).



شکل ۶-۷ پانل تعیین شرط مرزی سرعت ورودی.

تعیین سرعت

برای تعیین سرعت در مرز سرعت ورودی، می‌توان از یکی از سه روش زیر در کادر فهرست Velocity Specification Method، استفاده کرد:

- مقدار سرعت در جهت عمود بر مرز ورودی؛ گزینه Magnitude, Normal to Boundary
- مقدار مؤلفه‌های سرعت؛ گزینه Components
- مقدار سرعت و مؤلفه‌های بردار واحد جهت جریان؛ گزینه Magnitude and Direction

کادر فهرست Reference Frame در پانل تعیین شرط مرزی سرعت ورودی (شکل ۶-۷) برای انتخاب فرمولاسیون مطلق یا نسبی، بکار گرفته می‌شود. در صورت انتخاب یکی از گزینه‌های Components و یا Magnitude and Direction، لازمست که نوع سیستم دستگاه مختصات نیز مشخص شود. جزئیات بیشتر در مورد ویژگیهای سیستمهای دستگاه مختصات در قسمت تعیین جهت جریان(۱-۳-۷) توضیح داده

شده است. در مسائلی که جریان متقارن محوری و چرخشی است، می‌توان سرعت زاویه‌ای را نیز در مرز ورودی مشخص کرد. با تعیین سرعت زاویه‌ای، سرعت مماسی در هر نقطه با استفاده از رابطه Ωr محاسبه می‌شود که Ω، سرعت زاویه‌ای و r فاصله تا محور دوران می‌باشد.

تعیین مقادیر سایر پارامترهای اسکالر

اگر معادله انرژی نیز جزء معادلات حاکم بر جریان باشد، باید دما را نیز در مرز سرعت ورودی مشخص کرد. دمای مورد نظر همان دمای استاتیک می‌باشد که در کادر متن Temprature وارد می‌شود. درصورتیکه از حلگر Coupled برای شبیه‌سازی جریان استفاده شده، لازمست که فشار استاتیک خروجی در کادر متن Outflow Gauge Pressure در پانل شرط مرزی سرعت ورودی، نیز وارد شود. همچنین بسته به نوع رژیم جریان، باید پارامترهای اسکالر مختلفی را در شرط مرزی سرعت ورودی تعیین کرد. انواع پارامترهای اسکالر موجود برای رژیمهای جریان مختلف در قسمت (۱-۴-۷) معرفی شده است. چگونگی تعریف پارمترهای آشفتگی نیز در بخش (۲-۷) توضیح داده شده است.

۲-۴-۷ فرآیند محاسبات در شرط مرزی سرعت ورودی

با تعیین شرط مرزی سرعت ورودی، نرم‌افزار فلوئنت از مؤلفه‌های سرعت ورودی و همچنین پارامترهای مشخص شده در پانل شرط مرزی سرعت ورودی، برای محاسبه دبی جرمی ورودی، شارهای ممنتم، انرژی و گونه‌های مختلف شیمیایی (برای جریانهای همراه با واکنش شیمیایی) استفاده می‌کند. نرخ دبی جرمی ورودی در المانهای مجاور مرز سرعت ورودی، با استفاده از رابطه (۱۹-۷) بدست می‌آید. باید توجه داشته که تنها مؤلفه سرعت عمود بر مرز ورودی، برای محاسبه نرخ دبی جرمی ورودی، منظور می‌شود.

$$\dot{m} = \int \rho v.dA \qquad (۱۹-۷)$$

ممکن است در بعضی از مسائل، از شرط مرزی سرعت ورودی، برای تعیین پارامترهای جریان در مرزهای خروجی، نیز استفاده کرد. مثلاً در مرزهایی که نرخ دبی خروجی جریان مشخص است، می‌توان از این روش برای تعیین خصوصیات جریان در خروج، بهره جست. در چنین حالتهایی باید از پیوستگی کامل جریان در ناحیه محاسباتی مطمئن بود. با استفاده از این روش در حلگر Segrigated، نرم‌افزار فلوئنت، مقدار شرط مرزی را تنها برای مؤلفه سرعت عمود بر مرز خروجی، در نظر می‌گیرد. بنابراین سایر پارامترهای تعیین شده در شرط مرزی سرعت ورودی، در فرآیند محاسبات دخالت داده نمی‌شود. در عوض تمامی مقادیر این پارامترها بجز مؤلفه سرعت عمود بر مرز خروجی، برای المانهای بالادست مرز خروجی، در نظر گرفته می‌شود.

۵-۷ شرط مرزی دبی جرمی ورودی

از شرط مرزی دبی ورودی برای تعیین شار جرمی، در مرز ورودی استفاده می‌شود. فشار سکون در مرز ورودی بطور محلی برای رسیدن به سرعتی که دبی جرمی تعیین شده را ارضاء کند، مشخص می‌گردد. این روند برخلاف روند محاسبات در شرط مرزی فشار ورودی است. در مسائلی که تطبیق دبی جرمی و انرژی مهمتر از تطبیق فشار سکون در مرز ورودی باشد، از شرط مرزی دبی جرمی ورودی، استفاده می‌شود. بعنوان مثال در مسائلی که یک جت خنک کننده کوچک به جریان اصلی وارد می‌شود بطوریکه سرعت جریان اصلی براساس اختلاف فشار در ورود و خروج دامنه محاسباتی محاسبه می‌گردد، در مرز ورودی جت، از شرط مرزی دبی جرمی ورودی، استفاده می‌شود.

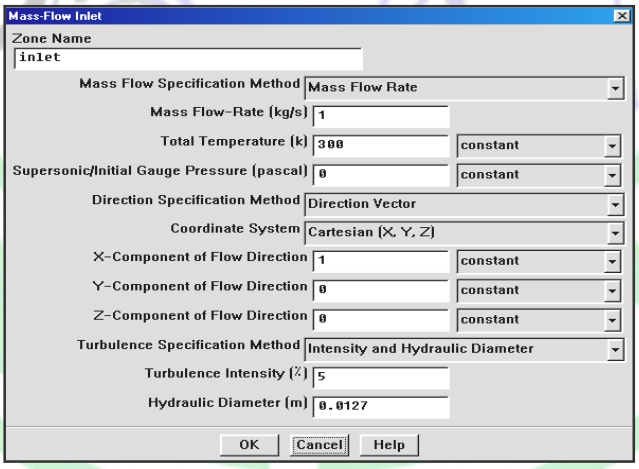
در شرط مرزی سرعت ورودی، تنظیم فشار کل ممکن است باعث کندتر شدن روند همگرائی شود. بنابراین اگر شرائط مرزی فشار ورودی و دبی جرمی ورودی جزء گزینه‌های قابل قبول برای تعریف شرائط مرزی باشد، بهتر است از شرط مرزی فشار ورودی استفاده کرد. همچنین در جریانهای تراکم‌ناپذیر، نیازی به بکارگیری شرط مرزی دبی جرمی نمی‌باشد، چراکه با ثابت بودن چگالی، شرط مرزی سرعت ورودی نرخ دبی جرمی ورودی جریان را ثابت نگه می‌دارد.

۱-۵-۷ ورودیها در شرط مرزی دبی جرمی ورودی

در شبیه‌سازی عددی جریان، تعیین دقیق متغیرها و اسکالرهای جریان در مرزها از اهمیت بسیاری برخوردار است. بسته به نوع رژیم جریان، پارامترهای ورودی در مرز دبی جرمی ورودی، با یکدیگر متفاوت است. بطور کلی ورودیهای مربوط به شرط مرزی دبی جرمی ورودی عبارتست از:

- مقدار دبی جرمی ورودی
- دمای سکون
- فشار استاتیک
- جهت جریان
- پارامترهای آشفتگی (برای شبیه‌سازی جریانهای آشفته)
- پارمتهای تابش (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با انتقال حرارت تابشی با استفاده از مدلهای P-۱، DTRM و DO)
- نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با واکنشهای شیمیایی)
- نسبت ترکیب و واریانس (برای محاسبه احتراق PDF)
- متغیر پیشرفت (برای محاسبه احتراق پیش آمیخته)
- شرائط مرزی فاز گسسته (برای محاسبه جریان همراه با فاز گسسته)

بسته به نوع رژیمهای جریان که در بالا عنوان شده، پارامترهای مربوطه در پانل شرط مرزی فشار ورودی ظاهر شده که باید به درستی تعیین گردد (شکل ۷-۷).



شکل ۷-۷ پانل تعیین شرط مرزی دبی جرمی ورودی

تعیین نرخ دبی جرمی یا شار جرمی ورودی

در نرم‌افزار فلوئنت می‌توان نرخ دبی جرمی یا شار جرمی ورودی را بعنوان شرط مرزی ورودی وارد کرد. انتخاب نوع تعیین جرم ورودی، به روشهای فوق، با استفاده از گزینه‌های Mass flow Rate ، Mass Flux ویا Mass Flux With Average Mass Flux (نسخه ۶ نرم‌افزار فلوئنت، برای حالتهایی که شار جرمی در مرز ورودی یکنواخت نیست)در کادر فهرست Mass Flow Specification Method، انجام می‌شود. در صورت

انتخاب گزینه Mass Flow Rate، لازمست دبی جرمی بر مساحت مرز ورودی تقسیم شده و مقدار بدست آمده بصورت نرخ دبی جرمی ورودی در کادر متن Mass Flow-Rate وارد شود. البته می‌توان دبی جرمی (نه نرخ دبی جرمی) را بصورت پروفایل نیز تعریف نمود. بطور کلی برای تعیین شرط مرزی دبی جرمی ورودی باید بصورت زیر عمل نمود.

۱- روش تعیین شار ورودی در کادر فهرست Mass Flow Specification Method، انتخاب شود.
۲- در صورت انتخاب گزینه Mass Flow-Rate (پیش فرض)، باید نرخ دبی جرمی ورودی مشخص گردد. باید توجه داشت که برای مسائل تقارن محوری، نرخ دبی جرمی ورودی همان نرخ دبی جرمی ورودی به کل دامنه محاسباتی می‌باشد.
۳- در صورت انتخاب گزینه Mass Flux، باید دبی جرمی ورودی مشخص گردد. باید توجه داشت که در مسائل تقارن محوری دبی جرمی ورودی، دبی جرمی ورودی به ۱ رادیان می‌باشد نه کل دامنه محاسباتی.
۴- در صورت انتخاب گزینه Mass Flux With Average Mass Flux، باید دبی جرمی و متوسط دبی جرمی در کادرهای متن Mass Flux و Average Mass Flux وارد شود. باید توجه داشت که در مسائل تقارن محوری دبی جرمی ورودی، دبی جرمی ورودی به ۱ رادیان می‌باشد نه کل دامنه محاسباتی.
۵- جهت جریان تعیین شود.
۶- سایر پارامترهای اسکالر جریان مشخص گردد.

تعیین دمای سکون و فشار استاتیکی

در پانل شرط مرزی دبی جرمی ورودی، باید دمای سکون در کادر متن Total Temprature وارد شود. همچنین باید مقدار فشار استاتیکی در کادر متن Supersonic/Initial Gauge Pressure منظور گردد. در مسائل زیر صوت، از فشار استاتیک تعریف شده در روند محاسبات صرفنظر می‌شود. درصورتیکه حدس اولیه براساس شرط مرزی دبی جرمی ورودی انجام شود، نرم‌افزار فلوئنت، با استفاده از روابط ایزنتروپیک و مقادیر فشار استاتیک و مقادیر سکون، مقدار پارامترهای جریان را محاسبه می‌کند. همچنین باید توجه داشت که مقدار فشار استاتیک باید نسبت به فشار مرجع مشخص شده در پانل Operating Condition، تعیین شود.

تعیین مقادیر سایر پارامترهای اسکالر

بسته به نوع رژیم جریان، لازمست پارامترهای اسکالر مختلفی را در شرط مرزی جرم ورودی تعیین کرد. انواع پارامترهای اسکالر موجود برای رژیمهای جریان مختلف در قسمت (۱-۳-۷) معرفی شده است. چگونگی تعریف پارمترهای آشفتگی نیز در بخش (۲-۷) توضیح داده شده است.

۲-۵-۷ فرآیند محسبات در مرز دبی جرمی ورودی

با مشخص بودن دبی جرمی در مرز ورودی، سرعت جریان محاسبه می‌شود. بنابراین با معلوم شدن میزان سرعت، سایر پارامترهای بدست می‌آید. در هر تکرار مقادیر سرعت طوری تصحیح می گردد که نرخ دبی تعیین شده در ورودی جریان ثابت بماند. از پارامترهای نرخ دبی جریان، جهت جریان، فشارهای سکون و استاتیک برای محاسبه مقادیر سرعت استفاده می‌شود.

دو روش برای تعیین مقدار نرخ دبی جرمی وجود دارد. روش اول تعیین نرخ دبی جرمی کل، $\dot{m}$، می‌باشد. در روش دوم، از شار دبی جرمی در واحد سطح برای تعیین نرخ دبی جرمی جریان استفاده می‌شود. اگر نرخ دبی جرمی کل جریان معلوم باشد، آنگاه شار دبی جرمی در واحد سطح از رابطه (۲۰-۷) محاسبه می‌گردد.

$$\rho v = \frac{\dot{m}}{A} \qquad (۲۰-۷)$$

در محاسبه ρv، باید مقدار چگالی براساس مؤلفه عمود بر مرز سرعت ورودی، منظور گردد. طریق محاسبه چگالی، بسته به مدلسازی جریان که از معادله گاز کامل استفاده می‌کند یا خیر، متفاوت است.

آنالیز جریان در مرزهای دبی جرمی ورودی برای گازهای کامل

اگر سیال یک گاز ایده‌ال باشد، چگالی براساس فشار و دمای استاتیک محاسبه می‌شود (۲۱-۷). اگر جریان در ورود، مافوق صوت باشد، فشار استاتیک همان مقداری در نظر گرفته می‌شود که در شرط مرزی تعیین گردید. درصورتیکه جریان در ورود، زیر صوت باشد، آنگاه فشار استاتیک از المانهای سطح ورودی برونیابی می‌شود.

$$p = \rho RT \qquad (۲۱-۷)$$

دمای استاتیک براساس انتالپی کل در مرز ورودی محاسبه می‌شود. انتالپی کل نیز نسبت به دمای سکون تعیین شده در پانل شرط مرزی در نظر گرفته می‌شود. با استفاده از فشار و دمای استاتیک معین، چگالی طبق رابطه (۲۱-۷) بدست می‌آید.

آنالیز جریان در مرزهای جرمی ورودی برای سیالهای تراکم‌ناپذیر

در صورتیکه دامنه محاسباتی از گازهای غیر-ایده‌ال یا مایعات تشکیل شده باشد، فشار استاتیک همان فشار سکون است. برای این حالتها، چگالی براساس تابعی از دما یا نسبت جرمی تعیین شده برای گونه‌های شیمیایی (برای جریانها همراه با واکنش شیمیایی) محاسبه می‌شود. سرعت جریان نیز با استفاده از رابطه (۲۰-۷) بدست می‌آید.

محاسبات شار در مرز دبی جرمی ورودی

برای محاسبه تمام شارها، از شار سرعت، v، محاسبه شده استفاده می‌شود. بعنوان مثال شار جرمی ρv، و شار انرژی جنبشی آشفتگی $\rho k v$ می‌باشد که براساس سرعت محاسبه می‌گردد. این شارها بعنوان شرائط مرزی برای معادلات پیوستگی در طی حل جریان، استفاده می‌شود.

۷-۶ شرط مرزی دریچه ورودی

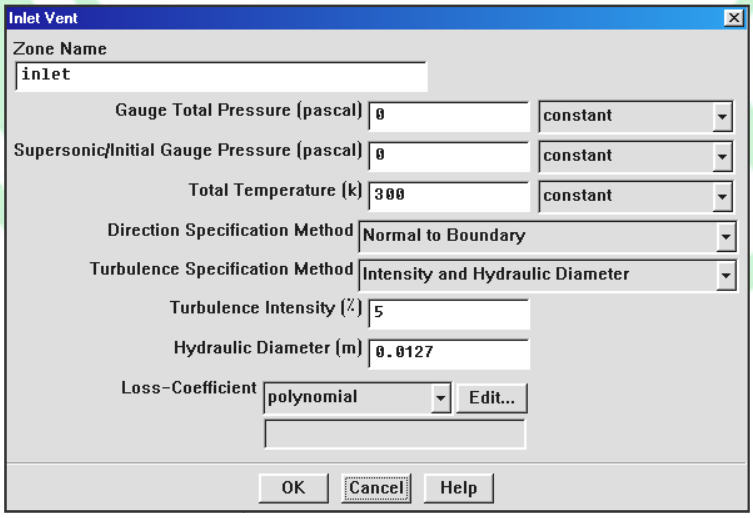
از شرط مرزی دریچه ورودی برای مدلسازی یک دریچه با ضریب افت مشخص استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی این گونه مسائل باید ضریب افت دریچه، جهت جریان، فشار و دمای محیط در ورودی جریان، معلوم باشد. در این بخش چگونگی استفاده از این نوع شرط مرزی تشریح شده است.

۷-۶-۱ ورودیها در شرط مرزی دریچه ورودی

مجدداً یاد آوری می‌شود که در شبیه‌سازی عددی جریان، تعیین دقیق متغیرها و اسکالرهای جریان در مرزها از اهمیت بسیاری برخوردار است. بسته به نوع رژیم جریان، پارامترهای ورودی در مرز دریچه ورودی با یکدیگر متفاوت است. بطور کلی ورودیهای مربوط به شرط مرزی دریچه ورودی عبارتست از:

- فشار سکون (کل)
- دمای سکون (کل)
- جهت جریان
- فشار استاتیک
- پارامترهای آشفتگی (برای شبیه‌سازی جریانهای آشفته)
- پارمتهای تابش (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با انتقال حرارت تابشی با استفاده از مدلهای P-۱، DTRM و DO)
- نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با واکنشهای شیمیایی)
- نسبت ترکیب و واریانس (برای محاسبه احتراق PDF)
- متغیر پیشرفت (برای محاسبه احتراق پیش آمیخته)
- شرائط مرزی فاز گسسته (برای محاسبه جریان همراه با فاز گسسته)
- نسب حجمی فازهای ثانویه (برای جریانهای چند فازی)
- ضریب افت

بسته به نوع رژیمهای جریان که در بالا عنوان شده، پارامترهای مربوطه در پانل شرط مرزی دریچه ورودی ظاهر شده که باید به درستی تعیین گردد (شکل ۸-۷). در این بخش تنها در مورد چگونگی تعیین ضریب افت توضیحاتی ارائه شده است.



شکل ۸-۷ پانل تعیین شرط مرزی دریچه ورودی.

تعیین ضریب افت

در مدل دریچه ورودی، دریچه بینهایت نازک فرض شده و کاهش فشار درون آن، متناسب با هد دینامیکی سیال و ضریب افت تجربی تعیین شده توسط کاربر، می‌باشد. رابطه بین کاهش فشار و مؤلفه سرعت عمود بر دریچه، v، براساس معادله (۲۲-۷) است.

$$\Delta p = k_L \frac{1}{2} \rho v^2 \qquad (۲۲-۷)$$

که ρ چگالی سیال و k_L ضریب افت بدون بعد می‌باشد. از آنجا که کاهش فشار، Δp، در جهت جریان است، لذا دریچه بصورت یک مانع حتی در حالت جریان برگشتی، ظاهر می‌گردد. می‌توان ضریب افت را بصورت یک عدد ثابت یا تابع چند جمله‌ای از مؤلفه عمودی سرعت در مرز ورودی در نظر گرفت. ضریب افت در کادر فهرست Loss-Coefficient وارد می‌شود.

۷-۷ شرط مرزی فن ورودی

از شرط مرزی فن ورودی برای مدلسازی یک فن با پرش فشار مشخص استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی این گونه مسائل باید پرش فشار فن، جهت جریان، فشار و دمای محیط در ورودی جریان، معلوم باشد. در این بخش چگونگی استفاده از این نوع شرط مرزی تشریح شده است.

۱-۷-۷ ورودیها در شرط مرزی فن ورودی

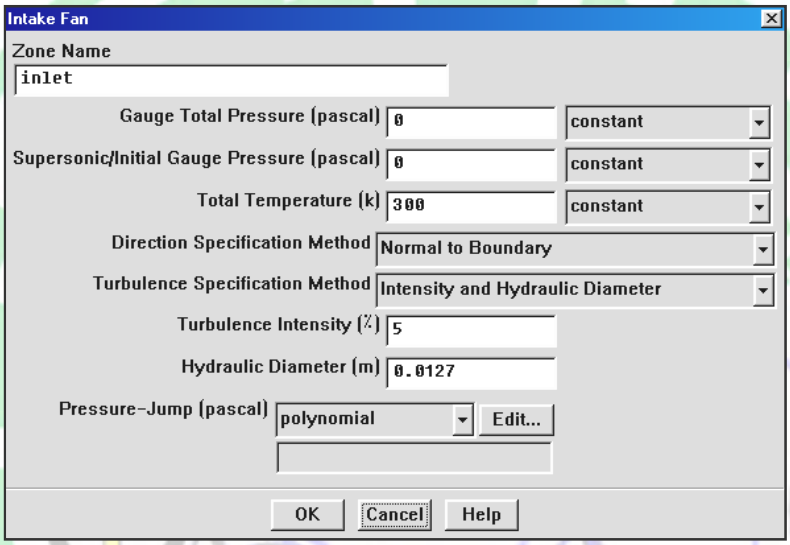
مجدداً یاد آوری می‌شود که در شبیه‌سازی عددی جریان، تعیین دقیق متغیرها و اسکالرهای جریان در مرزها از اهمیت بسیاری برخوردار است. بسته به نوع رژیم جریان، پارامترهای ورودی در مرز فن ورودی با یکدیگر متفاوت است. بطور کلی ورودیهای مربوط به شرط مرزی فن ورودی عبارتست از:

- فشار سکون (کل)
- دمای سکون (کل)
- جهت جریان
- فشار استاتیک
- پارامترهای آشفتگی (برای شبیه‌سازی جریانهای آشفته)
- پارمتهای تابش (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با انتقال حرارت تابشی با استفاده از مدلهای P-۱، DTRM و DO)
- نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با واکنشهای شیمیایی)
- نسبت ترکیب و واریانس (برای محاسبه احتراق PDF)
- متغیر پیشرفت (برای محاسبه احتراق پیش آمیخته)
- شرائط مرزی فاز گسسته (برای محاسبه جریان همراه با فاز گسسته)
- نسب حجمی فازهای ثانویه (برای جریانهای چند فازی)
- پرش فشار

بسته به نوع رژیمهای جریان که در بالا عنوان شده، پارامترهای مربوطه در پانل شرط مرزی فن ورودی ظاهر شده که باید به درستی تعیین گردد (شکل ۹-۷).

تعیین پرش فشار

در مدل فن ورودی، فن بینهایت نازک فرض شده و پرش فشار درون آن، بصورت تابعی از سرعت عبوری از فن، محاسبه می‌گردد. در شرائط جریان برگشتی، فن بصورت یک دریچه خروجی و با ضریب افت متناسب رفتار می‌کند. می‌توان پرش فشار را بصورت یک عدد ثابت یا تابع چند جمله‌ای از مؤلفه عمودی سرعت در مرز ورودی در نظر گرفت. پرش فشار در کادر فهرست Pressure-Jump (شکل ۹-۷) وارد می‌شود.



شکل ۹-۷ پانل تعیین شرط مرزی فن ورودی.

۸-۷ شرط مرزی فشار خروجی

در شرط مرزی فشار خروجی لازمست که فشار استاتیک در مرز خروجی جریان مشخص گردد. مقدار فشار استاتیک تعیین شده تنها برای جریانهای تراکم‌پذیر کاربرد دارد. درصورتیکه جریان در داخل دامنه محاسباتی، بصورت محلی مافوق صوت شود، نرم‌افزار فلوئنت از فشار استاتیک استفاده‌ای نکرده بلکه فشار استاتیک در مرز خروجی را با روش برونیابی محاسبه می‌کند. علاوه براین تمام مقادیر جریان نیز با برونیابی مشخص می‌گردد.

شرائط جریان پایین دست (جریان پشتی) را نیز می‌توان در مرز فشار خروجی تعیین کرد. درصورتیکه مقادیر جریان پایین دست بطور صحیح تعریف شده باشد، همگرائی حل جریان به مشکلات بسیار کمتری برخورد می‌کند و بطور کلی روند همگرائی بسیار بهتر می‌شود. همچنین در نرم‌افزار فلوئنت گزینه‌ای برای استفاده از موازنه شعاعی شرط مرزی خروجی، نیز در نظر گرفته شده است.

۱-۸-۷ ورودیها در شرط مرزی فشار خروجی

در شبیه‌سازی عددی جریان، تعیین دقیق متغیرها و اسکالرهای جریان در مرزها از اهمیت بسیاری برخوردار است. بسته به نوع رژیم جریان پارامترهای ورودی در شرط مرزی فشار خروجی نیز با یکدیگر متفاوت است. بطور کلی ورودیهای مربوط به شرط مرزی فشار خروجی عبارتست از:

- فشار استاتیک

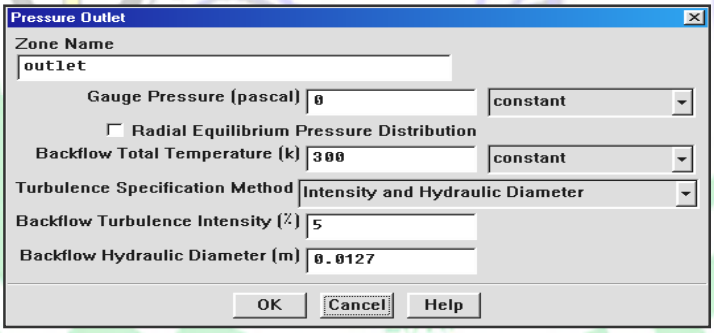
شرائط جریان پایین دست:

- دمای کل (سکون)
- جهت جریان
- پارامترهای آشفتگی (برای شبیه‌سازی جریانهای آشفته)
- نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با واکنشهای شیمیایی)
- نسبت ترکیب و واریانس (برای محاسبه احتراق PDF)
- متغیر پیشرفت (برای محاسبه احتراق پیش آمیخته)
- نسب حجمی فازهای ثانویه (برای جریانهای چند فازی)

سایر پارامترها:

- پارمتهای تابش (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با انتقال حرارت تابشی با استفاده از مدلهای P-۱، DTRM و DO)
- شرائط مرزی فاز گسسته (برای محاسبه جریان همراه با فاز گسسته)

بسته به نوع رژیمهای جریان که در بالا عنوان شده، پارامترهای مربوطه در پانل شرط مرزی فشار خروجی ظاهر شده که باید به درستی تعیین گردد (شکل ۱۰-۷).



شکل ۱۰-۷ پانل تعیین شرط مرزی فشار خروجی.

تعیین فشار استاتیک

در شرط مرزی فشار خروجی لازمست که فشار استاتیک در کادر متن Gauge Pressure وارد شود. از فشار استاتیک تعیین شده تنها برای جریانهای زیرصوت استفاده می‌شود. درصورتیکه جریان در دامنه محاسباتی، بطور محلی مافوق صوت شود. نرم‌افزار فلوئنت از فشار استاتیک استفاده‌ای نکرده بلکه فشار استاتیک در مرز خروجی را با روش برونیابی محاسبه می‌کند. علاوه براین تمام مقادیر جریان نیز با برونیابی مشخص می‌گردد. همچنین باید بخاطر داشت که فشار استاتیک نسبت به فشار مرجع تعیین شده در پانل Operating Condition، منظور می‌گردد.

در نرم‌افزار فلوئنت گزینه‌ای برای استفاده از موازنه شعاعی شرط مرزی خروجی، در نظر گرفته شده است. برای استفاده از این قابلیت باید گزینه Redial Equilibrium Pressure Distribution در پانل تعیین شرط مرزی فشار خروجی (شکل ۱۰-۷) فعال شود. با فعال شدن این گزینه، فشار استاتیک تعریف شده، تنها در کمترین شعاع نسبت به محور دوران منظور گشته و فشار استاتیک در امتداد شعاع در مرز خروجی، با استفاده از رابطه (۲۳-۷) محاسبه می‌گردد.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = \frac{\rho v_\theta^2}{r} \qquad (۷-۲۳)$$

که r، فاصله از محور دوران و v_θ سرعت مماسی است. قابل توجه است که این قابلیت در سرعت دورانی صفر نیز کاربرد دارد. بعنوان مثال برای شبیه‌سازی جریان در یک حلقوی با پرای کنترلی می‌توان از این ویژگی استفاده نمود. ذکر این نکته ضروریست که از این ویژگی تنها برای شبیه‌سازی جریانهای سه بعدی یا جریانهای متقارن محوری استفاده می‌شود.

تعیین شرائط جریان پایین دست

بسته به نوع رژیم جریان، لازمست پارامترهای اسکالر مختلفی را در شرط مرزی فشار خروجی تعیین کرد. بعنوان مثال، برای حل معادله انرژی لازمست که دمای سکون در جریان پایین دست مشخص گردد. انواع پارامترهای اسکالر موجود برای رژیمهای جریان مختلف در قسمت (۱-۳-۷) معرفی شده است. چگونگی تعریف پارمترهای آشفتگی نیز در بخش (۲-۷) توضیح داده شده است. باید توجه داشت که شرائط جریان پایین دست در روند حل مسئله و همگرائی آن نقش انکار ناپذیری دارد. هرچه مقادیر پارامترهای جریان پایین دست با دقت بیشتری تعریف شود، همگرائی مسئله سریعتر و دقت آن نیز بیشتر می‌شود.

۷-۹ شرط مرزی فشار در بی‌نهایت

از شرط مرزی فشار در بی‌نهایت برای مدلسازی شرائط جریان آزاد در مرز بی‌نهایت نظیر عدد ماخ و سایر پارامترهای استاتیکی، استفاده می‌شود. این شرط مرزی بعنوان شرط مرزی مشخصه‌ها[۱] نیز نامیده می‌شود. تنها در شبیه‌سازی جریان خارجی تراکم‌پذیر که چگالی از معادله گازهای کامل محاسبه می‌گردد، از شرط مرزی مذکور استفاده می‌شود. نکته دیگر اینکه مرز بی‌نهایت باید در فاصله مناسبی نسبت به جسم قرار گرفته باشد. بعنوان مثال برای شبیه‌سازی جریان حول یک ایرفویل لازمست که مرز بی‌نهایت در شعاع بیست برابر طول وتر ایرفویل واقع گردد. بطور کلی مکان مرز بی‌نهایت طوری تعیین گردد که گرادیانهای جریان در آن ناچیز باشد.

۷-۹-۱ ورودیهای در شرط مرزی فشار در بی‌نهایت

ورودیهای مربوط به شرط مرزی فشار در بی‌نهایت عبارتست از:

- فشار استاتیک
- عدد ماخ

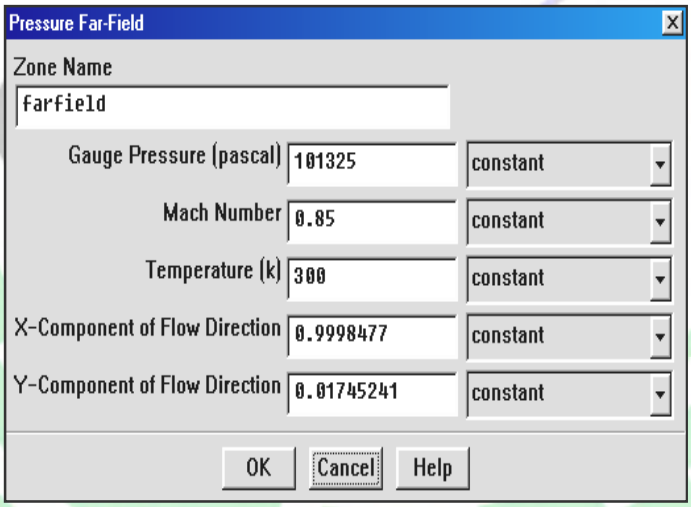
[۱]–Characteristic Boundary Condition

- دمای استاتیک
- جهت جریان
- پارامترهای آشفتگی (برای شبیه‌سازی جریانهای آشفته)
- پارمتهای تابش (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با انتقال حرارت تابشی با استفاده از مدلهای P-۱، DTRM و DO)
- نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با واکنشهای شیمیایی)
- نسبت ترکیب و واریانس (برای محاسبه احتراق PDF)
- شرائط مرزی فاز گسسته (برای محاسبه جریان همراه با فاز گسسته)

بسته به نوع رژیمهای جریان که در بالا عنوان شده، پارامترهای مربوطه در پانل شرط مرزی فشار ورودی ظاهر شده که باید به درستی تعیین گردد (شکل ۱۱-۷).

تعیین سایر پارامترهای آشفتگی

بسته به نوع رژیم جریان، لازمست پارامترهای اسکالر مختلفی را در شرط مرزی فشار در بی‌نهایت تعیین کرد. کاردهای متن Gauge Pressure و Temperature بیانگر فشار و دمای استاتیک می‌باشد. در کادر متن Much Number در شکل (۱۱-۷) عدد ماخ وارد می‌شود. عدد ماخ تعیین شده می‌تواند کوچکتر(جریانهای زیر صوت)، مساوی (جریان سونیک) و یا بزرگتر (جریان مافوق صوت) از یک باشد. چگونگی تعریف پارمترهای آشفتگی نیز در بخش (۲-۷) توضیح داده شده است.



شکل ۱۱-۷ نمونه‌ای از پانل تعیین شرط مرزی فشار در بی‌نهایت، برای جریان غیر لزج.

۲-۹-۷ فرآیند محاسبات در شرط مرزی فشار در بی‌نهایت

شرط مرزی فشار در بی‌نهایت یک شرط مرزی غیر انعکاسی[۱] براساس ثابتهای ریمان[۲] (متغیرهای مشخصه‌ها) برای جریانهای یک بعدی عمود بر مرز، می‌باشد. در جریانهای زیر صوت دو ثابت ریمان متناظر با امواج ورودی و خروجی وجود دارد که عبارتست از:

$$R_\infty = V_{n_\infty} - \frac{2c_\infty}{\gamma - 1} \qquad (۷-۲۴)$$

$$R_i = V_{n_i} + \frac{2c_\infty}{\gamma - 1} \qquad (۷-۲۵)$$

که V_n اندازه سرعت عمود بر مرز، c سرعت صوت محلی و γ نسب حرارتی ویژه (در گازهای ایده‌آل) می‌باشد. همچنی زیر نویس ∞ برای شرائط جریان در مرز بی‌نهایت و زیر نویس i برای شرائط جریان در مرز داخلی[۳] تعریف شده است. با جمع و تفریق این دو ثابت، مقادیر اندازه سرعت و سرعت صوت محلی محاسبه می‌گردد.

$$V_n = \frac{1}{2}\left(R_i + R_\infty\right) \qquad (۷-۲۶)$$

$$c = \frac{\gamma - 1}{4}\left(R_i - R_\infty\right) \qquad (۷-۲۷)$$

در خروجی جریان مؤلفه‌های سرعت مماسی و انتروپی براساس مقادیر مشخص شده شرائط جریان آزاد برونیابی می‌شود. با مشخص شدن تمام پارامترهای فوق، مقادیر چگالی، سرعت، فشار و دما در مرزها، بدست می‌آید.

۱۰-۷ شرط مرزی جریان خروجی

درصورتیکه مشخصات جریان نظیر سرع یا فشار در مرز خروجی مشخص نباشد، از شرط مرزی جریان خروجی استفاده می‌شود. برای تمام رژیمهای جریان مناسب با بکارگیری شرط مرزی جریان خروجی (بجز جریانهای همراه با انتقال حرارت تابشی در مرز خروجی، فاز گسسته ذرات یا جریان جرمی انشعابی[۱]) در مرز جریان خروجی هیچ پارامتری از جریان تعیین نمی‌شود. در نرم‌افزار فلوئنت مقادیر جریان در مرز جریان خروجی، با استفاده از برونیابی مقادیر در ناحیه داخلی دامنه محاسباتی، بدست می‌آید. بهرصورت باید بخاطر داشت که محدودیتهایی نیز در بکارگیری از این شرط مرزی وجود دارد. این محدودیتها عبارتست از:

۱- در مسائلی که در ورودی جریان، از شرط مرزی فشار ورودی استفاده شده، باید از شرط مرزی فشار خروجی به جرای جریان خروجی در مرز خروجی استفاده گردد.

---

[۱]–Non-Reflecting Boundary Condition

[۲]-Riemann

[۳]-Interior

[۱]–Split Mass Flow

۲- در جریانهای تراکم‌پذیر، بهیچ عنوان از شرط مرزی جریان خروجی استفاده نمی‌شود.
۳- در صورتیکه در جریانهای تراکم‌ناپذیر، جریان عبوری ناپایا و با چگالی متغیر باشد، باز هم نمی توان از شرط مرزی فشار خروجی استفاده کرد.
۴- زمانی از شرط مرزی جریان خروجی استفاده می‌شود که جریان در خروجی کاملاً توسعه یافته باشد.

رفتار نرم‌افزار فلوئنت در مرزهای جریان خروجی

شرط مرزی جریان خروجی که در نرم‌افزار فلوئنت بکار گرفته می‌شود، از موارد زیر پیروی می‌کند:

- شار انتشار برای تمام متغیرهای جریان صفر است.
- تصحیح بالانس جرمی انجام می‌گردد.

شرط شار انتشار صفر منظور شده در مرز خروجی به این مفهوم است که شرائط جریان در مرز جریان خروجی از دامنه برونیابی شده و تحت تأثیر شدید جریان بالادست قرار نمی‌گیرد. فرآیند برونیابی استفاده شده در نرم‌افزار فلوئنت، سرعت و فشار خروجی را با فرض کاملاً توسعه یافته بودن جریان در مرز خروجی، تصحیح می‌کند. جریان کاملاً توسعه یافته به جریانی گفته می‌شود که پروفیل سرع جریان (و یا سایر پروفیلها نظیر پروفیل دما) در جهت جریان تغییر نمی‌کند. ذکر این نکته ضروریست که ممکن است در مرز جریان خروجی گرادیانهایی در جهت جریان عرضی[۲] نیز وجود داشته باشد.در اینگونه موارد تنها شارهای انتشار در جهت عمود بر مرز خروجی صفر فرض می‌شود.

چگونگی استفاده از شرط مرزی جریان خروجی

همانطور که در بالا اشاره شده، شرط مرزی جریان خروجی تنها برای جریانهای کاملاً توسعه یافته در مرز خروجی، کاربرد دارد. بهرصورت ممکن است از این شرط مرزی در جائیکه جریان کاملاً توسعه نیافته، نیز استفاده شود. در چنین شرائطی فرض صفر بودن شار انتشار، روی روند حل در مرز خروجی تأثیر می‌گذارد. بطور کلی مکان مناسب مرز جریان خروجی در مثال زیر بررسی شده است.

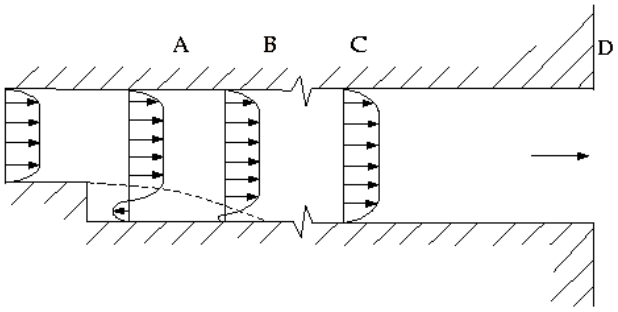
در شکل (۱۲-۷) یک مثال ساده دو بعدی از جریان پشت پله نشان داده شده است. موقعیت D بیانگر مرز خروجی واقعی جریان می‌باشد. با توجه به شکل جریان در موقعیت C کاملاً توسعه یافته می‌باشد. بنابراین اگر مرز جریان خروجی در موقعیت D قرار گیرد، بسیار مناسب می‌باشد. در صورتیکه مرز جریان خروجی در موقعیت C واقع گردد، استفاده شرط مرزی جریان خروجی کاملاً قابل قبول است. اما اگر موقعیت B بعنوان مرز خروجی فرض شود، این فرض فرض درستی نبوده و پاسخ نهایی خطای قابل توجهی دارد. در نهایت اگر شرط مرزی جریان خروجی در موقعیت A اعمال شود، بهیچ عنوان مناسب نبوده و انجام اینکار حتی موجب واگرائی حل مسئله می‌شود. بخاطر اینکه در دو موقعیت B و A (بویژه در موقعیت A) جریان برگشتی وجود دارد، انتخاب شرط مرزی جریان خروجی در این مکانها امری کاملاً اشتباه است.

باید توجه داشت، درصورتیکه در فرآیند حل در هر نقطه از مرز خروجی، چرخش جریان[۱] وجود داشته باشد، همگرائی حل، حتی اگر در حل نهایی چنین اتفاقی رخ ندهد، تحت تأثیر قرار خواهد گرفت.

---

[۲]–Cross-Stream

[۱]-Recirculation



شکل ۱۲-۷ کیفیت انتخاب مکان مرز جریان خروجی در طول دامنه محاسباتی.

شرط مرزی جریان جرمی انشعابی

در نرم‌افزار فلوئنت می‌توان از چند مرز جریان خروجی استفاده کرد. در این حالت کافیست نسبت جرم عبوری از هر یک از مرزهای جریان خروجی مشخص گردد. در پانل تعیین شرط مرزی جریان خروجی (شکل ۱۳-۷)، کادر متن Flow Rate Weigthing برای تعیین نسبت جریان عبوری در مرز مشخص شده، می‌باشد. نسبت جریان عبوری در هر مرز از رابطه زیر بدست می‌آید.

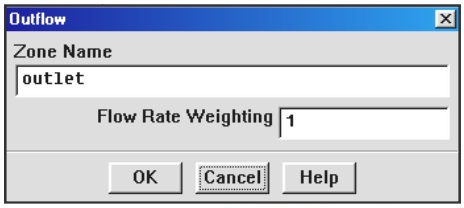
درصد جریان عبوری از یک مرز=

مقدار پیش‌فرض این ضریب در پانل Outflow، برابر یک است. اگر نسبت جرمی جریان عبوری از هریک از این نوع مرزها با یکدیگر برابر بوده و یا اینکه تنها یک مرز جریان خروجی وجود داشته باشد، نیازی به تغییر این ضریب نمی‌باشد. در حالتی که نسبت جریان عبوری از چند مرز جریان خروجی با هم برابر باشد، نرم‌افزار فلوئنت طوری جریان عبوری از هر مرز را محاسبه می‌کند که نسبت آنها کاملاً یکسان باشد.

درصورتیکه نسبت جریان عبوری در مرزها متفاوت باشد، لازمست این نسبت بطور صحیح مشخص گردد. بعنوان مثال اگر ضریب نسبت جریان در دو مرز خروجی ۰.۷۵(برای مرز اول) و ۱(برای مرز دوم) مشخص گردد، نسبت جرمی عبوری از هر مرز طبق روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$Boundary1 = \frac{0.75}{0.75+1.0} = 0.429$$

$$Boundary2 = \frac{1.0}{0.75+1.0} = 0.571$$



شکل ۷-۱۳ پانل تعیین شرط مرزی جریان خروجی.

۷-۱۱ شرط مرزی دریچه خروجی

از شرط مرزی دریچه خروجی برای مدلسازی یک دریچه در خروجی جریان، با ضریب افت مشخص استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی این گونه مسائل باید ضریب افت دریچه، فشار و دمای محیط در پایین دست جریان، معلوم باشد. در این بخش چگونگی استفاده از این نوع شرط مرزی تشریح شده است.

۷-۱۱-۱ ورودیها در شرط مرزی دریچه ورودی

بطور کلی ورودیهای مربوط به شرط مرزی دریچه خروجی عبارتست از:

- فشار استاتیک

شرائط در پایین دست جریان

- دمای سکون (برای حل معادله انرژی)
- پارامترهای آشفتگی (برای شبیه‌سازی جریانهای آشفته)
- نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با واکنشهای شیمیایی)
- نسبت ترکیب و واریانس (برای محاسبه احتراق PDF)
- متغیر پیشرفت (برای محاسبه احتراق پیش آمیخته)
- نسب حجمی فازهای ثانویه (برای جریانهای چند فازی)

سایر پارامترها

- پارمتهای تابش (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با انتقال حرارت تابشی با استفاده از مدلهای P-۱، DTRM و DO)
- شرائط مرزی فاز گسسته (برای محاسبه جریان همراه با فاز گسسته)
- ضریب افت

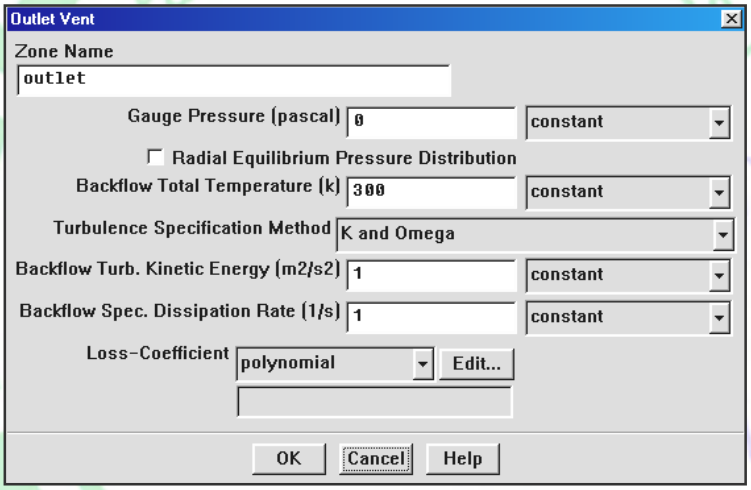
بسته به نوع رژیمهای جریان که در بالا عنوان شده، پارامترهای مربوطه در پانل شرط مرزی دریچه خروجی ظاهر شده که باید به درستی تعیین گردد (شکل ۷-۱۴).

تعیین ضریب افت

در مدل دریچه خروجی، دریچه بینهایت نازک فرض شده و کاهش فشار درون آن، متناسب با هد دینامیکی سیال و ضریب افت تجربی تعیین شده توسط کاربر، می‌باشد. رابطه بین کاهش فشار و مؤلفه سرعت عمود بر دریچه، v، براساس معادله (۷-۲۲) است.

$$\Delta p = k_L \frac{1}{2} \rho v^2 \qquad (۷-۲۸)$$

که ρ چگالی سیال و k_L ضریب افت بدون بعد می‌باشد. از آنجا که کاهش فشار، Δp، در جهت جریان است، لذا دریچه بصورت یک مانع حتی در حالت جریان برگشتی، ظاهر می‌گردد. می‌توان ضریب افت را بصورت یک عدد ثابت یا تابع چند جمله‌ای از مؤلفه عمودی سرعت در مرز ورودی در نظر گرفت. ضریب افت در کادر فهرست Loss-Coefficient وارد می‌شود.



شکل ۷-۱۴ پانل تعیین شرط مرزی دریچه خروجی.

۷-۱۲ شرط مرزی فن خروجی

از شرط مرزی فن خروجی برای مدلسازی یک فن در مرز خروجی، با پرش فشار مشخص استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی این گونه مسائل باید پرش فشار فن، فشار و دمای محیط در پایین دست جریان، معلوم باشد. در این بخش چگونگی استفاده از این نوع شرط مرزی تشریح شده است.

۱-۱۲-۷ ورودیها در شرط مرزی فن ورودی

بطور کلی ورودیهای مربوط به شرط مرزی فن ورودی عبارتست از:

- فشار استاتیک

شرائط در پایین دست جریان

- دمای سکون (برای حل معادله انرژی)
- پارامترهای آشفتگی (برای شبیه‌سازی جریانهای آشفته)
- نسبت جرمی گونه‌های شیمیایی (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با واکنشهای شیمیایی)
- نسبت ترکیب و واریانس (برای محاسبه احتراق PDF)
- متغیر پیشرفت (برای محاسبه احتراق پیش آمیخته)
- نسب حجمی فازهای ثانویه (برای جریانهای چند فازی)

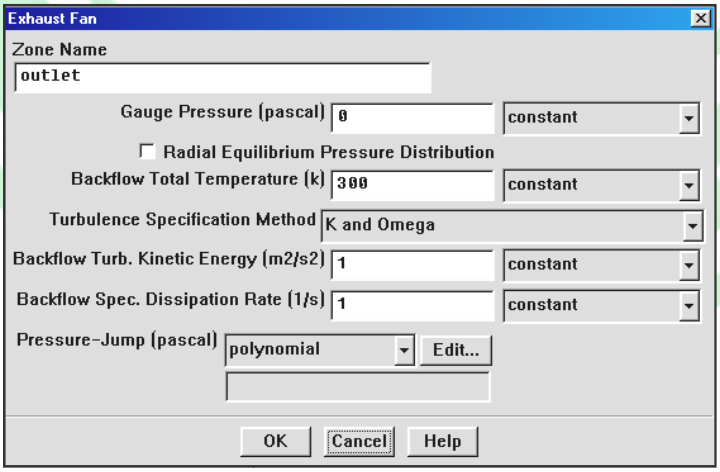
سایر پارامترها

- پارمتهای تابش (برای شبیه‌سازی جریانهای همراه با انتقال حرارت تابشی با استفاده از مدلهای P-۱، DTRM و DO)
- شرائط مرزی فاز گسسته (برای محاسبه جریان همراه با فاز گسسته)
- پرش فشار

بسته به نوع رژیمهای جریان که در بالا عنوان شده، پارامترهای مربوطه در پانل شرط مرزی فن خروجی ظاهر شده که باید به درستی تعیین گردد (شکل ۱۵-۷).

تعیین پرش فشار

در مدل فن خروجی، فن بینهایت نازک فرض شده و پرش فشار درون آن، بصورت تابعی از سرعت عبوری از فن، محاسبه می‌گردد. در شرائط جریان برگشتی، فن بصورت یک دریچه ورودی و با ضریب افت متناسب رفتار می‌کند. می‌توان پرش فشار را بصورت یک عدد ثابت یا تابع چند جمله‌ای از مؤلفه عمودی سرعت در مرز ورودی در نظر گرفت. پرش فشار در کادر فهرست Pressure-Jump (شکل ۹-۷) وارد می‌شود.



شکل ۱۵-۷ پانل تعیین شرط مرزی فن خروجی.

۷-۱۳ شرط مرزی دیواره

از شرط مرزی دیواره در مرزهایی که سیال توسط یک جامد، محصور می‌گردد، استفاده می‌شود. در جریانهای لزج، شرط غیرلغزشی[۱] بودن جریان چسبیده به دیواره، در پیش فرض نرم‌افزار فلوئنت منظور شده است. البته می‌توان با تعیین میزان تنش برشی، سرعت جریان چسبیده به دیوار را مشخص نمود. بعنوان یک مثال کاربردی برای شبیه‌سازی جریان لزج حول یک خودرو، اگر در مرز ورودی، سرعت مشخص شده، لازمست تنش برشی برای سطح زمین صفر فرض گردد تا لایه مرزی روی سطح زمین تشکیل نگردد. تنش برشی و انتقال حرارت بین سیال و دیوار با استفاده از جزئیات جریان در میدان جریان محلی محاسبه می‌گردد.

۷-۱۳-۱ ورودیها در شرط مرزی دیواره

تعیین مناسب پارامترها در مرز دیواره اهمیت بسیار زیادی در دقت نتایج بدست آمده دارد. بسته به نوع جریان لازمست پارامترهای مختلفی مشخص گردد. بطور کلی پارامترهای زیر را می‌توان در مرز دیواره مشخص نمود:

- شرائط مرزی حرارتی (برای محاسبه انتقال حرارت)
- شرائط مرزی سرعت (برای دیواره‌های متحرک یا دورانی)
- تنش برشی (برای دیواره‌های لغزان)
- زبری سطح دیواره (برای شبیه‌سازی جریانهای آشفته)
- شرائط مرزی گونه‌های شیمیایی (برای محاسبه گونه‌های شیمیایی در جریانهای همراه با واکنش شیمیایی)
- شرائط مرزی واکنش شیمیایی (برای محاسبه واکنش سطح)
- شرائط مرزی تابشی (برای محاسبات همراه با مدلهای انتقال حرارت تابشی P۱، DTRM و DO)
- شرائط مرزی فاز گسسته (برای محاسبه فاز گسسته)

در ادامه هریک از موارد بالا توضیح داده شده است.

۷-۱۳-۱-۱ تعیین شرائط مرزی حرارتی روی دیواره

برای حل معادله انرژی باید شرط مرزی حرارتی روی مرزهای دیواره مشخص گردد. در نرم‌افزار فلوئنت شش نوع شرط مرزی حرارتی در نظر گرفته شده است. این شرائط مرزی حرارتی عبارتست از:

شار حرارتی ثابت..... Fixed Heat Flux

دما ثابت..... Fixed Temperature

[۱]–No-Slip

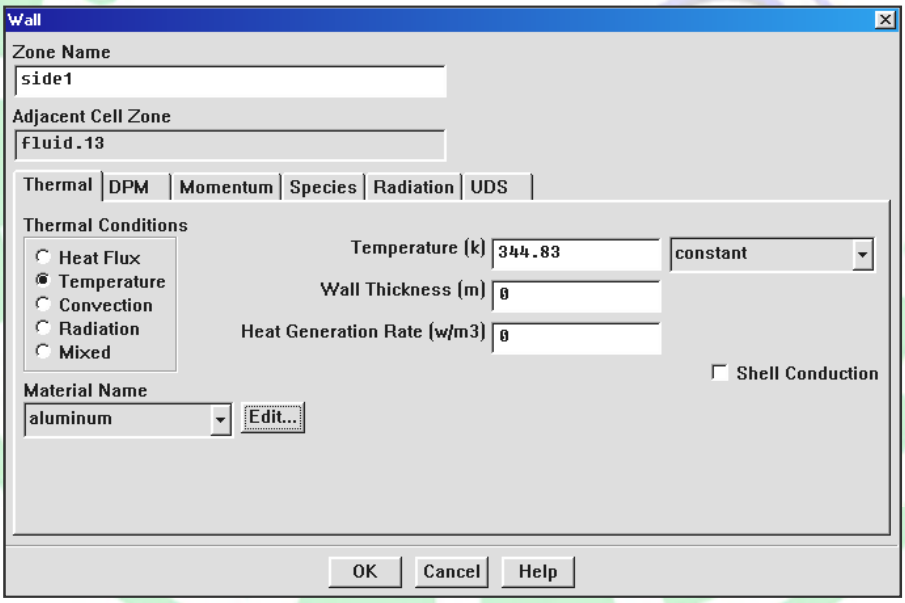
انتقال حرارت جابجایی..... Convective Heat Transfer

انتقال حرارت تابشی خارجی..... External Radiation Heat Transfer

ترکیب انتقال حرارت تابشی و جابجایی..... Combined External Radiation AND Convective Heat Transfer

اگر دیواره یک دیواره دو طرفه باشد، یعنی اینکه یک مرز دیواره بین دو ناحیه پیوستگی (سیال-سیال یا سیال-جامد) قرار گرفته باشد، مسئله انتقال حرارت توأم[1] مطرح می‌گردد. در اینحالت گزینه Coupled در شرط مرزی حرارتی دیواره، ظاهر می‌گردد. با استفاده از این گزینه می‌توان انتقال حرارت بین دو ناحیه پیوستگی را محاسبه نمود. نکته دیگر اینکه نرم‌افزار فلوئنت می‌تواند انتقال حرارت در محیطهای جامد را نیز شبیه‌سازی کند.

درادامه چگونگی تعیین پارامترهای شرائط مرزی حرارتی تشریح شده است. باید بخاطر داشت اگر مرز دیواره ضخامت دادشته باشد، لازمست پارامترهای دیگری نظیر مقاوت حرارتی دیواره نازک و چشمه حرارتی در دیواره نیز مشخص گردد که در ادامه این بخش به آن اشاره شده است. شرائط مرزی حراتی دیواره در پانل تعیین شرط مرزی دیواره (شکل ۱۶-۷) وارد می‌شود. قابل توجه است که ظاهر پانل شرط مرزی دیواره در نسخه‌های ۵.۲۳ و ۶.۰۱۲ نرم‌افزار فلوئنت با یکدیگر متفاوت است، اما چگونگی تنظیم این پانلها مشابه یکدیگر می‌باشد. شکل (۱۶-۷) نمایشگر پانل تعیین شرط مرزی در نسخه ۶.۰۱۲ نرم‌افزار فلوئنت می‌باشد.



شکل ۱۶-۷ پانل تعیین شرط مرزی دیواره.

[1]–Conjugated HEAT Transfer

شرط مرزی شار حرارتی

برای محاسبات شار حرارتی، باید گزینه Heat Flux در قسمت Termal Condition انتخاب شده و مقادیر مناسب پارامترهای مربوطه، وارد شود. البته می‌توان دیورا را آدیابایک فرض کرده و مقدار شار حرارتی را صفر در نظر گرفت (طبق پیش فرض نرم‌افزار).

شرط مرزی دما ثابت

برای محاسبات دما ثابت، باید گزینه Temperature در قسمت Termal Condition انتخاب شده و مقادیر مناسب پارامترهای مربوطه، وارد شود. در این حالت محاسبات شار حرارتی براساس معادلات (۳۵ و ۳۴-۷) انجام می‌شود.

شرط مرزی انتقال حرارت جابجایی

برای حالت شرط مرزی انتقل حرارت جابجایی، باید گزینه Convection در قسمت Termal Condition انتخاب شده و مقادیر مناسب پارامترهای مربوطه، وارد شود. تئوری و معادلات مربوط به شرط مرزی مذکور در ادامه این بخش توضیح داده شده است.

شرط مرزی انتقال حرارت تابشی خارجی

برای حالت شرط مرزی انتقل حرارت تابشی خارجی، باید گزینه Radiation در قسمت Termal Condition انتخاب شده و مقادیر مناسب پارامترهای مربوطه نظیر ضریب تابش خارجی و دمای تابشی خارجی، وارد شود.

شرط مرزی ترکیب انتقال حرارت تابشی و جابجایی

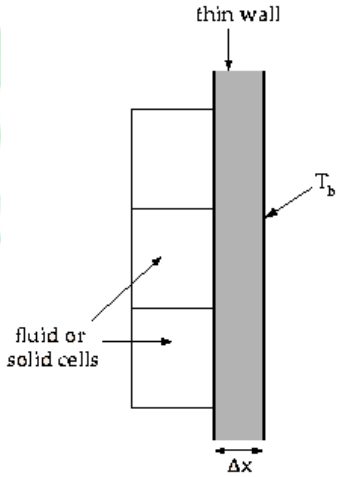
در شرط مرزی دیواره می‌توان هر دو شرط مرزی انتقال حرارت تابشی و جابجایی را همزمان منظور نمود. برای اینکار باید مقادیر مناسب در کادرهای متن مربوط به گزینه Mixed وارد شود. در این نوع شرط مرزی لازمست ضریب انتقال حرارت، دمای جریان آزاد، ضریب تابش خارجی و دمای تابشی خارجی بطور صحیح مشخص گردد.

پارامترهای مقاومت حرارتی دیواره نازک

در پیش‌فرض نرم‌افزار فلوئنت، ضخامت دیواره صفر فرض شده است. اما بهرصورت می‌توان در ارتباط با هر گونه شرائط حرارتی، یک لایه نازک ماده بین دو ناحیه را مدلسازی نمود. برای مثال، می‌توان اثر یک تکه صفحه فلزی بین دو ناحیه سیال، پوششی روی ناحیه جامد یا مقاوت برخورد بین دو ناحیه جامد، را شبیه‌سازی کرد. در نرم‌افزار فلوئنت از معادله هدایت حرارتی یک بعدی برای محاسبه مقاومت حرارتی دیواره و منبع حرارتی در دیواره، استفاده می‌شود.

برای بدست آوردن تأثیر پارامترهای فوق لازمست که جنس ماده، ضخامت و همچنین نرخ تولید حرارتی در دیواره بدرستی تعریف شود. جنس دیواره در پانل Material و ضخامت دیواره در کادر متن Wall Thickness Field در پانل تعیین شرط مرزی دیواره مشخص می‌گردد. همچنین مقاومت حرارتی دیواره بصورت $\Delta x / k$ می‌باشد که k، ضریب هدایت گرمایی و Δx، ضخامت دیواره است. چگونگی تعیین شرط مرزی حرارتی

برای یک دیواره نازک در شکل (۱۷-۷) نشان داده شده است. در صورت نیاز لازمست نرخ تولید حرارت نیز در کادر متن Heat Generation Field مشخص گردد. برای مثال برای مدلسازی مدار چاپی که مقاومت الکتریکی موجب تولید حرارت می‌گردد، از این گزینه استفاده می‌شود.



شکل ۱۷-۷ شرائط حرارتی مشخص شده در خارج از یک دیواره نازک.

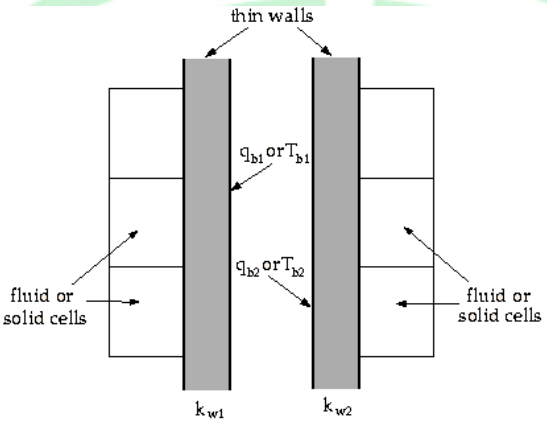
شرائط حرارتی برای دیواره‌های دو طرفه

اگر دیواره یک دیواره دو طرفه باشد، یعنی اینکه یک مرز دیواره بین دو ناحیه پیوستگی (سیال-سیال یا سیال-جامد) قرار گرفته باشد، مسئله انتقال حرارت توأم[۱] مطرح می‌گردد. در چنین حالتی، زمانیکه فایل شبکه توسط نرم‌افزار فلوئنت خوانده شود، بطور خودکار یک دیواره مجازی با عنوان Shadow برای هر یک از دیواره‌های دو طرفه در نظر گرفته می‌شود. بعنوان مثال اگر مرز دیواره Wall-۱ یک دیواره دو طرفه باشد. پس از فراخوانی در فلوئنت مرز دیواره مجازی Wall-۱-shadow که دقیقاً منطبق بر مرز Wall-۱ است ساخته شده که هر یک از این مرز به یکی از دو ناحیه پیوستگی ارتباط دارد. در چنین شرائطی می‌توان شرائط مرزی مختلفی را برای دو دیواره مذکور در نظر گرفت و یا اینکه با انتخاب گزینه Coupled، انتقال حرارت دو دیواره متأثر از یکدیگر بوده و بصورت کوپله باشد. در ادامه چگونگی تعریف شرائط حرارتی برای دیواره دو طرفه بصورت کوپل شده یا مجزا، توضیح داده شده است.

- در صورتیکه دو طرف دیواره کوپله باشد، کافیست گزینه Coupled انتخاب شود (شرط حرارتی Coupled تنها در شرط مرزی دیواره‌های دو طرفه ظاهر می‌شود.). در اینحالت تعریف سایر پارامترهای نیازی نیست، چراکه نرم‌افزار فلوئنت بطور خودکار و بر اساس مقادیر محاسبه شده در المانهای مجاور دیواره، انتقال حرارت در دیواره را محاسبه می‌کند. می‌توان جنس، ضخامت و مقدار تولید حرارتی دیواره را برای محاسبه دیواره‌های نازک مشخص نمود. قابل توجه است که تعریف این پارامترها برای یک دیواره بطور خودکار برای دیواره مجازی متناظر آن، نیز در نظر گرفته می‌شود.

[۱]–Conjugated Heat Transfer

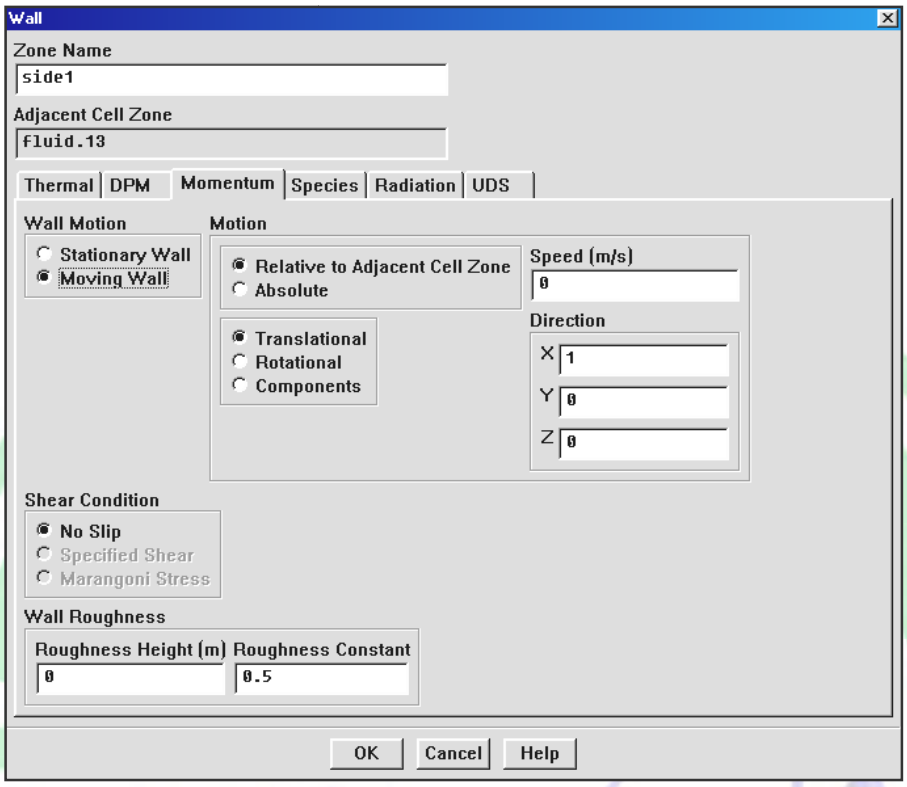
- درصورتیکه شرائط حرارتی دو دیوار مجزا از یکدیگر باشد، لازمست گزینه Temperature یا Heat Flux برای هر یک از دیواره‌ها انتخاب شده و شرائط حرارتی مناسب اعمال گردد. بدیهی است که در اینحالت انتقال حرارت جابجایی یا تابشی بین دو دیواره مفهومی ندارد و بنابراین این نوع انتقال حرارت مورد استفاده قرار نمی‌گیرد. نکته دیگر اینکه اگر ضخامت هر یک از دو دیواره صفر نباشد، باید همانند شکل (۱۸-۷) شرائط مرزی حرارتی برای هر یک از دیواره‌ها تعیین شود. همچنین جنس دو دیواره نیز می‌تواند با یکدیگر تفاوت داشته باشد. قابل توجه است که در شکل (۱۸-۷)، شکاف بین دو طرف دیوار جزء مدل نبوده و تنها برای درک بهتر و بصورت سمبلیک نمایش داده شده است. در شکل (۱۸-۷) پارامتر k_w بیانگر ضریب هدایت حرارتی برای هر یک از دیواره‌ها می‌باشد.



شکل ۱۸-۷ شرائط مرزی حرارتی برای دیواره دو طرف در حالت مجزا.

۲-۱-۱۳-۷ تعیین شرائط سرعت برای دیواره‌های متحرک

در بسیاری از مسائل نظیر شبیه‌سازی جریان در داخل روتور، مرزهای دیواره متحرک است. در صورتیکه مرز دیواره دارای حرکت مماسی باشد، لازمست سرعت انتقالی و یا دورانی دیواره مشخص گردد. شرائط سرعت دیواره در قسمت Motion پانل تعیین شرط مرزی دیواره (شکل ۱۹-۷) مشخص می‌گردد. قابل توجه است که در نرم‌افزار فلوئنت امکان شبیه‌سازی جریان در مسائلی که دیواره عمود بر مسیر جریان حرکت می‌کند، امکان پذیر نیست. البته با استفاده از تعریف سرعت نسبی می‌توان تا حدود بسیار زیادی این مشکل را از بین برد.



شکل ۱۹-۷ پانل تعیین شرط مرزی دیواره برای دیواره‌های متحرک.

تعیین سرعت مطلق یا نسبی

در صورتیکه المانهای مجاور دیواره متحرک باشد (یعنی از قالب مرجع متحرک یا شبکه لغزان استفاده شود)، می‌توان سرعت دیواره نسبت به ناحیه متحرک را بصورت مطلق (گزینه Absolute در قسمت Motion) و یا نسبی (گزینه Relative to Adjacent Cell Zone در قسمت Motion) تعریف کرد. اگر سرعت دیواره بصورت نسبی تعریف شود، سرعت صفر دیواره به این مفهوم است که دیواره نسبت به قالب مرجع ثابت است و بنابراین باید سرعت قالب مرجع بصورت مطلق تعیین گردد.

در مسائلی که از قالب یا قالبهای مرجع متحرک یا شبکه‌های لغزان و یا سطوح اختلاط استفاده شده و سرعت دیوراه نسبت به قالب متحرک ثابت است، پیشنهاد می‌گردد که سرعت دیوراه بطور نسبی مشخص گردد. این امر موجب کاهش خطای احتمالی تعریف پارامترها توسط کاربر شده و همچنین با تغییر سرعت قالب دیگر نیازی به تعریف مجدد سرعت دیواره نمی‌باشد. همچنین در صورتیکه سرعت مطلق قالب مرجع صفر باشد، مفهوم سرعت نسبی یا مطلق دیواره تفاوتی با یکدیگر ندارد.

سرعت انتقالی دیواره

برای مسائلی که مرز دیواره دارای حرکت خطی یا انتقالی باشد (بعنوان مثال یک کانال مربعی که یکی از مرزهای دیواره متحرک است)، می‌توان سرعت دیوراه را با استفاده از گزینه Transitional در قسمت Motion پانل تعیین شرط مرزی دیواره (شکل ۱۹-۷) مشخص نمود. طبق پیش‌فرض نرم‌افزار فلوئنت دیوراه ثابت بوده و گزینه Moving Wall غیر فعال است.

سرعت دورانی دیواره

برای شبیه‌سازی جریان در حالتهایی که دویاره بصورت دورانی حرکت می‌کند، با استفاده از گزینه Rotational در قسمت Motion، سرعت دورانی دیوراه (کادر متن Speed) نسبت به محور (Rotation Axis) و مرکز دوران (Rotation Axis Origin) مشخص شده، تعیین می‌گردد. در مسائل دو بعدی محور دوران همان محور Z دستگاه مختصات است. اما برای مسائل دو بعدی متقارن محوری، محور دوران مؤلفه X دستگاه مختصات می‌باشد. تأکید می‌گردد که سرعت دورانی دیواره باید بدقت تعیین گردد. در بسیاری موارد مشاهده شده که کاربران دقت کافی در تعریف سرعت دیواره نداشته‌اند.

تعیین سرعت دیواره برای دیواره‌های دو طرفه

همانطور که پیشتر آشاره گردید، اگر یک دیواره بین دو ناحیه پیوستگی قرار گرفته باشد، نرم‌افزار فلوئنت بطور خودکار یک دیواره مجازی (Shadow) متناظر با دیواره مذکور تولید می‌کند. در این حالت می‌توان برای هر دو دیواره واقعی و مجازی سرعتهای متفاوت تعریف کرد. البته ذکر این نکته ضروریست، در صورتیکه یک دیواره (با دیواره مجازی متناظر با آن) مجاور یک ناحیه جامد باشد، نمی‌توان برای آن حرکتی در نظر گرفت.

مدلسازی دیواره‌های لغزان[1]

طبق پیش‌فرض نرم‌افزار فلوئنت، دیواره‌ها در جریانهای لزج از قانون غیر لغزشی بودن پیروی می‌کند. بعبارت دیگر سرعت جریان روی دیواره برابر صفر می‌باشد. اما در بعضی حالات ممکن است که لازم باشد، سرعت جریان روی دیواره برابر سرعت جریان آزاد باشد. بعنوان مثال برای مدلسازی زمین در شبیه‌سازی جریان حول یک خودرو، برای جلوگیری از پیدایش لایه مرزی روی زمین، باید سرعت جریان مجاور با زمین برابر سرعت جریان آزاد باشد. در چنین حالتهایی می‌توان مقدار تنش برشی در کادر متن Specified Shear Stress (شکل ۱۹-۷) را صفر در نظر گرفت.

مدلسازی اثرات زبری دیواره در جریانهای آشفته

بدیهی است که جریان سیال روی سطوح زبر، وضعیتهای مختلفی دارد. بعنوان مثال جریان روی سطوح هواپیماها، کشتیها، توربوماشینها، مبدلهای حرارتی، سیستمهای لوله کشی و همچنین در لایه‌های مختلف اتمسفر و عوارض زمینی با زبری سطحی متفاوتی مواجه می‌شود. زبری سطح روی نیروی درگ و همچنین انتقال جرمی و حرارت روی دیواره‌ها تأثیر بسیر زیادی دارد. در شبیه‌سازی جریانهایی که زبری سطح از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، می‌توان زبری سطح دیواره را بر اساس قانون اصلاح شده دیواره برای زبری سطح، منظور نمود (شکل ۱۹-۷).

---

[1]–Slip Walls

تصحیح قانون دیواره برای زبری سطح

آزمایشهای انجام شده در لوله‌ها و کانالهای زبر، نشان می‌دهد که توزیع سرعت در نزدیکی دیواره‌های زبر در مقیاس شبه لگاریتمی[۱]، با در نظر گرفتن یک نکته (اضافه کردن ثابت B در قانون لگاریتم) از همان شیب $1/k$ برخوردار است. بنابراین قانون دیواره اصلاح شده برای سرعت متوسط با در نظر گرفتن زبری سطح بصورت زیر می‌باشد:

$$\frac{u_p u^*}{\tau_w/\rho} = \frac{1}{k}\ln\left(E\frac{\rho u^* y_p}{\mu}\right) - \Delta B \qquad (۷-۲۹)$$

که $u^* = C_\mu^{1/4} k^{1/2}$ و ΔB تابع زبری می‌باشد که تغییرات ناشی از اثرات زبری سطح را مشخص می‌کند.

بطور کلی ΔB به پارامترهای نوع سطح نظیر هموواری سنباده[۲]، پرچها، شیار داخل پیچ و مهره، رزوه، نخ، شیارها، تورهای سیمی و موارد مشابه و همچنین اندازه زبری سطح بستگی دارد. طبیعی است که یک تابع زبری جامع برای تمامی انواع زبری سطح وجود ندارد. بهر صورت برای یک زبری دانه-سنباده[۳] و موارد شبیه آن از المانهای همراه با زبری یکنواخت، یک رابطه نسبتاً مناسب برای ΔB و براساس ارتفاع بدون بعدی زبری، $K_s^+ = \rho K_s u^*/\mu$ ارائه شده که K_s ارتفاع فیزیکی زبری و $u^* = C_\mu^{1/4} k^{1/2}$ می‌باشد. تحلیل نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که تابع زبری، ΔB، یک تابع منفرد از K_s^+ نبوده، بلکه مقادیر مختلف از مقدار K_s^+ را طلب می‌کند. بطور کلی می‌توان مقادیر مناسب برای K_s^+ را در سه رژیم زیر منظور نمود:

- همواری هیدرودینامیکی ($K_s^+ < 3 \sim 5$)
- حالت گذرا ($3 \sim 5 < K_s^+ < 70 \sim 90$)
- کاملاً زبر ($K_s^+ > 70 \sim 90$)

با توجه به موارد فوق، می‌توان از اثرات زبری در رژیمهای هموار هیدرودینامیکی صرفنظر نمود، اما در رژیمهای گذار و کاملاً زبر، اثرات زبری بسیار زیاد بوده و لازمست که در محاسبات منظور گردد. در نرم‌افزار فلوئنت تمام رژیمهای زبری در سه رژیم فوق دسته بندی شده و از فرمولاسیون پیشنهادی سبسی-برادشاو و بر اساس داده‌های نیکوراذ [۱] که برای هر یک از رژیمها بطور جداگانه تعمیم یافته، استفاده می‌شود.

برای رژیم هموار هیدرودینامیکی ($K_s^+ < 2.25$):

$$\Delta B = 0 \qquad (۷-۳۰)$$

برای رژیم گذرا ($2.25 < K_s^+ < 90$):

$$\Delta B = \frac{1}{k}\ln\left[\frac{K_s^+ - 2.25}{87.75} + C_{K_s} K_s^+\right] \times Sin\left\{0.4258\left(\ln K_s^+ - 0.811\right)\right\} \qquad (۷-۳۱)$$

---

[۱]–Semi-Logarithmic

[۲]–Uniform Sand

[۳]–Sand-Grain

که C_{K_s} ثابت زبری بوده و به نوع زبری بستگی دارد.

در نهایت برای رژیمهای کاملاً زبر ($K_s^+ > 90$):

$$\Delta B = \frac{1}{k}\ln\left(1 + C_{K_s} K_s^+\right) \qquad (۷-۳۲)$$

در حلگر نرم‌افزار فلوئنت، با مشخص بودن پارامترهای زبری، تابع زبری، $\Delta B\left(K_s^+\right)$، با استفاده از روابط (۳۲ـ۳۰-۷) محاسبه می‌گردد. پس از آن، از قانون اصلاح شده دیواره در رابطه (۲۹-۷) برای محاسبه تنش برشی و سایر توابع دیواره برای دمای متوسط و مقادیر آشفتگی، استفاده می‌شود.

تنظیم پارامترهای زبری

برای مدلسازی اثرات زبری در نرم‌افزار فلوئنت، باید دو پارامتر ارتفاع زبری، K_s (کادر متن Roughness Height)، و ثابت زبری، C_{K_s} (کادر متن Roughness Constant)، مشخص گردد. طبق پیش فرض نرم‌افزار فلوئنت، ارتفاع زبری صفر بوده که بیانگر یک دیواره بسیار صاف و هموار است. بنابراین برای منظور کردن اثرات زبری لازمست که مقدار ارتفاع زبری غیر از صفر در نظر گرفته شود. برای سطوح دانه-سنباده یکنواخت، ارتفاع زبری، K_s، همان ارتفاع دانه-سنباده در نظر گرفته می‌شود. اما بطور کلی برای دیواره‌های دانه-سنباده غیر یکنواخت، ارتفاع زبری برابر ارتفاع متوسط (D_{50}) فرض شده که تقریب مناسبی است. برای سایر انواع زبری سطوح، لازمست که از مقدار معادل ارتفاع زبری دانه-سنباده برای تعیین مقدار K_s استفاده شود.

انتخاب مقدار مناسب برای ثابت زبری، C_{K_s}، کاملاً به نوع زبری سطح بستگی دارد. طبق پیش فرض نرم‌افزار فلوئنت، $C_{K_s} = 0.5$ می‌باشد که براساس مدل آشفتگی $k-\varepsilon$ مبتنی بر داده‌های نیکورادز[۱] و برای لوله‌های زبر با زبری دانه-سنباده یکنواخت، محاسبه شده است. البته در مسائل بسیار زیادی ممکن است که زبری دیواره از نوع دانه-سنباده یکنواخت نباشد و لازمست که مقادیر مناسبی برای پارامتر ثابت زبری تعریف شود. آزمایشهای متعددی در این زمینه انجام شده و نتیجه آن اینست که برای زبریهای از نوع دانه-سنباده غیر یکنواخت، شیارها و شبکه‌های سیمی مقادیر $C_{K_s} = 0.5 \sim 1.0$ مناسبترین گزینه می‌باشد. متأسفانه هنوز راه حل دقیقی برای محاسبه ثابت زبری، C_{K_s}، ارائه نشده است.

باید توجه داشت، درصورتیکه ارتفاع اولین ردیف المانهای شبکه روی دیواره از ارتفاع زبری تعریف شده کوتاه‌تر باشد، مسئله از لحاظ فیزیکی مفهومی نداشته و در نتیجه نتایج بدست آمده از دقت مناسبی برخوردار نخواهد بود. بهمین خاطر برای دستیافتن به نتایج دقیقتر لازمست که فاصله دیواره تا مرکز المان مجاور آن از ارتفاع زبری بزرگتر باشد.

تعریف سایر پارامترها در شرط مرزی دیواره

بسته به نوع رژیم جریان لازمست پارامترهای متعددی در شرط مرزی دیواره تعریف شود. بعنوان مثال اگر بر روی دیواره گونه‌های مختلف شیمیایی، واکنش شیمیایی، انتقال حرارت تابشی و همچنین پدیده فاز گسسته وجود داشته باشد، باید پارامترهای مناسبی برای هر یک از این موارد تعیین شود. بمنظور درک بهتر از پدیده‌های فوق چگونگی تعریف این پارامترها در فصلهای مربوطه بطور کامل تشریح شده و از بیان آن در این قسمت خودداری شده است.

۷-۱۳-۲ چگونگی محاسبه تنش برشی در مرزهای دیواره

نرم‌افزار فلوئنت برای شبیه‌سازی جریانهای لزج، از خصوصیات جریان در المانهای مجاور دیواره برای محاسب و پیشگویی مقدار تنش برشی استفاده می‌کند. در جریانهای آرام، محاسبات تنش برشی تنها به گرادیانهای سرعت در مرز دیواره بستگی دارد. در حالیکه در جریانهای آشفته پارامترهای دیگری نیز وجود دارد که در بخش (۹-۱۱) بطور کامل توضیح داده شده است.

اگر دیواره‌ها از یک تنش برشی مشخص برخوردار باشد (یعنی مقدار تنش برشی توسط کاربر مشخص گردد)، نرم‌افزار فلوئنت براساس تنش برشی تعیین شده، مؤلفه مماسی سرعت روی دیواره را محاسبه می‌کند. در جریانهای غیر لزج، دیواره دارای شرط مرزی لغزشی[۱] بوده که در این حالت هیچ گونه اصطکاک روی دیواره وجود نداشته و تنش برشی آن صفر می‌باشد.

در جریانهای آرام، تنش برشی دیواره بر حسب گرادیان مؤلفه عمودی سرعت نسبت به دیواره بدست می‌آید (معادله ۳۳-۷). اگر گرادیان مؤلفه عمودی سرعت نسبت به دیواره زیاد باشد، لازمست که شبکه تولید شده در نزدیکی مرز دیواره به اندازه کافی ریز باشد تا بتواند تغییرات جریان در داخل لایه مرزی را بدرستی پوشش دهد.

$$\tau_w = \mu \frac{\partial v}{\partial y} \qquad (۷-۳۳)$$

۷-۱۳-۳ چگونگی محاسبه انتقال حرارت در مرزهای دیواره

در قسمتهای قبل توضیح داده شده که در نرم‌افزار فلوئنت، روشهای متعددی برای تعریف شرط مرزی حرارتی روی دیواره‌ها در نظر گرفته شده است. بسته به هریک از این روشها، نرم‌افزار فلوئنت از فرمولاسیون مناسب برای محاسبه انتقال حرارت روی دیواره‌ها استفاده می‌کند. در این قسمت، چگونگی محاسبه انتقال حرارت براساس نوع شرط مرزی انتقال حرارت مشخص شده روی دیواره، توضیح داده شده است.

شرط مرزی دمایی

اگر از شرط مرزی دما ثابت برای دیواره استفاده شود، انتقال حرارت بین دیواره و سیال مجاور براساس معادله (۳۴-۷) محاسبه می‌شود.

$$q'' = h_f \left(T_W - T_f\right) + q''_{rad} \qquad (۷-۳۴)$$

که

h_f؛ ضریب انتقال حرارت محلی سیال

T_W؛ دمای سطح دیواره

[۱]–No-Slip

T_f؛ دمای محلی سیال

q''؛ شار حرارتی جابجایی از دیواره؛ و

q''_{rad}؛ شار حرارتی تابشی؛ می‌باشد.

باید توجه داشت که ضریب انتقال حرارت محلی سیال براساس شرائط میدان جریان (بعنوان مثال شرائط میزان آشفتگی، دما و پروفیلهای سرعت) محاسبه می‌گردد. همچنین انتقال حرارت در مرز ناحیه جامد همجوار با مرز دیواره نیز با استفاده از رابطه (۷-۳۵) بدست می‌آید.

$$q'' = \frac{k_s}{\Delta n}\left(T_W - T_s\right) + q''_{rad} \qquad (۷-۳۵)$$

که

k_s؛ ضریب هدایت حرارتی جامد

T_s؛ دمای محلی ناحیه جامد؛ و

Δn؛ فاصله بین سطح دیواره تا مرکز المان در ناحیه جامد؛ می‌باشد.

شرط مرزی شار حرارتی

اگر از شرط مرزی شار حرارتی برای دیواره استفاده گردد، لازمست که شار حرارتی روی سطح دیواره مشخص شود. با مشخص بودن شار حرارتی روی سطح دیواره، نرم‌افزار فلوئنت از همان رابطه (۷-۳۴) اما بصورت معادله (۷-۳۶) برای محاسبه دما روی سطح دیواره همجوار با ناحیه سیال استفاده می‌کند.

$$T_W = \frac{q'' - q''_{rad}}{h_f} + T_f \qquad (۷-۳۶)$$

همچنین دما روی سطح دیواره هم مرز با ناحیه جامد، براساس معادله زیر که در حقیقت همان رابطه (۷-۳۵) می‌باشد، بدست می‌آید.

$$T_W = \frac{\left(q'' - q''_{rad}\right)\Delta n}{k_s} + T_s \qquad (۷-۳۷)$$

شرط مرزی انتقال حرارت جابجایی

در شرط مرزی انتقال حرارت جابجایی، نرم‌افزار فلوئنت از مقادیر ضریب انتقال حرارت خارجی و همچنین دمای چاه حرارتی خارجی[۱]، که بعنوان ورودی توسط کاربر مشخص شده، برای محاسبه شار حرارتی روی سطح دیواره استفاده می‌کند.

[۱]–External Heat Sink Temperature

$$q'' = h_f\left(T_W - T_f\right) + q''_{rad} = h_{ext}\left(T_{ext} - T_W\right) \quad (۷-۳۸)$$

که

h_{ext}؛ ضریب انتقال حرارت خارجی تعیین شده توسط کاربر

T_{ext}؛ دمای چاه حرارتی خارجی تعیین شده توسط کاربر؛ و

q''_{rad}؛ شار حرارتی تابشی؛ می‌باشد.

در رابطه فوق، ضخامت دیواره صفر فرض شده است.

شرط مرزی تابش خارجی

در صورت استفاده از شرط مرزی تابش خارجی، شار حرارتی روی سطح دیواره با استفاده از رابطه (۷-۳۹) محاسبه می‌گردد.

$$q'' = h_f\left(T_W - T_f\right) + q''_{rad} = \varepsilon_{ext}\sigma\left(T_\infty^4 - T_W^4\right) \quad (۷-۳۹)$$

که

ε_{ext}؛ ضریب انتشار در بیرون از سطح دیواره که توسط کاربر مشخص شده

σ؛ ثابت استفان-بولتزمن

T_W؛ دمای سطح دیواره

T_∞؛ دمای چشمه یا چاه تابشی در بیرون از دامنه محاسباتی که توسط کاربر مشخص شده؛ و

q''_{rad}؛ شار حرارتی تابشی به دیواره از داخل دامنه محاسباتی؛ می‌باشد.

در رابطه فوق، ضخامت دیواره صفر فرض شده است.

شرط مرزی ترکیب انتقال حرارت تابشی و جابجایی خارجی

در مسائلی که انتقال حرارت بصورتهای جابجایی و تابشی خارجی وجود دارد، از این شرط مرزی استفاده می‌شود. در این حالتها، شار حرارتی روی سطح دیواره طبق رابطه (۷-۴۰) محاسبه می‌شود.

$$q'' = h_f\left(T_W - T_f\right) + q''_{rad} \\ = h_{ext}\left(T_{ext} - T_W\right) + \varepsilon_{ext}\sigma\left(T_\infty^4 - T_W^4\right) \quad (۷-۴۰)$$

که متغیرها در دو قسمت قبل معرفی شده است. در رابطه فوق، ضخامت دیواره صفر فرض شده است.

محاسبه ضریب انتقال حرارت سیال-جامد

در جریانهای آرام، انتقال حرارت بین ناحیه سیال و سطح دیواره با استفاده از قانون فوریه برای دیواره‌ها، بدست می‌آید. نرم‌افزار فلوئنت از فرم گسسته شده این قانون (معادله ۴۱-۷) استفاده می‌کند.

$$q'' = k_f \left.\frac{\partial T}{\partial n}\right|_{wall} \quad (۷-۴۱)$$

که n مولفه محلی عمود بر سطح دیواره می‌باشد.

برای جریانهای آشفته، فلوئنت از قانون دیواره برای دما که از مقایسه بین انتقال حرارت و ممنتم، مشتق شده، استفاده می‌کند [۲]. جزئیات بیشتر در بخش (۷-۱۱) توضیح داده شده است.

۷-۱۴ شرط مرزی تقارن

در شبیه‌سازی جریان در هندسه‌های متقارن می‌توان، جریان در نصف مدل هندسی را شبیه‌سازی نموده و نتایج بدست آمده را برای کل مدل تعمیم داد. بعنوان مثال در شبیه‌سازی جریان حول خودروها، هواپیماها، سایر موارد که هندسه متقارنی دارند، کافیست که میدان جریان برای نصف مدل خودرو و یا هواپیما شبیه‌سازی گردد. در این گونه مسائل صفحه تقارن بعنوان یک مرز Symmetry (تقارن) در نظر گرفته می‌شود. البته همچنین می‌توان صفحه تقارن را بصورت یک دیواره بدون تنش برشی، نیز فرض نمود. لازم به توضیح است که در شرط مرزی تقارن هیچگونه پارامتر دیگر تعریف نمی‌شود. باید توجه داشت که در مدلهای متقارن محوری بهتر است که از شرط مرزی Axis (تقارن محوری) در محور تقارن استفاده شود.

فرآیند محاسبات در مرزهای متقارن

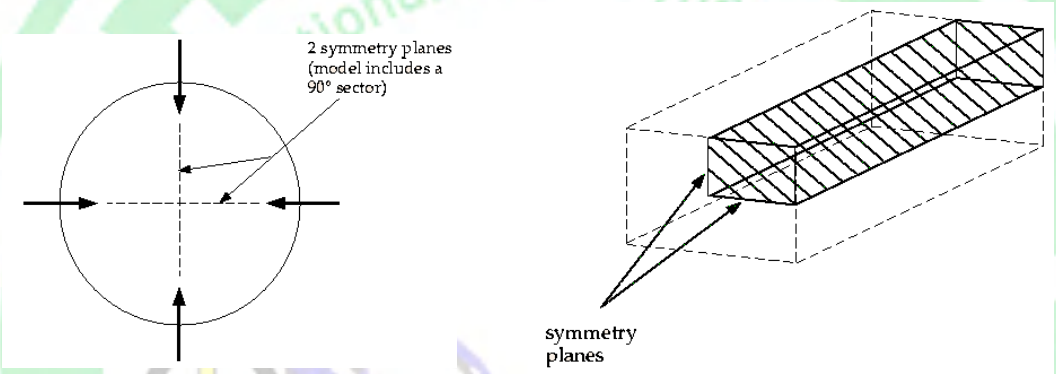
نرم‌افزار فلوئنت شار تمام پارامترهای جریان در مرز تقارن را صفر در نظر می‌گیرد. هیچگونه شار جابجایی در مرز تقارن وجود نداشته و بنابراین مولفه‌های عمودی سرعت در مرز تقارن صفر می‌باشد. همچنین هیچگونه شار انتشار نیز در سطح تقارن وجود نداشته و گرادیانهای نرمال تمام متغیرها در سطح تقارن، نیز صفر می‌باشد. بطور کلی یک مرز تقارن از قوانین زیر پیروی می‌کند.

- مؤلفه عمودی سرعت در مرز تقارن صفر است.
- گرادیانهای نرمال تمام متغیرها در مز تقارن صفر است.

با توجه به موارد بالا، با تعریف مر تقارن برای یک سطح، تمام شارها در آن سطح صفر می‌باشد. از طرفی، از آنجائیکه، تنش برشی در سطح تقارن صفر است، می‌توان اینگونه تفسیر کرد که یک شرط مرزی تقارن، به نوعی شرط مرزی یک دیواره لغزان در یک جریان آشفته را ارضاء می‌کند.

مثالهایی از شرائط مرزی تقارن

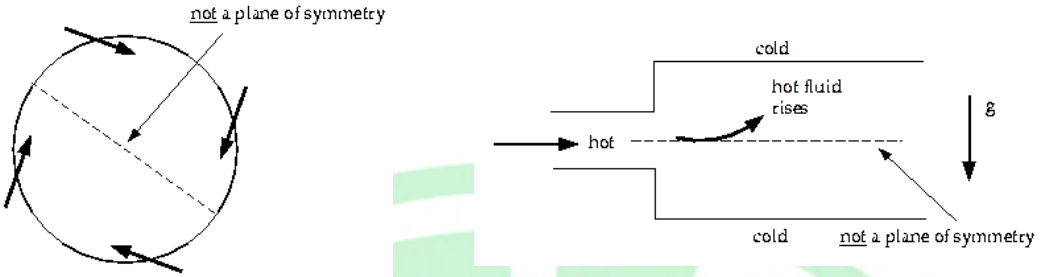
استفاده از شرائط مرزی تقارن برای مدلهای متقارن، موجب کاهش زمان محاسبه و همچنین کاهش حافظه مورد نیاز می‌گردد. بعنوان مثال برای شبیه‌سازی جریان حول خودرو یا هواپیما که در جهت طول متقارن می‌باشد، افیست نیم مدل خودرو یا هواپیما در جهت طول، آنالیز گردد. همچنین برای جریان در داخل لوله‌های استوانه‌ای که بدون چرخش بوده نیز کافیست که تنها ربع مدل لوله آنالیز گردد. در شکل (۲۰-۷) دو نمونه از مسائلی که استفاده از شرط مرزی تقارن در آن مناسب می‌باشد، نشان داده شده است.



الف **ب**

شکل ۲۰-۷ مثالهایی از استفاده از شرط مرزی تقارن برای یک کانال سه بعدی و یک استوانه.

البته مسائلی وجود دارد که اگر چه مدل هندسی متقارن است، اما شرائط جریان در آن مدل متقارن نیست. مواردی نظیر وجود جریانهای جانبی حول یک خودرو یا یک هواپیما، استوانه‌های دوار و همچنین کانالهایی مملو از سیالهایی که شتاب جاذبه در آن تأثیر گذار است (همانند کانلهای آب)، از جملهٔ این مسائل می‌باشد. استفاده از شرط مرزی تقارن در اینگونه مسائل به هیچ عنوان صحیح نبوده و لازم است که تمام مدل شبیه‌سازی گردد. در شکل (۲۱-۷) دو نمونه از این موارد نشان داده شده است.



الف؛جریان همواره با جاذبه در داخل یک کانال **ب؛ جریان در داخل یک استوانه دوار**

شکل ۲۱-۷ مثالهایی از عدم استفاده از شرط تقارن برای هندسه‌های متقارن.

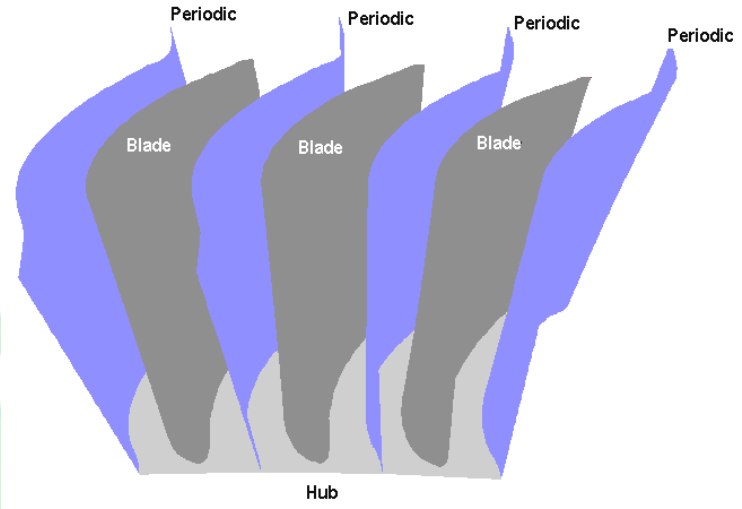
۱۵-۷ شرط مرزی پریودیک

طبیعت جریان و یا انتقال حرارت در بعضی از دستگاه‌ها از ماهیت پریودیکی (تناوبی) برخوردار است. بعبارت دیگر خصوصیات جریان و یا چگونگی انتقال حرارت در این نوع دستگاه‌ها بطور متناوب تکرار می‌شود. بعنوان مثال خصوصیت جریان در بین پره‌های داخل فنها، پمپها، کمپرسورها و توربینهای محوری مشابه یکدیگر می‌باشد. در چنین مسائلی استفاده از شرط مرزی پریودیک در کاهش زمان محاسبه و همچنین حافظه مورد نیاز بسیار مؤثر است. با استفاده از شرط مرزی پریودیک، کافیست تنها جریان حول یک پره شبیه‌سازی شده و نتایج بدست آمدا را برای سایر پره‌ها نیز درنظر گرفت. مهمترین موارد استفاده از شرط مرزی پریودیک در شبیه‌سازی جریان در داخل توربوماشینهای محوری می‌باشد.

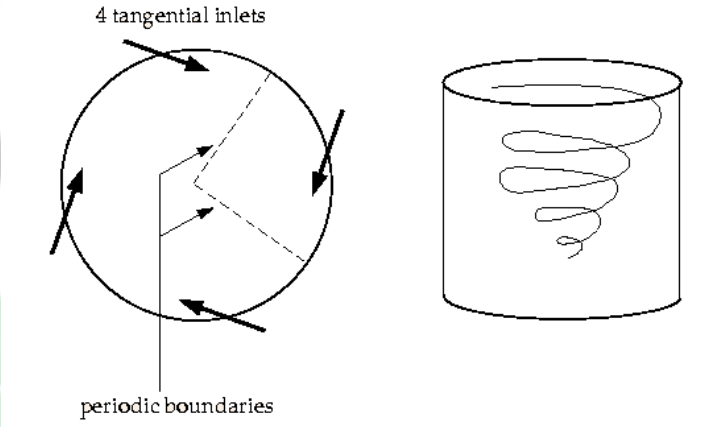
در نرم‌افزار فلوئنت دو نوع شرط مرزی پریودیک قابل استفاده است. در نوع اول افت فشار در سطوح پریودیک منظور نمی‌شود. در نسخه ۴ این نرم‌افزار، شرط مرزی مذکور بعنوان شرط مرزی Cyclic تعریف شده است. در نوع دوم افت فشار نیز درنظر گرفته شده و بنابراین می‌توان جریان پریودیک کاملاً توسعه یافته را نیز شبیه‌سازی نمود. در نسخه ۴ نرم‌افزار فلوئنت نوع دوم شرط مرزی پریودیک با عنوان شرط مرزی Periodic تعریف شده است. در نسخه‌های بالاتر این نرم‌افزار هر دو نوع شرط پریودیک با عنوان شرط مرزی Periodic مشخص شده است. در این قسمت شرط مرزی پریودیک بدون افت فشار توضیح داده شده است.

مثالهایی از مرزهای پریودیک

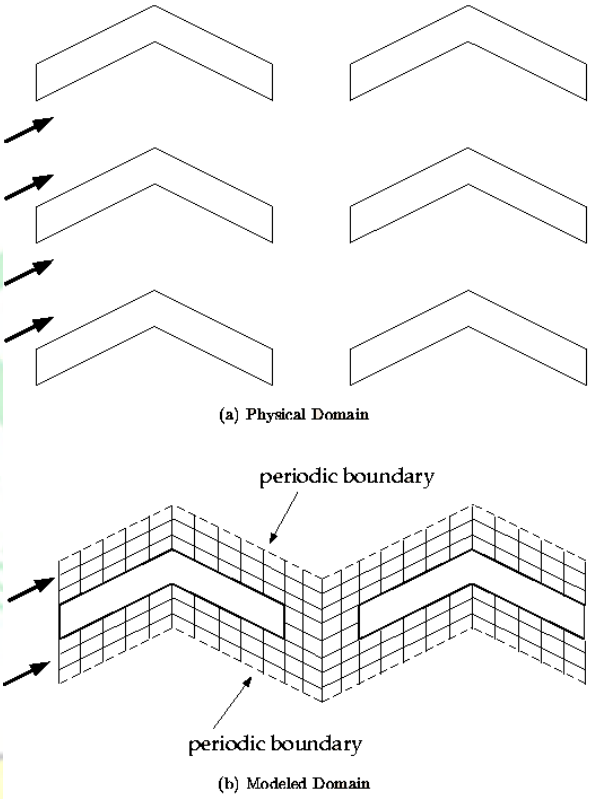
جریان پریودیک می‌تواند بصورتهای دورانی و انتقالی باشد. جریانهای پریودیک دورانی معمولاً در توربوماشینها و استوانه‌های دوار اتفاق می‌افتد. شکلهای (۲۳ و ۲۲-۷) نمایشگر هندسه‌هایی می‌باشد که جریان پریودیک در آنها وجود دارد. با توجه شکل (۲۲-۷) برای شبیه‌سازی جریان در داخل پره‌های روتور یک توربین محوری می‌توان فضای حول یک پره را درنظر گرفت و با اعمال شرط مرزی پریودیک آنرا شبیه‌سازی نمود. نتایج بدست آمده برای سایر پره‌های روتور نیز صادق است. در شکل (۲۳-۷) نیز می‌توان با شبیه‌سازی ربع استوانه، میدان جریان در داخل کل استوانه دوار را حل کرد. شکل (۲۴-۷) نیز بیانگر فیزیک جریان و فضای محاسباتی مورد نیاز برای شبیه‌سازی مناسب جریان پریودیک انتقالی می‌باشد.



شکل ۲۲-۷ چگونگی قرار گرفتن مرزهای پریودیک در شبیه‌سازی جریان در پره‌های روتور یک توربین محوری.



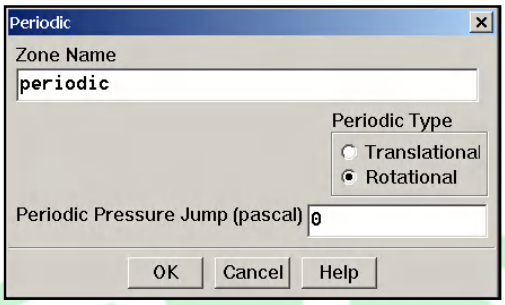
شکل ۲۳-۷ استفاده از شرط مرزی پریودیک برای حل میدان جریان در داخل یک ظرف استوانه‌ای.



شکل ۲۴-۷ نمونه‌ای از جریان پریودیک انتقالی.

ورودیهای مرزهای پریودیک

برای مرزهای پریودیک بدون افت فشار، تنها باید دورانی و یا انتقالی بودن ماهیت جریان را مشخص نمود.. مرزهای پریودیک دورانی به مرزهایی گفته می‌شود که هندسه مدل و جریان بصورت تناوبی دورانی تکرار شود (مانند جریان در داخل روتورهای توربینهای محوری، شکل ۲۲-۷). مرزهای پریودیک انتقالی به مرزهایی گفته می‌شود که هندسه مدل و خصوصیات جریان بصورت تناوبی انتقالی تکرار شود (همانند شکل ۲۴-۷). درصورتیکه جریان تراکم‌پذیر باشد مقدار افت فشار را نیز باید معین نمود (شکل ۲۵-۷).



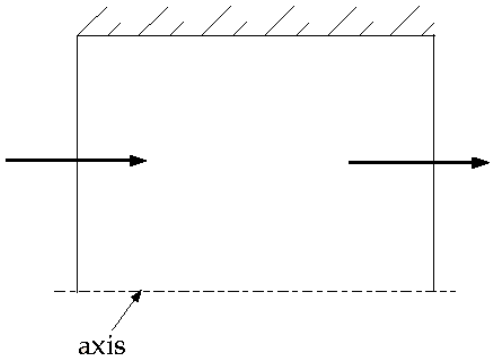
شکل ۲۵-۷ پانل تعیین شرط مرزی پریودیک.

اگر دامنه محاسباتی، پریودیک دورانی باشد، باید گزینه Rotational در قسمت Periodic Type انتخاب شود. در صورتیکه دامنه محاسباتی، پریودیک انتقالی باشد، لازمست گزینه Transitional در قسمت Periodic Type فعال گردد. برای دامنه‌های پریودیک دورانی، نرم‌افزار فلوئنت زاویه مربوط به دامنه محاسباتی را نسبت به محور دوران مدل محاسبه می‌کند.

قابل توجه است که نیازی نیست قالب مرجع پریودیک دورانی، متحرک باشد. بعنوان مثال می‌توان جریان در داخل پره‌های استاتور را با استفاده از شرط مرزی پریودیک شبیه‌سازی نمود، هر چند که استاتور یک قالب متحرک نیست. همچنین می‌توان با استفاده از گزینه Grid/Check می‌توان مرکز و محور دوران را مشخص کرده و نیز کمترین، بیشترین و میانگین زوایای دوران هر یک از سطوح پریودیک را محاسبه کرده و نمایش داد. اگر از تفاوت بین کمترین، بیشترین و میانگین ناچیز نباشد، در اینصورت شبکه تولید شده مشکل داشته و شبکه حول محور مشخص پریودیک نیست.

۷-۱۶ شرائط مرزی تقارن محوری

از شرط مرزی تقارن محوری در محور تقارن یک جسم متقارن محوری استفاده می‌شود. در مواقعی که جریان حول یک مخروط یا داخل استوانه و یا بطور کلی جریان در جسمهای متقارن محوری شبیه‌سازی می‌گردد، می‌توان مدل دوبعدی جسم را درنظر گرفت با این شرط که محور دوران جسم از شرط مرزی تقارن محوری (Axis) برخوردار باشد. در شکل (۲۶-۷) نمونه‌ای از مورد بکارگیری از شرط مرزی تقارن محوری برای حل میدان جریان در یک استوانه نشان داده شده است.



شکل ۲۶-۷ استفاده از شرط مرزی تقارن محوری روی محور تقان یک هندسه متقارن محوری.

۱۷-۷ شرائط سیال

ناحیه سیال به مجموعه‌ای از المانهای دامنه محاسباتی گفته می‌شود که تمام معادلات حاکم فعال شده روی آن حل می‌شود. تنها ورودی مورد نیاز برای ناحیه سیال، نوع سیال می‌باشد. اگر در یک مسئله، انتقال گونه‌ای شیمیایی و یا احتراق نیز مدل می‌شود، نباید نوع گونه‌های شیمیایی و یا مواد احتراق در ناحیه سیال مشخص گردد، بلکه این مواد در قسمت Species، مشخص می‌گردد. این موضوع برای جریانهای چند فازی نیز صادق بوده و نوع سیالها در قسمت Multiphase مشخص می‌شود.

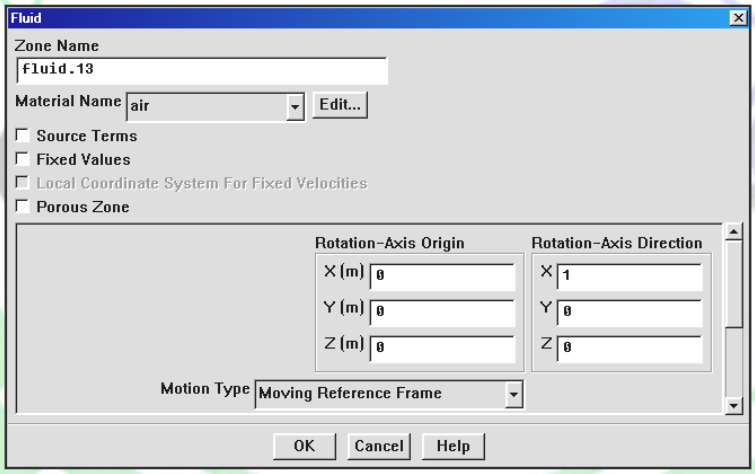
ورودیهای قرار دادی به کاربر این امکان را می‌دهد که مقادیر اسکالر گونه‌های شیمیایی، ممنتم، جرم، گرما و سایر مقادیر را تعیین کند. همچنین می‌توان برای ناحیه سیال، حرکت را نیز تعریف کرد. اگر مرزهای پریودیک دورانی در مجاور ناحیه سیال وجود داشته باشد، آنگاه باید محور و مرکز دوران را نیز مشخص نمود. اگر آشفتگی با استفاده از مدلهای آشفتگی $k-\varepsilon$ و یا اسپالارت-آلماراس شبیه‌سازی شود، می‌توان ناحیه سیال را بصورت یک ناحیه جریان آرام مشخص نمود. درصورت استفاده از مدل تابشی DO برای شبیه‌سازی انتقال حرارت تابشی، می‌توان مشخص کرد که سیال در انتقال حرارت تابشی دخالت دارد یا خیر . نکته دیگر اینکه در نرم‌افزار فلوئنت، یک ناحیه متخلخل بعنوان یک ناحیه سیال در نظر گرفته می‌شود که جزئیات بیشتر در مورد ناحیه متخلخل در قسمت (۱۹-۷) تشریح شده است.

۱-۱۷-۷ ورودیهای نواحی پیوستگی سیال

در نرم‌افزار فلوئنت، قبل از حل هر مسئله لازمست که تمام شرائط سیال در ناحیه سیال، با استفاده از پانل Fluid (شکل ۲۷-۷) تعریف شود. در پانل تعیین شرط مرزی، گزینه Fluid همان گزینه تعریف ناحیه سیال می‌باشد که با انتخاب و فراخوانی آن، پانل Fluid (شکل ۲۷-۷) باز می‌شود.

تعریف نوع سیال

برای تعریف ماده سیال موجود در ناحیه سیال، باید ماده مناسب سیال در پانل Material انتخاب شود. درصورتیکه سیال مورد نظر جزء مواد موجود در بانک اطلاعاتی پانل Material موجود نباشد، می‌توان یک ماده جدید با خصوصیات ماده مورد نظر تعریف کرد. باید توجه داشت در صورت شبیه‌سازی انتقال گونه‌های شیمیایی و یا جریانهای چند فازی، کادر متن Material Name در پانل Fluid ظاهر نمی‌شود. برای محاسبه انتقال گونه‌های شیمیایی، برای تمام ناحیه سیال، ماده ترکیبی همان ماده‌ای خواهد بود که کاربر در پانل Species Model تعریف می‌کند. برای جریانهای چند فازی نیز، برای تمام ناحیه سیال، ماده ترکیبی همان ماده‌ای خواهد بود که کاربر در پانل Multiphase Model تعریف می‌کند.



شکل ۲۷-۷ پانل Fluid (تعریف ناحیه سیال).

تعریف ترمهای چشمه

اگر تعریف ترم چشمه گرما، جرم، ممنتم، آشفتگی، گونه‌های شیمیایی و یا سایر سایر مقادیر اسکالر، مورد نظر باشد، می‌توان گزینه Source Terms (شکل ۲۷-۷) را فعال کرد و مقادیر مربوطه را مشخص نمود. جزئیات بیشتر در قسمت (۲۵-۷) توضیح داده شده است.

تعریف یک ناحیه آرام

در شبیه‌سازی جریانهای آشفته با استفاده از مدلهای آشفتگی $k-\varepsilon$ و یا اسپالارت-آلماراس، می‌توان مدلهای آشفتگی (یعنی صرفنظر کردن از تولید آشفتگی یا لزجت گردابه‌های، اما انتقال دادن مقادیر آشفتگی) را در یک ناحیه سیال مشخص، در نظر نگرفت. استفاده از این قابلیت زمانی مفید است که کاربر بداند که در ناحیه مشخص از سیال، جریان آرام است. بعنوان مثال اگر کاربر بداند که مکان نقطه انتقال روی یک ایرفویل در کجا قرار دارد، می‌تواند یک مرز انتقال آرامگآشفته را تولید کرده که المانهای ناحیه آرام، مجاور المانهای ناحیه آشفته می‌باشد. این قابلیت به کاربر اجازه می‌دهد انتقال آشفته روی یک ایرفویل را شبیه‌سازی نماید.

تعریف محور دوران

اگر مجاور ناحیه سیال، مرزهای پریودیک دورانی وجود داشته و یا اینکه خود ناحیه سیال حرکت دورانی داشته باشد، لازمست که محور و مرکز دوران مشخص گردد. این محور دوران، مستقل از هریک از محورهای دوران نواحی دیواره و یا نواحی پیوستگی مجاور ناحیه سیال مذکور است. در مسائل سه بعدی، محور دوران، منطبق بر برداری است که از مرکز دوران گذشته و همچنین توسط کاربر تعریف شده است. برای مسائل دو بعدی که متقارن محوری نباشد، تنها باید مرکز دوران مشخص گردد، چرا که محور دوران با بردار موازی محور Z که از مرکز دوران مشخص شده، عبور می‌کند، منطبق می‌باشد. در نهایت در مسائل دو بعدی متقارن محوری، محور دوران موازی با محور X و مرکز دوران همان مرکز سیستم مختصات می‌باشد.

تعریف حرکت ناحیه سیال

برای تعریف حرکت دورانی یا انتقالی ناحیه سیال (یا همان قالب مرجع)، باید گزینه Moving Reference Frame در کادر فهرست Motion Type پانل Fluid (شکل ۲۷-۷) انتخاب شود. سپس باید مرکز و محور دوران، اندازه سرعت دورانی، مطلق یا نسبی بودن اندازه سرعت برای حرکت دورانی و مؤلفه‌های سرعت برای حرکت انتقالی تعریف شود.

برای تعریف حرکت یک ناحیه داری شبکه متحرک (شبکه لغزان) باید گزینه Moving Mesh در کادر فهرست Motion Type پانل Fluid انتخاب گشته و سپس پارامترهای تعریف سرعت دورانی یا انتقالی در کادرهای متن مربوطه مشخص گردد.

۱۸-۷ شرائط جامد

ناحیه جامد به مجموعه‌ای از المانهای دامنه محاسباتی گفته می‌شود که معادلات حاکم فعال شده روی آن حل نمی‌شود، بلکه تنها مسئله هدایت گرمایی حل می‌شود. رفتار ماده در یک ناحیه جامد دقیقاً همانند رفتار یک سیال در ناحیه سیال است، اما در ناحیه جامد، پدیده جابجایی، هیچ مفهومی ندارد. تنها ورودی مورد نیاز برای ناحیه جامد، نوع جامد می‌باشد. در ناحیه جامد با خصوصیات ماده جامد بدرستی تعریف شود. برای ناحیه جامد می‌توان چشمه‌های حرارتی و حتی حرکت را نیز در نظر گرفت. همانند ناحیه سیال، درصورتیکه ناحیه جامد دارای حرکت دورانی باشد و یا اینکه مجاور یک مرز پریودیک دورانی باشد، لازمست که مرکز و محور دوران نیز بدرستی تعریف شود. درصورت استفاده از مدل تابشی DO برای شبیه‌سازی انتقال حرارت تابشی، می‌توان مشخص کرد که ناحیه جامد در انتقال حرارت تابشی دخالت دارد یا خیر .

۱-۱۸-۷ ورودیهای نواحی پیوستگی جامد

در نرم‌افزار فلوئنت، قبل از حل هر مسئله لازمست که تمام شرائط ماده در ناحیه جامد، با استفاده از پانل Solid (شکل ۲۸-۷) تعریف شود. در پانل تعیین شرط مرزی، گزینه Solid همان گزینه تعریف ناحیه جامد می‌باشد که با انتخاب و فراخوانی آن، پانل Solid (شکل ۲۸-۷) باز می‌شود.

تعریف نوع جامد

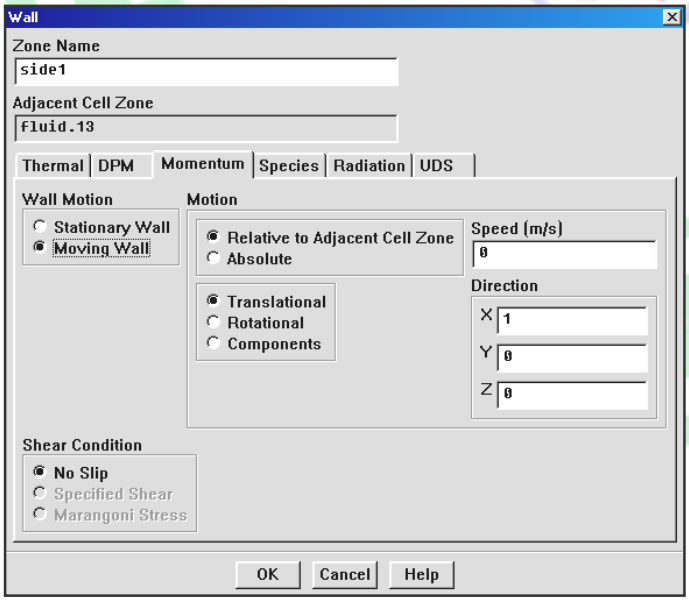
برای تعریف ماده تشکیل دهنده ناحیه سیال، باید ماده جامد در پانل Material انتخاب شود. درصورتیکه ماده جامد مورد نظر جزء مواد موجود در بانک اطلاعاتی پانل Material موجود نباشد، می‌توان یک ماده جدید با خصوصیات ماده مورد نظر تعریف کرد.

تعریف ترمهای چشمه حرارتی

اگر تعریف ترم چشمه حرارتی، مورد نظر باشد، می‌توان گزینه Source Terms (شکل ۲۷-۷) را فعال کرد و مقادیر مربوطه را مشخص نمود. جزئیات بیشتر در قسمت (۲۵-۷) توضیح داده شده است.

تعریف محور دوران

اگر مجاور ناحیه جامد، مرزهای پریودیک دورانی وجود داشته و یا اینکه خود ناحیه جامد حرکت دورانی داشته باشد، لازمست که محور و مرکز دوران مشخص گردد. این محور دوران، مستقل از هریک از محورهای دوران نواحی دیواره و یا نواحی پیوستگی مجاور ناحیه جامد مذکور است. در مسائل سه بعدی، محور دوران منطبق بر برداری است که از مرکز دوران گذشته و همچنین توسط کاربر تعریف شده است. برای مسائل دو بعدی که متقارن محوری نباشد، تنها باید مرکز دوران مشخص گردد، چرا که محور دوران با بردار موازی محور Z که از مرکز دوران مشخص شده، عبور می‌کند، منطبق می‌باشد. در نهایت در مسائل دو بعدی متقارن محوری، محور دوران موازی با محور X و مرکز دوران همان مرکز سیستم مختصات می‌باشد.



شکل ۲۸-۷ پانل Solid (تعریف ناحیه جامد).

تعریف حرکت ناحیه جامد

برای تعریف حرکت دورانی یا انتقالی ناحیه جامد (قالب مرجع)، باید گزینه Moving Reference Frame در کادر فهرست Motion Type پانل Solid (شکل ۲۸-۷) انتخاب شود. سپس باید مرکز و محور دوران، اندازه سرعت دورانی، مطلق یا نسبی بودن اندازه سرعت برای حرکت دورانی و مؤلفه‌های سرعت برای حرکت انتقالی تعریف شود.

برای تعریف حرکت یک ناحیه جامد داری شبکه متحرک (شبکه لغزان) باید گزینه Moving Mesh در کادر فهرست Motion Type پانل Solid انتخاب گشته و سپس پارامترهای تعریف سرعت دورانی یا انتقالی در کادرهای متن مربوطه مشخص گردد.