


به نام خدا



Market Code

تئوری جریان بخار مرطوب (wet steam) و معادلات بکار

رفته در فلوئنت

 <p>دانشگاه صنعتی امیرکبیر</p>	سهیل نامور	توسعه دهنده کد:
سهیل نامور	تهیه کننده مستند:	

۱۳۹۲/۱۱/۳۰

تاریخ تنظیم:

Marcet Code

کلیات و محدودیت های مدل wet steam

زمانی که یک انبساط سریع در بخار رخ می دهد با توجه به اینکه نمودار حالت از خط بخار- اشباع رد می شود، یک میعان اتفاق می افتد. در واقع انبساط باعث می شود تا بخار خشک که در حالت داغ (super-heated) به سر می برد، ابتدا کمی سرد شود و سپس با شکل گیری قطرات ریز آب تبدیل به یک جریان دو فازی می شود که در آن بخار اشباع و ذرات ریز آب وجود دارند. این مخلوط به بخار مرطوب موسوم است. مدلسازی بخار مرطوب در طراحی و تحلیل توربین های بخار بسیار با اهمیت است.

اگر رطوبت جریان از حدی بیشتر شود می تواند در مراحل فشار پایین توربین، اثرات خوردگی شدیدی را بر پره ها اعمال کند. به همین دلیل راندمان آیرودینامیکی توربین نیز در منطقه بخار مرطوب کاهش می یابد.

FLUENT برای مدلسازی جریان مرطوب از یک روش اویلری- اویلری بهره می گیرد. مدلسازی این جریان به وسیله حل معادلات تراکم پذیر ناویر-استوکس انجام می شود. همچنین از دو معادله انتقال برای کسر جرمی فاز مایع (β) و تعداد قطرات مایع در واحد حجم (n) نیز استفاده می شود. تغییر فاز نیز که عبارت است از شکل گیری قطرات آب در یک میعان غیر تعادلی همگون، بر مبنای تئوری شکل گیری قطرات غیر همدمای مورد تحلیل واقع می شود.

در این قسمت مدل wet steam از نظر تئوری تشریح شده است. در مدل wet steam در نرم افزار FLUENT محدودیت های زیر در حال حاضر وجود دارند.

- مدل wet steam تنها برای حلگر چگالی مبنا (density - based) موجود است.
- تنها شروط مرزی که برای ورودی و خروجی قابل استفاده هستند عبارت اند از: Pressure inlet- mass- flow inlet - pressure outlet
- زمانی مدل wet steam فعال است دسترسی به پنجره Materials محدود شده است زیرا خواص مخلوط سیال دو فازی از طریق معادلات داخلی نرم افزار یا از طریق UDF تعریف می شوند. به همین دلیل اگر در تحلیل به تنظیم خواص جامد نیاز است این کار باید قبل از فعالسازی مدل wet steam صورت گیرد.

جریان بخار مرطوب

بخار مرطوب ترکیبی از دو فاز است. فاز اول یک فاز گازی است که از بخار آب تشکیل شده (مشخص شده با زیرنویس ۱) در حالی که فاز دوم یک فاز مایع شامل قطرات چگال آب است (مشخص شده با زیرنویس ۲).

در این مدل فرض می کنیم که:

- سرعت سُرش بین قطرات مایع و فاز گازی ناچیز است.
- بر هم کنش قطرات قابل چشم پوشی است.
- کسر جرمی فاز مایع (β) ، که با عنوان فاکتور رطوبت نیز شناخته می شود، کوچک است ($\beta < 0.2$)
- از آنجا که به طور معمول سایز قطرات کوچک است (تقریباً از ۰.۱ میکرون تا ۱۰۰ میکرون) فرض می شود که حجم فاز مایع میعانی ناچیز است.

با توجه به فرضیات بالا نتیجه می شود که چگالی این مخلوط (ρ) می تواند به چگالی بخار ρ_v به صورت معادله زیر وابسته باشد:

$$\rho = \frac{\rho_v}{(1 - \beta)}$$

به علاوه می توان نتیجه گرفت که دما و فشار مخلوط برابر است با دما و فشار فاز بخار.

جریان مخلوط بخار و مایع به صورت معادلات ناویر- استوکس در شکل برداری قابل ارائه است.

$$\frac{\partial \mathbf{W}}{\partial Q} \frac{\partial}{\partial t} \int_V Q dV + \oint [F - G] \cdot dA = \int_V H dV$$

که در آن $Q=(P,u,v,w,T)$ کمیت های مربوط به مخلوط هستند.

معادلات جریان به وسیله الگوریتم های چگالی- مبنای به کار گرفته شده برای جریانهای قابل تراکم، قابل حل

است. برای مدل کردن بخار مرطوب به دو معادله انتقالی دیگر نیاز است.

اولین معادله انتقالی حاکم بر مقدار مایع میعان شده، عبارت است از:

$$\frac{\partial \rho \beta}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \beta) = \Gamma$$

که در آن Γ نرخ تولید جرم به علت میعان و تبخیر است (کیلوگرم در واحد حجم در ثانیه). دومین معادله

انتقالی ، تغییر فاز تعداد قطرات در واحد حجم را مدل می کند.

$$\frac{\partial \rho \eta}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \eta) = \rho I$$

که در آن I سرعت شکل گیری قطرات است (تعداد قطرات جدید در واحد حجم در هر ثانیه).

برای مشخص کردن تعداد قطرات در واحد حجم و مقدار متوسط حجم قطرات (V_d) در عبارت زیر ترکیب شده

اند:

$$\eta = \frac{\beta}{(1 - \beta)V_d(\rho_l/\rho_v)}$$

که در آن ρ_l چگالی مایع است و متوسط حجم قطرات به صورت زیر تعریف می شود:

$$V_d = \frac{4}{3}\pi r_d^3$$

در این معادله r_d شعاع قطرات است.

مدل تغییر فاز

موارد زیر در مدل کردن تغییر فاز فرض خواهد شد:

- میعان همگن است (هیچ ناخالصی ای برای تشکیل هسته وجود ندارد).
- رشد قطره بر اساس میانگین رشد "شعاع میانگین" است.
- قطره ها به صورت کروی فرض می شوند.
- قطرات توسط فضای بخار بی نهایت محصور شده اند.
- ظرفیت گرمایی قطرات ریز در مقایسه با گرمای نهان منتشر شده در میعان قابل چشم پوشی است.

میزان تولید جرم Γ در تئوری کلاسیک شکل گیری قطرات در طی پروسه غیرتعادلی میعان ، از مجموع افزایش جرم به دلیل شکل گیری قطرات جدید و یا رشد یا از میان رفتن این قطرات به دست می آید. بنابراین Γ به صورت معادله زیر نوشته می شود:

$$\Gamma = \frac{4}{3}\pi\rho_l I r_*^3 + 4\pi\rho_l \eta \bar{r}^2 \frac{\partial \bar{r}}{\partial t}$$

که در آن \bar{r} شعاع متوسط قطرات است و r_* شعاع بحرانی کلوین-هلم هولتز قطرات است که بالای آن هر قطره رشد خواهد کرد و پایین تر از آن قطره تبخیر می شود. r_* به صورت زیر بیان می شود:

$$r_* = \frac{2\sigma}{\rho_l RT \ln S}$$

که در آن σ کشش سطحی مایع در دمای T است. P_1 چگالی مایع میعانی در همان دمای T است و S نسبت فوق اشباع است که به صورت نسبت فشار بخار به فشار اشباع تعادل است.

$$s = \frac{P}{P_{\text{sat}}(T)}$$

فرآیند انبساط معمولاً بسیار سریع است. بنابراین زمانی که مسیر فرآیند از خط بخار اشباع گذشت، پروسه از حالت تعادل عبور می کند و نسبت فوق اشباع S می تواند مقداری بیشتر از یک داشته باشد.

فرآیند چگالش شامل ۲ مکانیزم است. انتقال حجم از بخار به قطره و انتقال گرما به شکل گرمای پنهان از قطرات به بخار. رابطه انتقال انرژی می تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$\frac{\partial \bar{r}}{\partial t} = \frac{P}{h_{lv} \rho_l \sqrt{2\pi RT}} \frac{\gamma + 1}{2\gamma} C_p (T_0 - T)$$

که در آن T دمای قطره است.

نظریه کلاسیک تشکیل قطره همگن، تشکیل فاز مایع به فرم قطره از یک فاز فوق اشباع در غیاب ناخالصی ها یا ذرات خارجی را تشریح می کند. سرعت تشکیل قطره توسط نظریه کلاسیک تشکیل پایای قطره همگن وصف شده و برای اثرات غیر همدما به صورت زیر تصحیح شده:

$$I = \frac{q_c}{(1 + \theta)} \left(\frac{\rho_v^2}{\rho_l} \right) \sqrt{\frac{2\sigma}{M_m^3 \pi}} e^{-\left(\frac{4\pi r_c^2 \sigma}{3k_b T} \right)}$$

که در آن q_c ضریب تبخیر، k_b ثابت بولتزمن M_m جرم یک مولکول، σ کشش سطحی مایع و ρ_l چگالی مایع در دمای T است. ضریب تصحیح غیر همدما، θ ، به صورت زیر است:

$$\theta = \frac{2(\gamma - 1)}{(\gamma + 1)} \left(\frac{h_{lv}}{RT} \right) \left(\frac{h_{lv}}{RT} - 0.5 \right)$$

در این معادله h_{lv} آنتالپی ویژه از تبخیر در فشار P است و γ نسبت ظرفیت گرمای ویژه.

خواص ترمودینامیک بخار مرطوب (داخلی نرم افزار)

معادلات زیادی برای تشریح حالت ترمودینامیک و خواص بخار وجود دارد. گرچه برخی از این معادلات در ایجاد جداول خواص دقیق هستند ولی برای محاسبات سریع CFD مناسب نیستند. بنابراین فلوننت از فرم ساده تری از حالت ترمودینامیکی معادلات برای محاسبات CFD دقیق تر در یک محدوده گسترده از دما و فشار استفاده می کند. این معادلات در زیر توضیح داده شده اند.

معادلات حالت

معادلهٔ حالت بخار مورد استفاده در حل ، که فشار را به چگالی بخار و دما مرتبط می سازد به صورت زیر است:

$$P = \rho_v RT(1 + B\rho_v + C\rho_v^2)$$

که B و C در آن دومین و سومین ثابت هایی هستند که از معادلات تجربی زیر به دست می آیند:

$$B = a_1\left(1 + \frac{\tau}{\alpha}\right)^{-1} + a_2 e^{\tau}(1 - e^{-\tau})^{\frac{5}{2}} + a_3 \tau$$

که در آن B بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب است و $\tau = \frac{1500}{T}$ که T بر حسب کلوین است و داریم:

$$\alpha = 10000, a_1 = 0.0015, a_2 = -0.000942, a_3 = -0.0004882$$

$$h_v = h_0(T) + RT \left[(B - B_1)\rho_v + \left(C - \frac{C_1}{2}\right)\rho_v^2 \right] \quad C = a(\tau - \tau_0)e^{-\alpha\tau} + b$$

که در این معادله هم C بر حسب m^6/kg^2 است و $\tau = \frac{T}{647.286}$ که T بر حسب کلوین است و داریم:

$$\tau_0 = 0.8978, \alpha = 11.16, a = 1.772, b = 1.5E - 06$$

معادلات تجربی که ضرایب B و C را به ما می دهند، محدوده حرارتی ۲۷۳ تا ۱۰۷۳ کلوین را پوشش می دهند.

ظرفیت گرمای ویژه بخار هم فشار C_{pv} از معادلهٔ زیر به دست می آید:

$$C_{pv} = C_{p0}(T) + R \left[[(1 - \alpha_v T)(B - B_1) - B_2] \rho_v + \left[(1 - 2\alpha_v T)C + \alpha_v T C_1 - \frac{C_2}{2} \right] \rho_v^2 \right]$$

آنتالپی ویژه بخار h_v از معادلهٔ زیر به دست می آید:

$$h_v = h_0(T) + RT \left[(B - B_1)\rho_v + \left(C - \frac{C_1}{2}\right)\rho_v^2 \right]$$

آنتروپی ویژه بخار S_v از معادله زیر به دست می آید:

$$s_v = s_0(T) - R \left[\ln \rho_v + (B + B_1)\rho_v + \frac{(C + C_1)}{2} \rho_v^2 \right]$$

گرمای ویژه هم فشار در فشار صفر از معادله تجربی زیر به دست می آید:

$$C_{p0}(T) = \sum_{i=1}^6 a_i T^{i-2}$$

که در آن C_p در واحد کیلوژول بر کیلوگرم است و داریم:

$$a_1 = 46.0, a_2 = 1.47276, a_3 = 8.3893 \cdot 10^{-4}, a_4 = -2.19989 \cdot 10^{-7}, a_5 = 2.46619 \cdot 10^{-10}, a_6 = -9.70466 \cdot 10^{-14}$$

و

$$B_1 = T \frac{dB}{dT}, C_1 = T \frac{dC}{dT}, B_2 = T^2 \frac{dB^2}{dT^2}, \text{ and } C_2 = T^2 \frac{dC^2}{dT^2}$$

$h(T)$ و $s(T)$ هر دو تابعی از دما هستند و به صورت زیر تعریف می شوند:

$$h_0(T) = \int C_{p0} dT + h_c$$

$$s_0(T) = \int \frac{C_{p0}}{T} dT + s_c$$

که در آن h_c و s_c هر دو ثابت های دلخواه هستند.

μ_v (ویسکوزیته دینامیکی بخار) و Kt_v (هدایت گرمایی) هم تابعی از دما هستند.

- [١] FLUENT ٦.٣ user guide "*wet steam theory*"
- [٢] M. J. Moore and C. H. Sieverding. *Two-Phase Steam Flow in Turbines and Separator*. McGraw-Hill, ١٩٧٦.
- [٣] J. B. Young. *Two-Dimensional, Nonequilibrium, Wet-Steam Calculations for Nozzles and Turbine Cascades*. *Journal of Turbomachinery*, ١١٤:٥٦٩-٥٧٩, July ١٩٩٢.
- [٤] J. B. Young. *An Equation of State for Steam for Turbomachinery and Other Flow Calculations*. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, ١١٠:١-٧, January ١٩٨٨.
- [٥] J. B. Young. *The Spontaneous Condensation of Steam in Supersonic Nozzles*. *Physico Chemical Hydrodynamics*, ٣(٢):٥٧-٨٢, July ١٩٨٢.
- [٦] W. C. Reynolds. *Thermodynamic Properties in SI: Graphs, Tables, and Computational Equations for ٤٠ Substances*. Department of Mechanical Engineering, Stanford University, ١٩٧٩.