



Introduction to CFD

مقدمه

- ❖ **دینامیک سیالات محاسباتی** از سه کلمه تشکیل شده است.
- ❖ دینامیک سیالات، دینامیک هر سیالی که جریان دارد را بیان می کند.
- ❖ محاسبات، اشاره به ارتباط با ریاضیات و محاسبه دارد و به معنی استفاده از الگوریتم های عددی در تجزیه و تحلیل شارهای سیالاتی می باشد.

Computational
Fluid
Dynamics



❖ دینامیک سیالات محاسباتی، یک تکنولوژی محاسباتی است که ما را قادر می‌سازد تا دینامیک هر چیزی که جریان دارد را مطالعه نماییم.

❖ توسط دینامیک سیالات محاسباتی، یک مدل محاسباتی از سیستمی که مایل به مطالعه آن می‌باشیم، ساخته می‌شود. سپس با بکار بستن فیزیک جریان سیال در این مدل، پیش بینی رفتار دینامیکی سیال، حاصل می‌شود.

❖ علاوه بر شارهای سیال، انتقال حرارت در جامدات، میدان مغناطیسی و طیف وسیعی از مسائل زیر مجموعه CFD به حساب می‌آیند.



❖ دینامیک سیالات محاسباتی یک روش تحلیل پیشرفته‌ای است که نه تنها قادر به پیش بینی رفتار جریان سیال می‌باشد بلکه توان پیش بینی انتقال حرارت، جرم (همچون نفوذ یا تجزیه)، تغییر فاز (همچون چگالش یا جوشش)، فعل و انفعالات شیمیایی (همانند احتراق)، جابجایی مکانیکی (همانند چرخش پروانه کشتی یا ملخ هواپیما)، و تنش یا تغییر شکل سازه‌ها (همچون خمش دیرک توسط باد) را نیز دارد.



دلایل استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

❖ بطور کلی سه دلیل عمده برای استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی وجود دارد.

There are three reasons to use CFD:
insight, foresight, and efficiency

بینش

پیش بینی

راندمان



دلایل استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

❖ **بینش:** سیستم‌ها و وسایل بسیاری وجود دارند که نمی‌شود از آنها نمونه سازی کرد. اغلب، دینامیک سیالات محاسباتی بخش‌هایی از سیستم یا پدیده‌ای که در سیستم اتفاق می‌افتد را نشان می‌دهد که توسط هیچ روش دیگری قابل مشاهده نیست. دینامیک سیالات محاسباتی امکان مشاهده و در نتیجه افزایش درک از طرح و یا طراحی‌ها را فراهم می‌سازد.

insight



دلایل استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

❖ **پیش بینی:** نظر به اینکه دینامیک سیالات محاسباتی ابزاری است برای پیش بینی رفتارها در حالات مختلف، بنابراین می‌تواند بطور سریع جوابگوی بسیاری از «اگرها» باشد. با تغییر متغیرها، نرم افزار مورد استفاده نتیجه نهایی را ارائه می‌کند. در مدت زمان کوتاه می‌توان رفتار سیستم طراحی را پیش بینی نمود. بنابراین می‌توان با اعمال تغییرات مختلف به نتیجه بهینه دست یافت.

foresight



دلایل استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

❖ **راندمان:** تجزیه و تحلیل یا طراحی بهتر و سریع تر باعث کوتاه تر شدن سیکل طراحی می شود. بنابراین در زمان و هزینه صرفه جویی می گردد و در نتیجه محصول سریعتر به بازار و یا به مصرف کننده می رسد. اصلاح و بهبود وسایل و نصب آنها در حداقل زمان ممکن صورت می پذیرد.

❖ دینامیک سیالات محاسباتی ابزاری است جهت کوتاه تر نمودن سیکل طراحی و توسعه.

efficiency



مثالهای بکارگیری موفق CFD

❖ پساب و آلودگی
❖ مهندسی ساحلی و فرا ساحلی برای محاسبه نیروهای وارده بر سازه‌ها
❖ هیدرولیک همانند شبکه‌های لوله، مخازن، کانال‌ها، بندها و سرریزها
❖ هیدرولوژی همانند جریان در رودها، آبهای زیر زمینی و قنات‌ها
❖ هواشناسی برای پیش بینی وضع هوا
❖ فیزیک انرژی بسیار بالا مثل جریان‌های پلاسما
❖ مهندسی پزشکی برای مطالعه جریان خون در قلب و عروق، تنفس ...
❖ الکترونیک همانند خنک کاری الکترونیکی
❖ رئولوژی
❖

❖ آیرودینامیک در هواپیما و خودرو
❖ هیدرودینامیک کشتی
❖ توربوماشین‌ها همانند پمپ‌ها و توربین‌ها
❖ موتورهای احتراق داخلی و موتورهای جت
❖ انتقال حرارت در سیستم‌های گرمایشی و سرمایشی
❖ احتراق
❖ مهندسی فرآیند همانند اختلاط و واکنش مواد شیمیایی
❖ انرژی باد
❖ نیروی باد که باعث تولید نیروها و عکس العمل‌های دینامیکی در سازه‌ها می‌شود
❖ تهویه
❖ انفجار و آتش
❖ مهندسی محیط زیست همانند انتقال



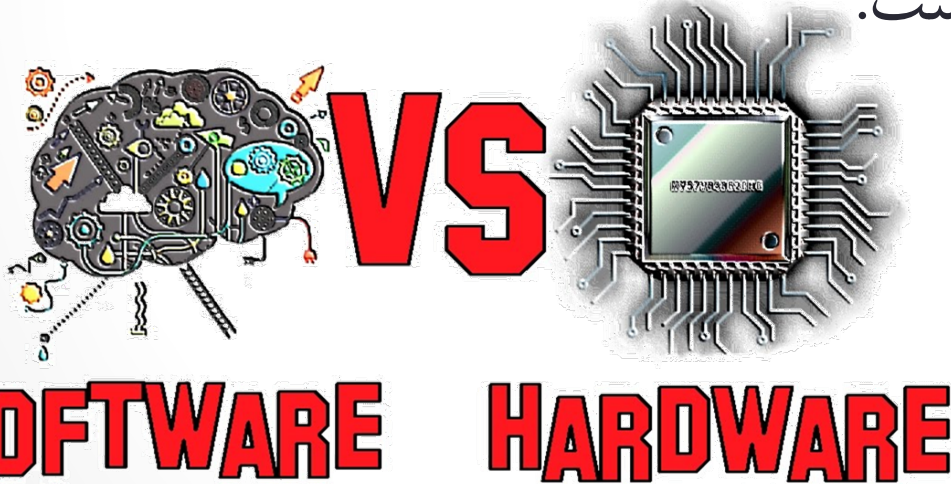
محدودیت های بکارگیری CFD

❖ کسانی که با دینامیک سیالات محاسباتی کار می کنند باید این واقعیت را بپذیرند که با وجود اینکه در اصول، تمام جریان های سیال قابل شبیه سازی توسط دینامیک سیالات محاسباتی می باشند، ولیکن فقط تعداد معدودی از حالات را می توان به راحتی شبیه سازی نمود. شبیه سازی بیشتر جریان ها و پدیده ها تقریباً مشکل می باشند و شبیه سازی تعدادی نیز فعلاً غیر ممکن هستند.



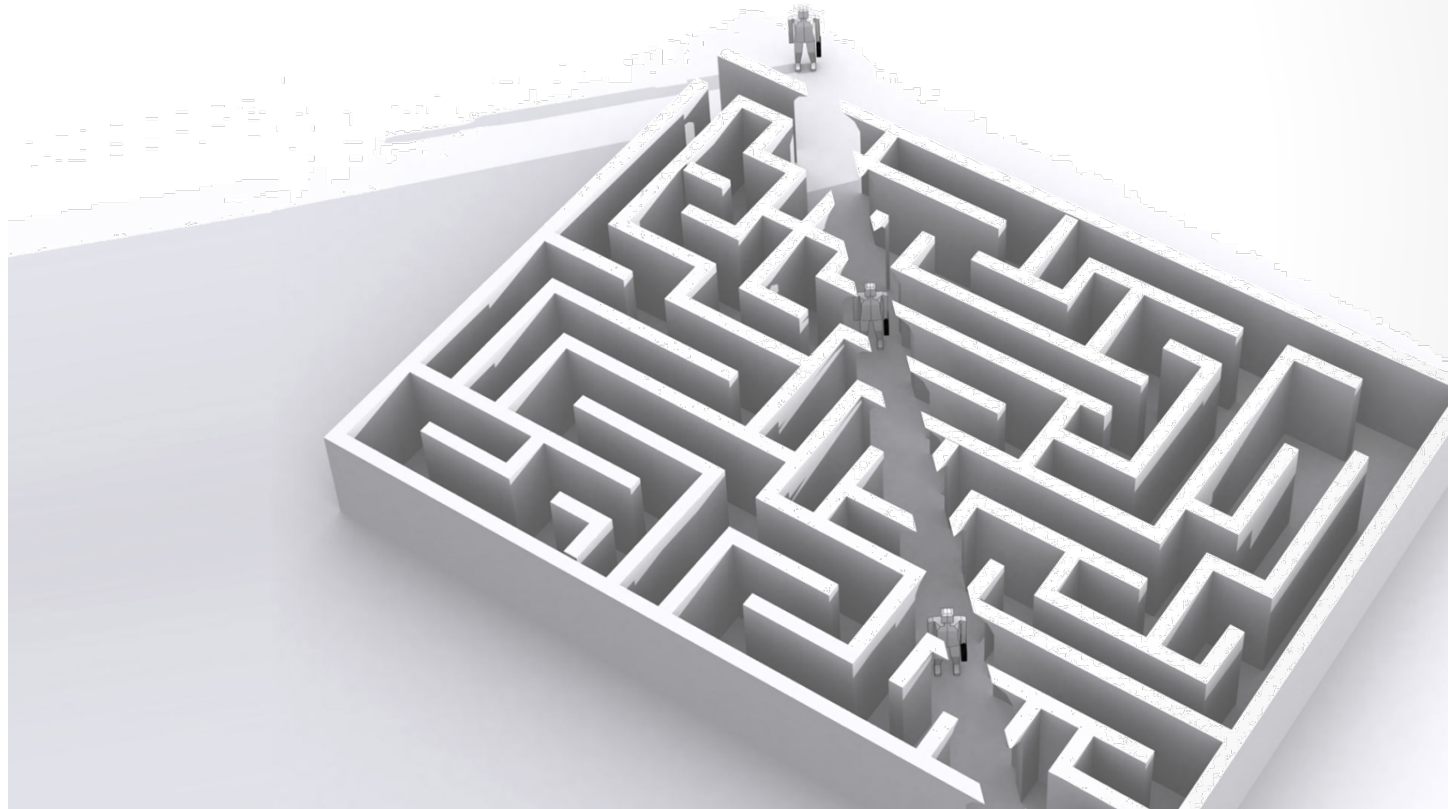
محدودیت های بکارگیری CFD

❖ منبع و طبیعت مشکلات شبیه سازی جریان ها را باید دانست و مهم است که بتوان مشکلات مختلف را از هم تشخیص داد. بعضی از مشکلات بواسطه نیاز به کامپیوترها، نرم افزارها و سخت افزارهای پیشرفته تر و قوی تر می باشند. اینگونه مشکلات را مشخصاً می توان با هزینه کردن های مالی بر طرف نمود. بعضی دیگر از مشکلات بواسطه ضعف دانش علمی است.



محدودیت های بکارگیری CFD

❖ در حالات بسیار مشکل با ساده سازی های منطقی و کاستن از انتظارات در دقت حل می توان حجم وسیعی از اطلاعات مفید را با شبیه سازی توسط دینامیک سیالات محاسباتی بدست آورد.



پارامترهای موثر بر سختی مسأله: بعد زمان

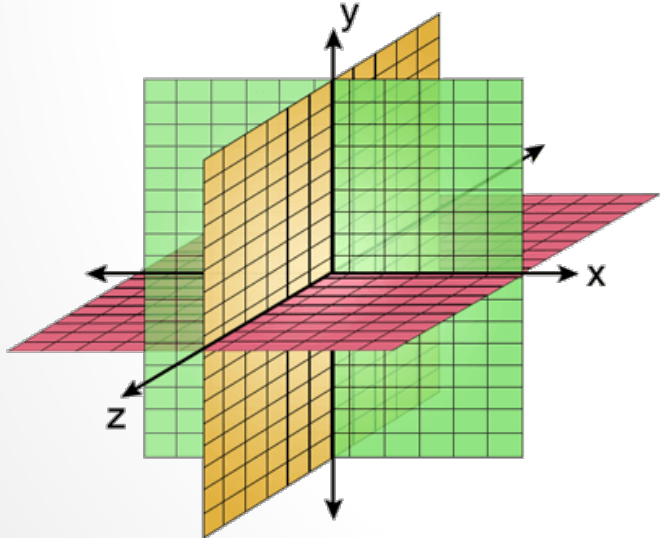
❖ صفر بعدی یا حالت پایا

❖ یک بعدی یا حالت گذرا



پارامترهای موثر بر سختی مسأله: بعد مکان

- ❖ صفر بعدی: بدون تغییر در موقعیت (یک ظرف شیر هموژنیزه)
- ❖ یک بعدی: تغییر در یک بعد (یک لوله بلند ایزوله شده)
- ❖ دو بعدی: تغییرات در دو بعد (لوله‌ای که نه ایزوله است و نه بلند. بنابراین گرادیان دما در راستای شعاع و طول مهم است.)
- ❖ سه بعدی: تغییرات در سه بعد همانند اتاقی که در یک گوشه آن یک بخاری قرار دارد.



پارامترهای موثر بر سختی مسأله: هندسه

- ❖ پیچیدگی هندسی در فصل مشترک بین سیال و جسم مثلاً در شبیه سازی جریان هوا در یک اتاق:
- ❖ ساده تر است اگر اتاق خالی باشد.
- ❖ مشکل است اگر تعدادی وسایل و مبلمان در آن وجود داشته باشد.
- ❖ مشکل تر است اگر انسان‌های درون اتاق در حال حرکت باشند.



پارامترهای موثر بر سختی مسأله: شرایط مرزی

B.C.

❖ پیچیدگی جریان بواسطه شرایط مرزی. مثلاً در شبیه سازی جریان هوا در یک اتاق:

❖ ساده تر است اگر دمای دیوار و اجسام درون آن معلوم و یکنواخت باشند و درب و پنجره کاملاً بسته و بدون نشتی هوا باشند.

❖ مشکل است اگر دماها درون اتاق یکنواخت نباشند و اگر هوا از اجسام درون اتاق جریان داشته باشد و یا فشارها در اطراف بعضی از اجسام متغیر و معلوم باشند.

❖ مشکل تر است اگر دما، دبی هوا و فشارها مشخص نباشند و تمام این مجهولات باید توسط اطلاعاتی که در مورد جریان خارج از اتاق و تشعشع حرارتی خورشید در دست است، بدست آیند.



پارامترهای موثر بر سختی مسأله: فرایندهای فیزیکی

❖ پیچیدگی در فرآیندهای فیزیکی درگیر. مثلاً در شبیه سازی جریان در یک اتاق:

❖ ساده تر است اگر دماها یکنواخت بوده و حرکت هوا توسط دمندهای همانند کولر صورت گیرد.

❖ مشکل است اگر دما یکنواخت نباشد بطوریکه جابجایی آزاد حرکت هوا را تحت تأثیر قرار دهد.

❖ مشکل تر است اگر دماها به اندازه ای بزرگ باشند که نقش انتقال حرارت تشعشعی مهم شود.

❖ بسیار مشکل است اگر چیزی در درون اتاق آتش گرفته باشد بطوریکه حرارت و دود تولید شده باید توسط روابط تجربی محاسبه گردند.

❖ تقریباً غیر ممکن است در صورتیکه آتش به مبلمان و دیگر وسایل قابل اشتعال سرایت نماید.



پارامترهای موثر بر سختی مسأله: فازهای فیزیکی

❖ تعداد فازهای سیال. مثلاً در جریان درون اتاق:

❖ تک فاز است وقتی هوا و احتمالاً مخلوط با کمی دود حاضر باشد.

❖ دو فاز است وقتی برای خاموش نمودن آتش، آب نیز وارد صحنه شود.

❖ چند فاز است وقتی جرقه‌های شعله به اطراف پرتاب شوند.



نمونه فرض‌های ساده سازی در CFD

❖ **کاهش بُعد زمان:** محدود کردن حل به جریان‌های دائم بجای شبیه سازی گذرا

❖ **کاهش بُعد مکان:** فرض ناچیز بودن تغییرات در یک جهت نسبت به جهات دیگر

❖ **کاهش تعداد پدیده‌های مورد مطالعه:** بطور مثال حذف پدیده‌هایی که از حدی کوچکتر باشند و می‌توان آنها را توسط ضرایب خاصی بیان نمود.

❖ **کاهش تعداد فرآیندهای فیزیکی مورد مطالعه:** بطور مثال صرفنظر نمودن از انتقال حرارت تشعشعی در مقایسه با انتقال حرارت هدایتی و جابجایی.

❖ **کاهش تعداد فازهای مورد مطالعه:** بطور مثال چشم پوشی از این واقعیت که بخار و آب درون بویلر دارای سرعت‌های متفاوتی در هر نقطه می‌باشند و بنابراین می‌توان آنها را بصورت یک مخلوط آب و بخار و بعنوان یک سیال در نظر گرفت.



شبیه سازی چه جریان‌هایی سخت است؟

❖ جریان‌های بسیاری را می‌توان با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و با در نظر گرفتن ساده سازی‌های ذکر شده انجام داد. ولیکن شبیه سازی جریان‌های ذیل سخت می‌باشد و نیاز به دانش بالایی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی و کامپیوترهای مدرن و پیشرفته دارد.

❖ گذر از جریان آرام به آشفته

❖ واکنش‌های شیمیایی در جریان‌های آشفته

❖ اندرکنش سیال و سازه

❖ خوردگی

❖ اتمیزه شدن



شبیه سازی چه جریان‌هایی تقریباً غیر ممکن است؟

❖ جواب اساسی به این سؤال این است که دینامیک سیالات محاسباتی نمی‌تواند فیزیکی را شبیه سازی نماید که بطور مناسب در مسأله مدل یا فرمول‌بندی نشده باشد. مهم‌ترین مثال در این رابطه آشفتگی است. در بسیاری از شبیه سازی‌های جریان‌های آشفته، از مدل‌های آشفتگی که تقریبی از فیزیک واقعی است استفاده می‌شود و حل کاملاً وابسته به داده‌های تجربی و ثوابت موجود در مدل‌های آشفتگی است. بنابراین تمام حل‌های دینامیک سیالات محاسباتی جریان‌های آشفته دارای عدم دقت هر چند کوچک می‌باشند. مثال دیگر محاسبه جریان‌های احتراق و واکنش‌های شیمیایی است.



مکانیک سیالات پایه



تعاریف

❖ یک سیال ماده‌ای است که اگر تحت یک نیروی برشی، هر چند کوچک، قرار گیرد بطور مداوم تغییر شکل می‌دهد. سیال می‌تواند مایع باشد که دارای یک حجم محدود با سطح آزاد است و یا گاز باشد که حجم ظرف را توسط انبساط پر می‌کند.

❖ حرکت سیال در قالب مکانیک محیط‌های پیوسته در نظر گرفته می‌شود و نه بصورت مولکول‌های منفرد. توجه کنید که در مایعات نیروهای بین مولکولی و در گازها برخورد مولکولها است که باعث بوجود آمدن پدیده لزجت می‌گردد.



مفاهیم

❖ مفاهیم مهمی که در مکانیک سیالات بکار برده می‌شوند به قرار زیر می‌باشند:

❖ **هیدرواستاتیک:** مطالعه سیال در حال سکون می‌باشد.

❖ نیروهای فشاری در موازنه با نیروهای وزنی می‌باشند.

❖ فشار باعث اعمال نیرو به سازه‌های در برگیرنده سیال می‌شود.

❖ **هیدرودینامیک:** مطالعه سیال در حال حرکت می‌باشد.

❖ **هیدرولیک:** مطالعه جریان مایع، عموماً آب، می‌باشد.

❖ **آیرودینامیک:** مطالعه جریان گازها، عموماً هوا، می‌باشد.



تراکم پذیری

❖ تمام سیال‌ها تا حدودی تراکم پذیر می‌باشند. ولیکن جریان آنها را می‌توان بطور تقریبی در صورتیکه سرعت آنها بسیار کمتر از سرعت صوت باشد تراکم ناپذیر در نظر گرفت. سرعت صوت در آب ۱۴۸۰ متر در ثانیه و در هوا ۳۴۰ متر بر ثانیه می‌باشد.



آشفتگی

❖ یک جریان واقعی می‌تواند آرام و یا آشفته باشد. در جریان آرام لایه‌های مجاور بر روی هم می‌لغزند در صورتیکه در جریان آشفته نوسانات سرعت حول جریان متوسط وجود دارد. جریان آشفته طبیعت جریان در اعداد رینولدز بالا است. بسیاری از جریانهای موجود در مهندسی و محیط زیست آشفته می‌باشند.



معادلات حاکم

❖ مهمترین معادلات حاکم بر دینامیک سیال عبارتند از:

❖ معادله پیوستگی

❖ معادله بقای مومنتم

❖ معادله بقای انرژی



معادله انرژی

❖ نقش انرژی در جریان‌های تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر بسیار متفاوت است. در جریان تراکم‌پذیر، قوانین ترمودینامیک حاکم بر چگالی سیال و فشار می‌باشند و لازم است که معادله انرژی نیز به همراه دیگر معادلات حاکم حل شود. ولیکن در جریان تراکم‌ناپذیر، معادله انرژی یک معادله مکانیکی – انرژی است. در دینامیک سیالات محاسباتی جریان تراکم‌ناپذیر نیازی به حل معادله انرژی بطور جداگانه نیست.



معادله انرژی

❖ در جریان پایا می توان انرژی را با استفاده از معادله برنولی در راستای یک خط جریان بیان نمود:

$$\Delta \left(\frac{p}{\rho} + gz + \frac{1}{2} u^2 \right) = \text{اتلاف ها - کار انجام شده بر روی سیال}$$

❖ در سمت راست معادله، انرژی بر واحد جرم می باشد که یا توسط پمپ داده شده است و یا توسط توربین و یا اصطکاک گرفته شده است. در جریانهای تراکم پذیر و در حالتی که معادله انرژی هم در نظر گرفته شود به عبارت انرژی بر واحد جرم، انرژی داخلی نیز افزوده می شود:

$$\Delta \left(e + \frac{p}{\rho} + gz + \frac{1}{2} u^2 \right) = \text{اتلاف ها - کار انجام شده بر روی سیال + حرارت داده شده به سیال}$$

❖ کمیت $e + \frac{p}{\rho}$ معروف به انتالپی می باشد.



شکل‌های مختلف معادلات حاکم

❖ معادلات انتقال زیر حاکم بر حرکت سیال می‌باشند:

❖ جرم

❖ مومنتوم

❖ انرژی

❖ مواد

❖ این معادلات انتقال را می‌توان بصورتهای انتگرالی و دیفرانسیلی بیان نمود.



شکل انتگرالی معادلات

❖ در مکانیک محیط‌های پیوسته، قوانین بقاء اساساً به شکل انتگرالی بدست می‌آیند. عبارتی مقدار کل یک کمیت (جرم، مومنتوم، ...) درون یک حجم کنترل در نظر گرفته می‌شود. نرخ تغییر این مقدار کل برابر است با نرخ خالصی که کمیت از سطوح حجم کنترل جریان می‌یابد (شار) بعلاوه نرخ خالص تولید و یا اضمحلال درون حجم کنترل (منبع). بطور مثال کمیت جرم دارای منبع تولید و اضمحلال نیست. در حالیکه منبع تولید مومنتوم نیروی خالص می‌باشد.



شکل عمومی معادلات

❖ معادلات انتقال در مکانیک سیالات دارای یک شکل عمومی است که بیانگر موازنه فرآیندهایی است که بر توزیع کمیتی مانند ϕ بر واحد حجم تأثیرگذار می‌باشند. این فرآیندها عبارتند از:

❖ نرخ تغییر

❖ جابجایی: جابجایی توسط حرکت سیال

❖ پخش: انتقال خالص توسط حرکت نامنظم مولکولی و یا آشفستگی

❖ منبع: تولید یا اضمحلال



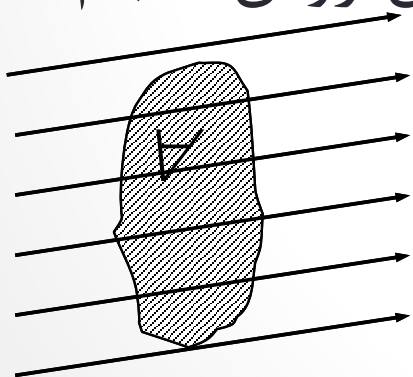
شکل عمومی معادلات

❖ این فرآیندها را می‌توان برای یک حجم کنترل اختیاری V مطابق با شکل زیر نوشت:

$$(\text{منبع درون } V) = (\text{پخش از مرزها}) + (\text{جابجایی از مرزها}) + (\text{نرخ تغییر درون } V)$$

❖ نکته مهم در اینجا این است که معادله انتقال همیشه دارای شکل واحدی است، چه ϕ مؤلفه‌های سرعت باشد و چه نمایانگر غلظت و یا هر کمیت دیگری.

❖ گسسته سازی شکل انتگرالی معادلات حاکم اساس روش حجم-محدود در دینامیک سیالات محاسباتی است.



شکل دیفرانسیلی معادلات

❖ در محیط‌هایی که ناپیوستگی وجود نداشته باشد، شکل دیفرانسیلی معادلات حاکم صادق است. این معادلات، حالت یک نقطه را بیان می‌کنند. معادلات دیفرانسیلی را می‌توان از معادلات انتگرالی با بینهایت کوچک نمودن حجم کنترل بدست آورد. در اینجا لازم به ذکر است که:

❖ اگر حجم بینهایت کوچک ثابت باشد، شکل پایستار (Conservative) معادله دیفرانسیلی حاصل می‌شود

❖ اگر حجم بینهایت کوچک با جریان حرکت نماید، شکل ناپایستار (Non-conservative) معادله دیفرانسیلی بدست می‌آید.

❖ این دو شکل از معادلات به راحتی قابل تبدیل به یکدیگر می‌باشند.

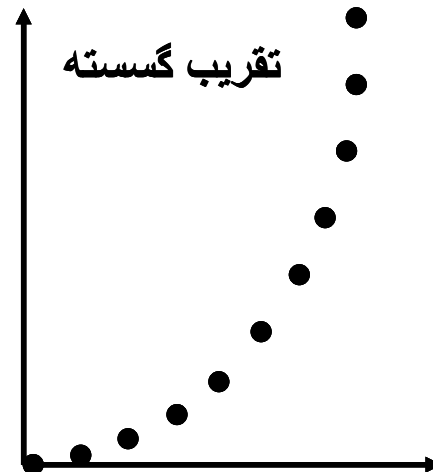
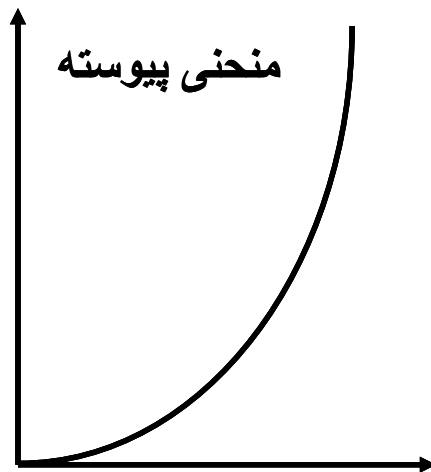


اصول پایه سیالات محاسباتی



گسسته سازی

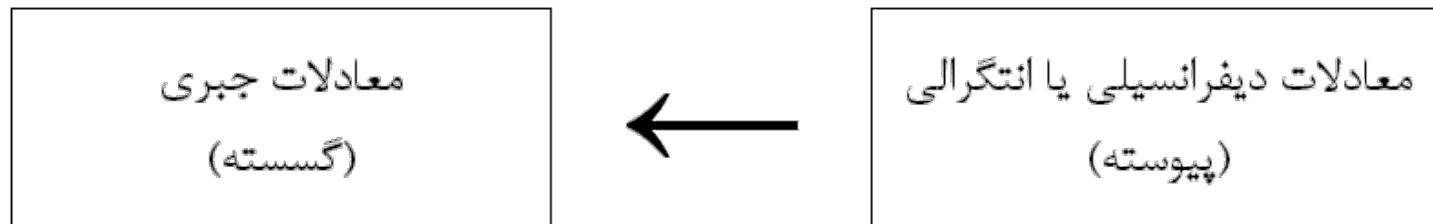
❖ به تقریب زدن یک کمیت متغیر در قالب مقادیری در تعداد محدودی نقطه، گسسته سازی گویند.



ارکان اساسی CFD

❖ ارکان اساسی در هر شبیه سازی سیالات محاسباتی عبارتند از:

1. محیط پیوسته، گسسته می شود: متغیرهای میدانی ($u, v, w, p, \rho, \dots$) در تعداد گره های محدودی تخمین زده می شوند.
2. معادلات حرکت گسسته می شوند. عبارتی معادلات حاکم بصورت مقادیر عددی در گره ها تخمین زده می شوند:



3. سیستم معادلات جبری برای بدست آوردن مقادیر متغیرها در هر گره حل می شوند.

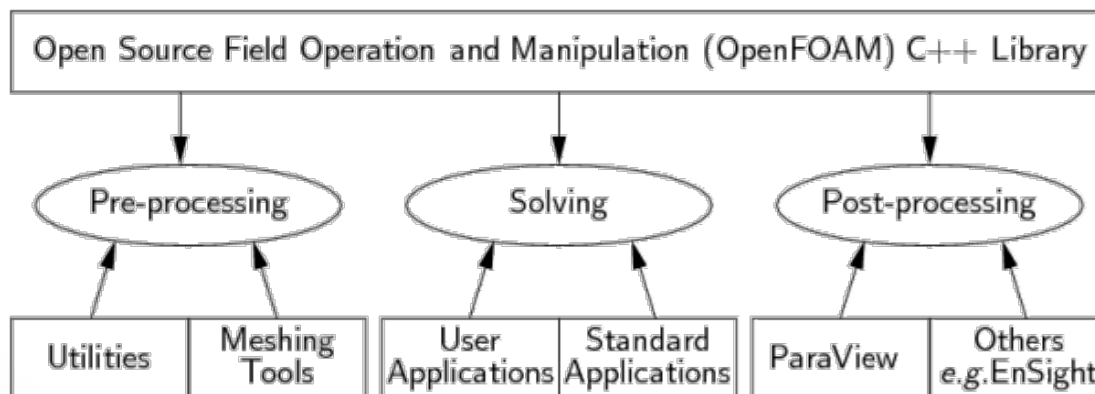


مراحل اصلی در CFD

❖ **پیش پردازش:** در این مرحله مسأله مورد نظر فرمول بندی و معادلات حاکم و شرایط مرزی مشخص می‌شوند و در نهایت شبکه محاسباتی مناسب تهیه می‌گردد.

❖ **حل:** معادلات حاکم با استفاده از روش‌های عددی مناسب حل می‌گردند.

❖ **پس پردازش:** در این مرحله نسبت به تحلیل و رسم نتایج اقدام می‌شود.



روشهای اصلی گسسته سازی

❖ در دینامیک سیالات محاسباتی سه روش اصلی بطور گسترده مورد استفاده قرار می گیرند.

Finite-Difference

Finite-Volume

Finite-Element

1. روش تفاوت محدود

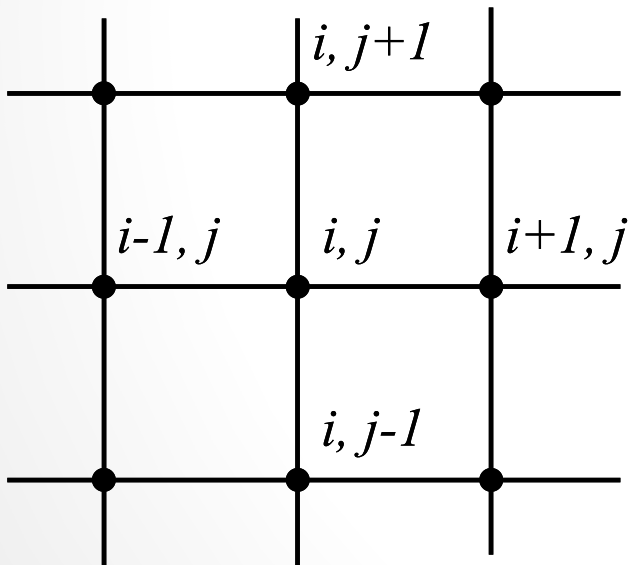
2. روش حجم محدود

3. روش المان محدود



روش تفاوت محدود

❖ این روش قدیمی‌ترین روش در حل معادلات دیفرانسیلی می‌باشد. در این روش، معادلات دیفرانسیلی حاکم مستقیماً گسسته می‌شوند. بطور مثال با در نظر گرفتن شکل نشان داده شده معادله دیفرانسیلی پیوستگی بصورت زیر گسسته می‌شود:



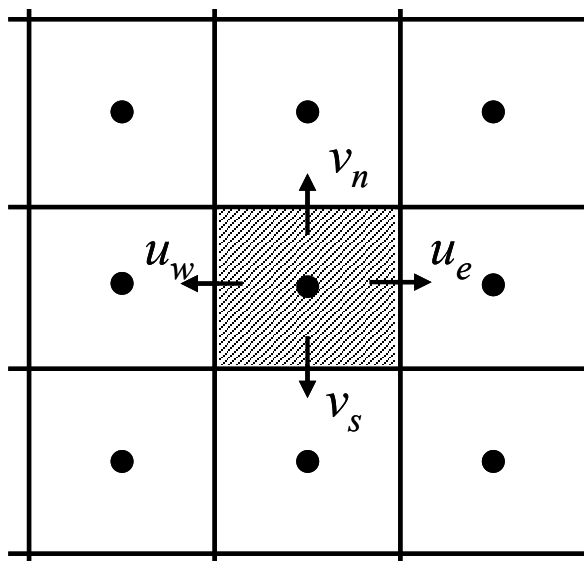
$$0 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \approx \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2\Delta x} + \frac{v_{i,j+1} - v_{i,j-1}}{2\Delta y}$$



روش حجم محدود

❖ در این روش معادلات انتگرالی حاکم مستقیماً گسسته می‌شوند. بطور مثال با توجه به شکل نشان داده شده معادله انتگرالی پیوستگی بصورت زیر گسسته می‌شود:

جرم خالص خروجی $0 = \int_{\Delta V} \rho \vec{u} \cdot d\vec{A} \approx (\rho u A)_e - (\rho u A)_w + (\rho v A)_n - (\rho v A)_s$



روش حجم محدود

❖ روش حجم محدود بیشتر در مکانیک سیالات به دلایل زیر استفاده می‌شود:

❖ از نظر فیزیکی قابل درک‌تر است.

❖ انعطاف پذیری خوبی در هندسه و پدیده‌های مختلف فیزیکی می‌باشد.

❖ مستقیماً قابل ربط دادن به کمیت‌های فیزیکی همانند شار جرم می‌باشد.



روش المان محدود

❖ این روش در بسیاری موارد شبیه به روش حجم محدود می‌باشد. محدوده محاسباتی به المانهای محدودی که عموماً ساختاری غیر سازمانی دارند گسسته می‌شود. در این روش، حل بصورت جمع توابع وزنی تخمین زده می‌شود و در معادلات دیفرانسیلی حاکم یا عموماً معادلات انتگرالی حاکم جایگزین می‌گردد و در نهایت برای بدست آوردن درجه آزادی حل می‌شوند.

$$u(\vec{x}, t) = \sum u_m N_m(\vec{x}, t)$$

❖ روش المان محدود بیشتر در مکانیک جامدات به دلایل زیر استفاده می‌شود:

❖ دارای انعطاف پذیری هندسی زیادی است.

❖ کدهای کامپیوتری که از این روش استفاده می‌کنند، می‌توانند در بسیاری از مسائل مختلف فیزیکی استفاده شوند.





پایان



Razi University
دانشگاه رازی

CFD