اعمال یک مدل ویسکوزیته وابسته به دما در نرم افزار اپن فوم

هدف این آموزش یک نگاه کامل به مدل های ویسکوزیته در نرم افزار OpenFoam است به علاوه یک تغییر ساده برروی حلگر انجام خواهد گرفت تا تغییرات ویسکوزیته علاوه بر اینکه به نرخ برش وابسته است به دما هم بستگی داشته باشد تا یک کلاس ویسکوزیته داشته باشیم که به دما و نرخ برش بستگی داشته باشد.

۱-۱- ویسکوزیته چیست؟

ویسکوزیته توانایی سیال برای انتقال مومنتوم از طریق انتشار است(نفوذ). ویسکوزیته دینامیکی(μ) یک ویژگی سیال است و رابطه بین نرخ تنش و کرنش است. بنابراین، به صورت رابطه زیر فرموله شده است:

$$\tau = \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \qquad (۱-۱)$$

علاوه بر این، سیال می تواند نیوتونی باشد که ویسکوزیته ثابت خواهد بود یا می تواند سیال غیر نیوتنی باشد که به صورت ویسکوزیته وابسته نامیده می شود. همچنین ویسکوزیته سینماتیکی (ν) به وسیله تقسیم ویسکوزیته دینامیکی بر چگالی به دست می آید. رفتار تغییر شکل سیالات غیرنیوتنی در علم مواد به چهار دسته اصلی تقسیم می شود.

۱- **رفتار تیکسوتروپیک (وابسته به زمان):** رابطه ویسکوزیته با زمان را شرح می دهد.
۲- **رفتار سودوپلاستیک(نازک شونده با تنش برشی):** کاهش ویسکوزیته با افزایش تنش برشی(نرخ برش)
۳- **رفتار دیلاتانت(ضخیم شونده با تنش برشی):** با افزایش نرخ برش، ویسکوزیته افزایش می یابد.
۴- **رئوپکتیک:** ویسکوزیته در طول زمان با تنش برشی افزایش می یابد.

مدلسازی ویسکوزیته در سیال غیر نیوتنی بستگی به این دارد که چه وابستگی ای بین تنش برشی و تانسور کرنش وجود دارد. به علاوه، برخی از معیارها وارد مدل می شوند که می توانند معیارهای فیزیکی و ریاضی را ارضا کنند. بنابراین، یک مدل جهانی برای همه رفتارهای غیر نیوتنی وجود ندارد. به عنوان مثال مدل استوالد (power law) به طور ساده می تواند وابستگی ویسکوزیته به نرخ برش را به وسیله شامل کردن نرخ برش در تعریف ویسکوزیته شرح دهد.

$$\mu = k\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)^{n-1} \qquad (۱-۲)$$

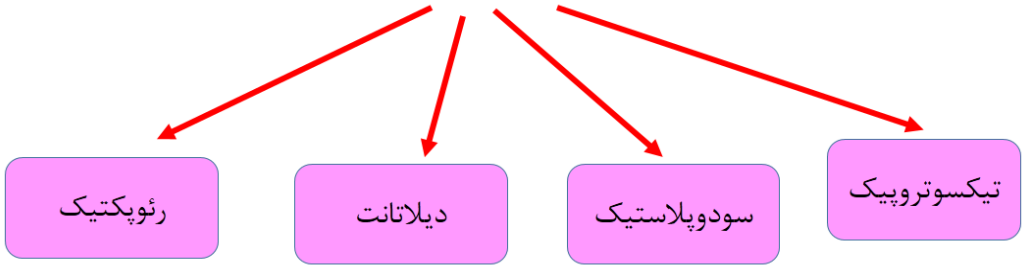
DO NOT COPY _ novin-eng.ir

در این مدل k به عنوان شاخص جریان و برش و توان n به عنوان پارامترهای مدل هستند. هر دوی k و n به وسیله علم تغییر شکل به دست می آیند.

مقدار n می تواند بین ۰ و ۱ تغییر کند، برابر ۱ باشد یا بیشتر از ۱ شود که به ترتیب رفتار سودوپلاستیک، رفتار نیوتنی و رفتار دیلاتانت را شرح می دهند.

مقدار k بستگی به سفتی ماده دارد. از نقطه نظر فیزیکی و ریاضی، این اهمیت دارد که مقدار تنش برشی بین محدوده بالایی و پایینی مقید شده باشد و همچنین مقدار n بالاتر از ۰ باقی می بماند. اپن فوم با یک کتابخانه از مدل های انتقال که شامل مدل های مختلف ویسکوزیته می شود (ثابت یا وابسته) توسعه یافته است. در اپن فوم های نسخه 2.0.x کلاس ویسکوزیته شامل ۵ کلاس شامل ۵ مدل ویسکوزیته است که در اپن فوم اعمال شده. همه این کلاس ها ویسکوزیته را به صورت تابعی از نرخ برش معرفی می کنند به جز مدل نیوتنی. سپس زمانی که تابع nu() از هر کلاس فراخوانده شود، ویسکوزیته بر پایه آن کلاس فراخوانی خواهد شد. همچنین اینکه یک کلاس جدید را برای ویسکوزیته تعریف کنیم خیلی آسان است.

انواع رفتارهای مواد در برابر تنش برشی



۱-۲- نرخ کرنش در اپن فوم

عموما T به عنوان تنسور می تواند به تانسورهای متقارن و نامتقارن تقسیم شوند، قسمت متقارن گرادیان سرعت، synm(T) نرخ تغییر شکل و قسمت غیر متقارن skew(T) تانسور سرعت است. در اپن فوم V میدان سرعت است بنابراین، نرخ کرنش به صورت زیر می تواند فرموله شود:

$$Strain\ Rate = \sqrt{2 * symm(gard(U)) : symm(gard(U))} \qquad (۳-۱)$$

where

$$symm(grad(U)) = grad(U) + grad(U).T$$

DO NOT COPY novin-eng.ir

Strain rate() یک تابع عضو کلاس viscosity model است. خطوط نوشته شده ۱ تا ۹ مقدار نرخ برش را زمانی که از کلاس مورد نظر فراخوانی شود، بر می گرداند.

```
1  Foam::tmp<Foam::volScalarField> Foam::viscosityModel::strainRate() const
2  {
3     return sqrt(2.0)*mag(symm(fvc::grad(U_)));
4  }

5  bool Foam::viscosityModel::read(const dictionary& viscosityProperties)
6  {
7    viscosityProperties_ = viscosityProperties;

8     return true;
9   }
```

۱-۳- کلاس power law در اپن فوم

کلاس power law یک کلاس مشتق شده از کلاس viscosity model در اپن فوم است.

کلاس power law یک تابع nu() و تابع correct() دارد که یک مقدار را برای ویسکوزیته آرام بر می گرداند و بعدی ویسکوزیته جریان آرام را اصلاح می کند.

خطوط کد بین خط ۱۰ تا ۳۰ از power law.c ویسکوزیته را با انتخاب کردن مقدار ماکزیمم nuMin و مقدار مینیموم nuMax و با استفاده از معادله توانی(power law) محاسبه می کند.

V_{small} یک ثابت با یک مقدار خیلی کوچک است. بنابراین، ماکزیمم max (V_{small}, other value) یک مقدار مثبت غیر صفر را که در تابع استفاده می شود را تضمین می کند.

```
10  Foam::tmp<Foam::volScalarField>
11  Foam::viscosityModels::powerLawTemperatureDep::calcNu() const
12  {

13     return max
14     (
15        nuMin_,
16        min
17        (
```

DO NOT COPY - novin-eng.ir

```
18          nuMax_,

19  *pow
20          (
21              max
22              (
23                  dimensionedScalar("one", dimTime, 1.0)*strainRate(),
24                  dimensionedScalar("VSMALL", dimless, VSMALL)
25              ),
26              n_.value() - scalar(1.0)
27          )
28      )
29  );
30  }
```

علاوه بر این تابع read در کلاس power law، مقادیر ثابت k و n و nuMin و nuMax را از فایل transport properties می خواند.

```
Foam::viscosityModels::powerLawTemperatureDep::powerLawTemperatureDep
(
    const word& name,
    const dictionary& viscosityProperties,
    const volVectorField& U,
    const surfaceScalarField& phi
)
:
    viscosityModel(name, viscosityProperties, U, phi),
    powerLawTemperatureDepCoeffs_(viscosityProperties.subDict(typeName +
"Coeffs")),
    k_(powerLawTemperatureDepCoeffs_.lookup("k")),
    k0_(powerLawTemperatureDepCoeffs_.lookup("k0")),
    T0_(powerLawTemperatureDepCoeffs_.lookup("T0")),
    n_(powerLawTemperatureDepCoeffs_.lookup("n")),
    nuMin_(powerLawTemperatureDepCoeffs_.lookup("nuMin")),
    nuMax_(powerLawTemperatureDepCoeffs_.lookup("nuMax")),
    nu_
    (
        IOobject
        (
            name,
            U_.time().timeName(),
            U_.db(),
```

DO NOT COPY - novin-eng.ir

```
            IOobject::NO_READ,
            IOobject::AUTO_WRITE
        ),
        calcNu()
    )
{}


// * * * * * * * * * * * * * * * Member Functions  * * * * * * * * * * * * * * * //

bool Foam::viscosityModels::powerLawTemperatureDep::read
(
    const dictionary& viscosityProperties
)
{
    viscosityModel::read(viscosityProperties);

    powerLawTemperatureDepCoeffs_ = viscosityProperties.subDict(typeName +
"Coeffs");

    powerLawTemperatureDepCoeffs_.lookup("k") >> k_;
    powerLawTemperatureDepCoeffs_.lookup("k0") >> k0_;
    powerLawTemperatureDepCoeffs_.lookup("T0") >> T0_;
    powerLawTemperatureDepCoeffs_.lookup("n") >> n_;
    powerLawTemperatureDepCoeffs_.lookup("nuMin") >> nuMin_;
    powerLawTemperatureDepCoeffs_.lookup("nuMax") >> nuMax_;

    return true;
}
```

به علاوه، مقدار nu در یک فایل با همان نام برای هر گام زمانی write خواهد شد.

۱-۴- ویسکوزیته و حلگرهای آن:

۱-۴-۱- nonNewtonianIcoFoamSolver

این حلگر یک حلگر استاندارد اپن فوم برای حل گذرا است و برای حل جریان آرام تراکم ناپذیر سیالات غیر نیوتنی به کار می رود. فرق بین این حلگر و حلگر icoFoam ویسکوزیته غیرنیوتنی سیال در مقایسه با icoFoam است.

با نگاه کردن به خط ۳۱ تا ۴۳ از non Newtonian.c تابع correct() در ابتدا فراخوانی شده است تا مقدار ویسکوزیته را اصلاح کند. سپس تابع nu() از کلاس انتخاب شده، فراخوانی شده و معادله مومنتوم ساخته شده است.

DO NOT COPY - novin-eng.ir

```
31   fluid.correct();

32   // Momentum predictor

33   fvVectorMatrix UEqn
34   (
35       fvm::ddt(U)
36    + fvm::div(phi, U)
37    - fvm::laplacian(fluid.nu(), U)
38    - (fvc::grad(U) & fvc::grad(fluid.nu()))
39   );

40   if (piso.momentumPredictor())
41   {
42       solve(UEqn == -fvc::grad(p));
43   }
```

۱-۴-۲- nonNewtonianSimpleFoamSolver

این حلگر یک حلگر استاندارد اپن فوم برای حل حالت پایا است و برای حل جریان آرام تراکم ناپذیر سیالات غیر نیوتنی به کار می رود. فرق بین این حلگر و حلگر simpleFoam ویسکوزیته غیرنیوتنی سیال در مقایسه با simpleFoam است.

۱-۵- ویسکوزیته وابسته به دما

وابستگی ویسکوزیته با معرفی کلاس های مختلف مورد بحث قرار گرفته بود. وارد کردن دما به درون کیس، ویسکوزیته ماده را در طول تست تحت تاثیر قرار می دهد. این بدین معناست که یک کلاس برای ویسکوزیته وابسته به دما ضروری است. در این بخش، با استفاده از کلاس power law و همچنین حلگر simpleFoam یک مدل جدید ویسکوزیته دمایی و یک حلگر جدید برای محاسبه دما در اپن فوم اعمال خواهد شد. وابستگی ویسکوزیته از معادلات زیر پیروی می کند:

$$\mu = k\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_i}\right)^{n-1} \qquad (۴-۱)$$

$$k = k_0 - m_k(T - T_0) \qquad (۵-۱)$$

DO NOT COPY – novin-eng.ir