سمینار کارشناسی ارشد **** گرایش ****
گروه *****،دانشکده ****، دانشگاه ****، *** ، ایران، ۲۴ *** ۱۳۹۲

مروری بر انواع روش‌های عددی به کار رفته در مدلسازی نانوسیالات

نویسنده اول[۱]، نویسنده دوم[۲]

[۱]استاد گروه ****، دانشگاه ****، m***@**.ac.ir
[۲]دانشجو کارشناسی ارشد *****، دانشگاه ****، s****@***.ac.ir

چکیده

در سال‌های اخیر ارزیابی میزان افزایش انتقال حرارت در صورت استفاده از نانوسیالات در سیستم‌های حرارتی، مرکز توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است.چرا که پیشرفت‌های جدید در ساخت نانوسیالات مرغوب[۱] (۱۰۰-۱ نانومتر) باعث گرایش صنایع به استفاده از نانوسیالات با ضریب رسانش حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابجایی بالاتر نسبت به سیالات خالص شده‌است. در این نگاره به ارائه خلاصه‌ای از مطالعات عددی انجام شده در زمینه نانوسیالات که شامل انواع روشهای عددی تا جدیدترین آنها که روش شبکه بولتزمن[۲]است می‌پردازیم. روشهای عددی بکار گرفته شده برای مدلسازی نانوسیالات به دو گروه عمده دو-فازی[۳] و تک-فازی[۴] تقسیم می‌شوند و تفاوت آنها در مرتبه دقت، هزینه محاسباتی و سطح دشواری کدنویسی است. ولی نتایج حاصل از تمام این روش‌ها بسته به نیاز و امکانات و مهارت کاربر تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی نشان داده‌اند.

واژه های کلیدی

نانوسیال، حل عددی، انتقال حرارت، شبکه بولتزمن

مقدمه

در سالهای گذشته رشد فناوری ساخت رایانه‌های با قدرت پردازش سریع، مهندسان را قادر ساخته که به توسعه روش‌های عددی برای مدلسازی پدیده‌های مهندسی و بهبود فرایند طراحی بپردازند. استفاده از نتایج عددی علاوه بر اینکه ما را قادر می‌سازد قبل از بررسی مسایل به صورت آزمایشگاهی مطالعه اولیه‌ای بر آن‌ها داشته باشیم، بلکه می‌تواند به بهبود نتایج آزمایشگاهی موجود هم کمک کند. سالهاست که دینامیک سیالات محاسباتی[۵] به ابزار قدرتمندی در محاسبه پدیده‌های مهندسی با فیزیک چندگانه[۶] بدل شده‌است.

عمده مطالعات عددی انجام شده، مربوط به مدلسازی جریان و انتقال حرارت سیالات معمولی است. این مطالعات معمولاً پیرو همان مقالات اصول اولیه روش عددی مورد استفاده هستند و در انتها نتایجی را منطبق بر کار آزمایشگاهی انجام شده با هندسه مشابه گزارش می‌نمایند. با ورود نانوسیالات به حوزه مکانیک سیالات و انتقال حرارت، مسیر جدیدی در مکانیک سیالات عددی شکل گرفته‌است. برای رفع نیاز صنایع مرتبط با نانوسیالات روش‌های عددی نه چندان متفاوتی با روش‌های عددی موجود به کار گرفته‌شده‌است.

امکان ساخت نانوسیالات دارای پایداری بالا، صنایع را ترغیب به استفاده گسترده از آن‌ها جهت بهبود بخشیدن عملکرد سیستم‌های حرارتی نموده‌است. استفاده از نانوذرات با اندازه ۱۰۰-۱ نانومتر علاوه بر بالا بردن پایداری نانوسیالات خاصیت نیوتنی آن را هم حفظ می‌کند. ناگفته نماند که کاربرد نانوسیالات محدود به مسایل حرارتی نیست. بلکه ویژگی‌های خاص نانوسیالات باعث به کارگیری آنها در حوزه‌هایی نظیر داروسازی و پزشکی، صنایع نفت و روغن‌کاری ، وسایل نقلیه و حتی سلول‌های سوختی[۷] شده‌است. مکانیک سیالات محاسباتی می‌تواند همانطور که به استفاده بهینه از سایر سیالات کمک می‌کند به استفاده حداکثری از ویژگی‌های خاص نانوسیالات منجر شود. الگوریتم حل مورد استفاده برای مدلسازی نانوسیالات تفاوت چندانی با الگوریتم حل سیالات معمولی ندارد. با این تفاوت که وجود نانوذرات معلق مشکلاتی را زمان حل معادلات بقا[۸] به وجود می‌آورد. برای مثال زمان استفاده از مدل‌های تک-فازی و دو-فازی مشکلاتی نظیر زیاد شدن زمان همگرایی و یا ناپایداری حل به وجود می‌آید.

به منظور شناخت بهتر نانوسیالات، آزمایشات بسیار مفیدی بر روی این سیالات جدید انجام شده‌است. بعدها از همین آزمایشات برای اعتبار بخشیدن به نتایج عددی بکار رفته در مدلسازی نانوسیالات استفاده شده‌است. تحقیقات آزمایشگاهی به بررسی جنبه‌های متفاوتی از رفتار نانوسیالات، نظیر رسانش حرارتی، ویسکوزیته، ضریب انتقال حرارت جابجایی و حتی جوشش پرداخته‌اند. آزمایش انجام شده توسط جانگ[۹] و همکاران[۱] روی انتقال حرارت جابجایی نانوسیالات نشان داد که افزایش عدد بی بعد

---

[۱] Ultrafine
[۲] Lattice Boltzmann method
[۳] Two-phase
[۴] Single-phase
[۵] Computational fluid dynamics(CFD)
[۶] Multi-physic
[۷] Fuel cell
[۸] Conservation equations
[۹] Jung

رینولدز[10] منجر به افزایش عدد بی بعد ناسلت[11] می‌شود.آزمایش دیگری که توسط دینگ[12] و همکاران[۲] بر روی نانوسیال حاوی نانو لوله‌های کربنی[13] انجام شده‌است. افزایش قابل توجهی(بیش از ۳۵۰ درصد) در نرخ انتقال حرارت نشان داد. ویلیامز[14] و همکاران[۳] آزمایشات گوناگونی به منظور درک هرچه بهتر چگونگی افزایش نرخ انتقال حرارت در صورت استفاده از نانو ذرات معلق در سیال پایه[15] انجام داده‌اند. همچنین انتقال حرارت جوششی[16] در ادامه مطالعه خواص حرارتی نانوسیالات مورد بررسی قرار گرفته‌است. البته در این زمینه خاص(انتقال حرارت جوششی) گزارشات ضد ونقیضی ارائه شده‌است. به عنوان مثال مرجع[۴] کاهش نرخ انتقال حرارت جوششی را در اثر افزودن نانوذرات نشان می‌دهد در حالی که بالعکس در مرجع[۵] افزایش نرخ انتقال حرارت جوششی پس از افزودن نانوذرات گزارش شده‌است. البته این نوع تناقضات قابل توجیه هستند و می‌توان گفت که شرایط حاکم بر مسأله تأثیر بسیار زیادی بر نتایج دارد و نباید از آن غافل شد. یکی از مهمترین عواملی که می‌تواند تفاوت عمده‌ای در نتایج ایجاد کند نوع نانو سیال بکار رفته در آزمایش است. مثلاً سیال پایه می‌تواند آب، استون[17]، روغن، اتیلن گلیکول[18] و یا هر سیال دیگری باشد. نانو ذرات معلق[19] هم می‌توانند با جنس و حتی اندازه‌های متفاوتی مورد استفاده قرار گیرند. پارامتر بسیار مهم دیگر غلظت نانوذرات معلق است. همین اهمیت زیاد باعث شده که مقالات بسیار زیادی مثل مرجع[۶] بر مطالعه روی اثر این ویژگی بر خواص حرارتی نانوسیالات با سیال پایه و نانوذرات متفاوت متمرکز شوند. از دیگر پارامترهای مهم می‌توان به هندسه[20] مورد بررسی، رژیم‌های مختلف جریانی شامل جریان آرام[21] و آشفته[22]، و مکانیزم انتقال حرارت شامل جابجایی اجباری[23] و طبیعی[24] و یا حتی انتقال حرارت ترکیبی[25] اشاره کرد. البته به ازای هر کدام از این ویژگی‌ها مقالات بسیار زیادی می‌توان دید که به تفصیل به بررسی آن پرداخته‌اند[۷].

[10] Reynolds number
[11] Nusselt number
[12] Ding
[13] Carbon nanotube(CNT)
[14] Williams
[15] Base fluid
[16] Boiling heat transfer
[17] Acetone
[18] Ethylene glycol
[19] Suspended
[20] Geometry
[21] Laminar
[22] Turbulent
[23] Force convection
[24] Natural / free convection
[25] Mixed convection

بنابراین در مدلسازی رفتار نانوسیالات، شرایط حاکم را باید طوری قرار دهیم که تا حد امکان به شرایط واقعی نزدیک باشد. البته در مورد کارهای آزمایشگاهی هم این قضیه صادق است. ناگفته نماند که در هنگام استفاده از روش‌های عددی برای مدلسازی نانوسیالات به ناچار باید از یک سری فرض‌های منطقی استفاده نماییم. در هر صورت محققین بسیاری پیشنهادات خود را جهت دستیابی به نتایج قابل قبول در حل‌های عددی منتشر کرده‌اند. در این نگاره سعی داریم مروری داشته باشیم بر روش‌هایی که محققین برای مدلسازی جنبه‌های مختلف نانوسیالات بکار گرفته‌اند. و به تفصیل اشکالات و همچنین مزایای هر کدام از این روش‌ها را شرح خواهیم داد.

مدلسازی خواص نانوسیالات

به وضوح می‌دانیم که برای حل معادلات بقا، معین بودن برخی از خواص نانو سیال ضروری است. به همین دلیل به منظور دستیابی به جواب‌های معتبر در حل عددی باید در میان روابط متنوع موجود، مناسب ترین آن را برای پیش‌بینی خواص مورد نظر انتخاب کنیم. خواص مربوطه بسته به معادلات بقایی که قصد حل کردن آن‌ها را داریم می‌تواند شامل ضریب رسانش حرارتی[26]، ویسکوزیته[27]، چگالی و ظرفیت حرارتی[28] باشند.

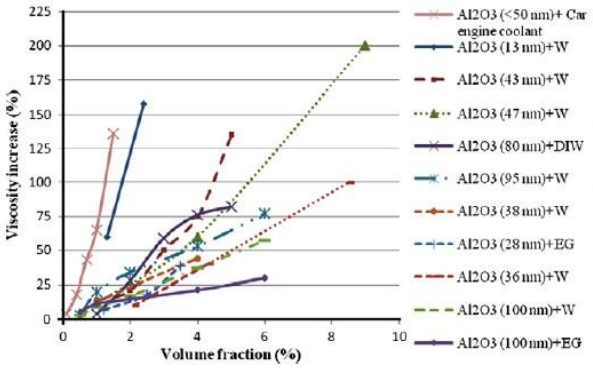
ویسکوزیته

مدل‌های بسیار متنوعی برای پیش‌بینی ویسکوزیته مخلوط نانوسیال ارائه شده‌است. که البته وجه اشتراک تمام آن‌ها وابستگی به غلظت نانوذرات معلق در سیال پایه است. مدل ابتدایی برینکمن[29][۷] یکی از بهترین مدل‌هاست که استفاده بسیار گسترده‌ای در مطالعات عددی مربوط به نانوسیالات داشته‌است. معادله(۱) وابستگی ویسکوزیته نانوسیال، ویسکوزیته سیال پایه و غلظت نانوذرات معلق را در مدل برینکمن نشان می‌دهد:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \qquad (1)$$

به هر حال روابط دیگری هم در برخی مقالات پیشنهاد شده‌است. به عنوان مثال ابو-ندا[30] و چمخا[31][۸] برای مدل کردن جابجایی طبیعی درون محفظه‌ای حاوی مخلوط نانوسیال آب-اتیل گلیکول-اکسیدمس[32] از رابطه ویسکوزیته نامبورا[33][۷] به صورت زیر استفاده

[26] Thermal conductivity
[27] Viscosity
[28] Heat capacitance
[29] Brinkman
[30] Abu-neda
[31] Chamkha
[32] Cuo-ethylene glycol-water
[33] Nambura



شکل ۱: افزایش ویسکوزیته نانوسیالات مختلف با افزایش درصد حجمی نانوذرات طبق نتایج آزمایشگاهی[۷]

نمودند:

$$\log\left(\mu_{nf}\right)=Ae^{-BT} \qquad (۲)$$

که داریم:

$$A=1.837\phi^2-29.643\phi+165.65$$

$$B=4\times10^{-6}\phi^2-0.001\phi+0.0186 \qquad (۳)$$

در این مطالعه دو مدل برینکمن و نامبورا مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داد که در مدلسازی جابجایی طبیعی نانو سیال با عددهای رایلی[۳۴] مختلف، عدد ناسلت پیش‌بینی شده توسط مدل برینکمن مقدار بزرگتری را نسبت به عدد ناسلت پیش‌بینی شده توسط مدل نامبورا را نشان می‌دهد. این محققین با اظهار داشتند که از ترکیب مدل‌های مذکور می‌توان به نتایج قابل قبولی رسید. البته لازم به ذکر است که این نتایج خاصِ هندسه بررسی شده توسط این محققین است و ممکن است که حتی حل همین مسأله در محفظه‌ای با ابعاد متفاوت، نتایج کاملاً عکس به ما بدهد. حتی برخی از مطالعات نشان دادند که با استفاده از مدل‌های مختلف، ممکن است نتایج ضد و نقیضی بدست آورد. به عنوان مثال، عارف منش و محمودی[۹] با استفاده از مدل‌های ارائه شده توسط مایگا[۳۵] و همکاران[۷] و مدل برینکمن نتایج متناقضی را در مدلسازی انتقال حرارت ترکیبی در یک محفظه مستطیلی حاوی نانوسیال اکسید آلومینیوم-آب[۳۶] به دست آوردند. تناقض مذکور به تأثیر عدد ریچاردسون[۳۷] و غلظت حجمی نانوذرات بر انتقال حرارت مربوط می‌شود. در شکل۱ رابطه ویسکوزیته نانوسیال مختلف و غلظت حجمی نانوذرات نشان داده شده‌است.

ضریب رسانش حرارتی

مدل‌های بسیار زیادی مثل مدل معروف ماکسول[۳۸][۷] برای مدلسازی نانوسیالات توسط محققین برای مدلسازی نانو سیالات بکار گرفته‌شده‌است. البته خود ماکسول صاحب اصلی ایده استفاده از ذرات فلزی برای بالا بردن ضریب رسانش حرارتی سیالات است و مدل ماکسول رابطه‌ای کلی برای ذرات با ابعاد میلی‌متر و میکرومتر می‌باشد و برای نانوذرات هم مورد استفاده قرار گرفته است، ولی به طور کلی در مقالات موجود می‌توان تنوع بسیار زیادی در مدل‌های پیش‌گویی ضریب رسانش نانو سیالات مشاهده نمود. به رابطه برخی از مدل‌ها یک قسمت متغیر برای بیان حرکت براونی[۳۹] نانو ذرات معلق به اضافه شده‌است. گفتنی است که اینگونه مدل‌ها لزوماً از مرتبه دقت بالاتری برخوردار نیستند. مثلاً وجها[۴۰] و همکاران[۱۰] برای مدلسازی جریان مخلوط اکسید آلومینیوم[۴۱] و اکسید مس[۴۲] در آب و اتیلن گلیکول[۴۳] در یک خنک‌کننده[۴۴] اتومبیل، یک قسمت متغیر را که تابعی است از دما و غلظت نانوذرات، در رابطه خود افزودند تا حرکت براونی نانوذرات معلق را در نظر بگیرد. این رابطه به صورت زیر است:

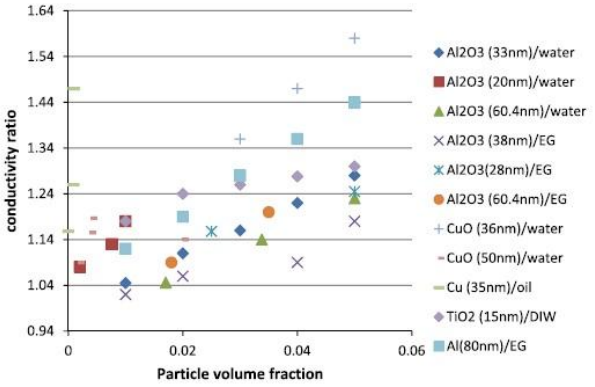
$$k_{nf}=\frac{k_p+2k_{bf}-2\left(k_{bf}-k_p\right)\phi}{k_p+2k_{bf}+2\left(k_{bf}-k_p\right)\phi}k_{bf}$$

$$+5\times10^4\beta\phi\rho\sqrt{\frac{kT}{\rho_p d_p}}f\left(T,\phi\right) \qquad (۴)$$

در مطالعه دیگری که توسط فِنگ[۴۵] و کلینستر[۴۶][۷] انجام شده‌است. رابطه‌ای دو بخشی حاصل شد که بخش اول که بسیار شبیه به رابطه ماکسول است، قسمت ثابت[۴۷] نامگذاری شد. و قسمت دوم که قسمت اختلاط جزئی[۴۸] نامیده شد، برای بیان حرکت تصادفی[۴۹] نانوذرات به کار رفت. رابطه مشابهی توسط لی[۵۰] و کلینستر[۱۱] برای محاسبه نرخ انتقال حرارت در یک ریزمجرا[۵۱] حاوی نانوسیال اکسید مس-آب[۵۲] به کار گرفته‌شد. آن‌ها حتی نتایج بهتری را نسبت به مطالعات گذشته ارائه نمودند. تمرکز سایر مطالعات بر روی چگونگی بهتر در نظر گرفتن اثر حرکت براونی نانوذرات معلق در مدلسازی نانوسیالات بوده‌است. قزوینی وشکوهمند[۱۲] در حل عددی یک ریزمجرا، جهت

[۳۴] Rayleigh number
[۳۵] Maiga
[۳۶] Al_2O_3-water
[۳۷] Richardson number
[۳۸] Maxwell

[۳۹] Brownian
[۴۰] Vajjha
[۴۱] Al_2O_3
[۴۲] CuO
[۴۳] Ethylene glycol
[۴۴] Radiator
[۴۵] Feng
[۴۶] Kleinsteuer
[۴۷] Static part
[۴۸] Micro-mixing part
[۴۹] Random movement
[۵۰] Li
[۵۱] Microchannel
[۵۲] CuO-water



شکل ۲: افزایش ضریب رسانش حرارتی نانوسیالات مختلف با افزایش درصد حجمی نانوذرات طبق نتایج آزمایشگاهی[۷]

در نظر گرفتن حرکت تصادفی ذرات معلق از پیشنهاد پِراشر[۵۳][۷] در تعریف عدد رینولدز براونی[۵۴] به صورت زیر استفاده کردند:

$$\mathrm{Re}_b = \frac{1}{\nu}\sqrt{\frac{18k_bT}{\pi\rho d_p}} \qquad (۵)$$

محققین مذکور یادآور شدند که تغییر دمای توده سیال باعث تغییر در حرکت تصادفی نانوذرات می‌شود. این تغییر نهایتاً منجر به تغییر در نرخ انتقال حرارت می‌شود.

در کار دیگری که توسط جهانشاهی و همکاران[۱۳] صورت گرفت. اثر حرکت براونی را با یک ترم پراکندگی[۵۵] بیان نموده و آن را به ترمی ایستا[۵۶] از معادله اصلی ماکسول اضافه نمودند. معادلات مربوطه به صورت زیر هستند:

$$k_d = c\left(\rho c_p\right)_{nf}\sqrt{u^2+v^2}\,\phi d_p \qquad (۶)$$

$$k_{eff} = k_{(eff)stagnant} + k_d \qquad (۷)$$

بر خلاف تحقیقات فراوان که جهت یافتن راهی برای در نظر گرفتن اثر حرکت براونی نانوذرات معلق بر رسانش حرارتی انجام شده‌است. مطالعات جدید نشان می‌دهند که این حرکت براونی آنقدرها هم مهم نیست. شیما[۵۷] و همکاران[۱۴] به بررسی میزان تأثیر ریزهمرفت[۵۸] ناشی از حرکت براونی نانوذرات بر رسانش حرارتی نانوسیال پرداختند. کار این محققین با تغییر قطر نانوذرات از ۲/۸ تا ۹/۵ نانومتر و بررسی میزان افزایش ضریب رسانش حرارتی فقط ۱۹ درصد افزایش را نشان داد. آن‌ها به این ترتیب نشان دادند که حرکت براونی نانوذرات مکانیزم کلیدی مؤثر بر رسانش حرارتی نانوسیال نیست. همچنین از تأثیر زیاد ویژگی‌های توده‌ای[۵۹] سیال مثل نسبت منظری[۶۰] سخن به میان آوردند. با توجه به این مقاله و سایر مقالات مرتبط می‌توان گفت که تحقیقات اخیر از کم بودن اثر حرکت براونی نانوذرات بر ضریب انتقال حرارت نانوسیالات حکایت دارند. در شکل۲ وابستگی ضریب رسانش حرارتی نانوسیال به غلظت نانوذرات را نشان داده شده‌است. این نتایج مربوط به کارهای آزمایشگاهی است ولی در هرحال بالا رفتن ضریب رسانش حرارتی با افزودن غلظت نانوذرات امری بدیهی به نظر می‌رسد.

برخی از محققین، وابستگی تأثیر دما بر خواص نانوسیالات را مورد بررسی قرار داده‌اند. حاصل کار آنها منجر به مدل‌هایی تابع دما شد که توانایی ارائه نتایج با انطباق بیشتری بر داده‌های آزمایشگاهی دارند. مثلاً پالم[۶۱] و همکاران[۱۵] از این مدل‌های تابع دما، هم برای ویسکوزیته و هم برای رسانش حرارتی در محاسبه انتقال حرارت میان دو صفحه موازی استفاده نمودند. کار این محققین از انطباق بهتر نتایج حاصل از این مدل‌های تابع دما بر نتایج آزمایشگاهی نسبت به سایر روش‌ها حکایت دارد.

چگالی و ظرفیت حرارتی

روابطی که توسط پاک[۶۲] و چُو[۶۳][۷] برای پیش‌گویی چگالی و ظرفیت حرارتی نانوسیالات ارائه شده‌است، استفاده گسترده‌ای در مدل‌سازی داشته‌اند. این روابط که تابعی از غلظت نانوذرات هستند به صورت زیر بیان می‌شوند:

$$\rho_{nf} = (1-\phi)\rho_{bf} + \phi\rho_s \qquad (۸)$$

$$\left(\rho c_p\right)_{nf} = (1-\phi)\left(\rho C_p\right)_{bf} + \phi\left(\rho C_p\right)_s \qquad (۹)$$

با توجه به استقبال گسترده محققین از این روابط، نیازی به جستجو روابط دیگر احساس نمی‌شود.

معادلات حاکم

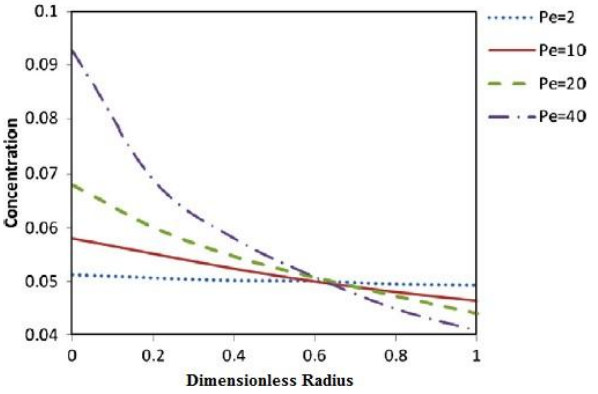
مانند هر مسأله دیگری برای مطالعه عددی نانوسیالات در یک هندسه خاص، باید معادلات بقا را حل کنیم. و می‌دانیم که هر روش مکانیک سیالات عددی برای حل معادلات بقا از ۳ گام اصلی زیر پیروی می‌کند:

۱- از معادلات بقا در حجم کنترل انتگرال می‌گیریم.
۲- معادلات انتگرالی را با استفاده از یک روش گسسته‌سازی[۶۴] به معادلات جبری تبدیل می‌کنیم.
۳- برای حل معادلات جبری از یکی از روش‌های تکرار عددی استفاده می‌نماییم.

---

[۵۳] Prasher
[۵۴] Brownian Reynolds number
[۵۵] Dispersion
[۵۶] Stagnant
[۵۷] Shima
[۵۸] Microconvection
[۵۹] Agglomeration

[۶۰] Aspect ratio
[۶۱] Palm
[۶۲] Pak
[۶۳] Cho
[۶۴] Discretization



شکل ۳: رابطه میان تجمع محلی ذرات و عدد پکلت[۱۶]

در تمام روش‌ها جهت ساده‌سازی حل معمولاً فرض‌هایی نظیر تراکم ناپذیری جریان[۶۵]، رفتار نیوتنی[۶۶]، حالت پایا[۶۷]، فرض مدل بوزینسک[۶۸] در جابجایی طبیعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در مدلسازی رفتار نانوسیالات هم معمولاً فرض تعادل حرارتی میان نانوذرات و سیال پایه، به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

مدلسازی تک-فازی

در مقالات موجود دو گروه اصلی از روش‌های مدلسازی رفتار حرارتی و هیدرودینامیکی نانوسیالات دیده می‌شود. روش اول(مدل تک-فازی) بر پایه دو فرض اساسی تعادل حرارتی نانوذرات و سیال پایه و همچنین سرعت نسبی صفر میان نانوذرات و سیال پایه بنا شده‌است. به عبارت دیگر فرض بر این است که نانوذرات با سرعتی برابر با سرعت سیال پایه حرکت می‌کنند. توجیه پیروان این روش این است که اگرچه نانوذرات معلق دارای فاز جامد هستند ولی اندازه بسیار کوچک آن‌ها باعث حرکت آن‌ها همراه فاز سیال می‌شود. به همین دلیل می‌توان نانوسیال را تک-فاز فرض نمود. البته مطالعات و نتایج بدست آمده توسط دینگ[۶۹] و وِن[۷۰][۱۶] حاکی از آن است که این فرض همیشه نمی‌تواند برقرار باشد. آن‌ها در جریان نانوسیال با اعداد پکلت[۷۱] مختلف درون لوله، حرکت ذرات را ارزیابی کردند و دریافتند که توزیع ذرات پیوسته نیست. شکل۳ رابطه میان تجمع محلی ذرات[۷۲] و عدد پکلت[۷۳] را برای کسر حجمی ۰/۰۵ نانوذرات نشان می‌دهد. از این شکل می‌توان فهمید که فرض همگن بودن جریان[۷۴] نانوسیال فقط تحت شرایطی خاص برقرار است.

در هر صورت بسیاری از مطالعاتی که بر پایه فرض تک-فازی بودن نانوسیالات شکل گرفته‌اند، برای انتقال حرارت و هیدرودینامیک جریان نتایج نسبتاً قابل قبولی را ارائه داده‌اند. معادله انرژی با فرض سرعت نسبی صفر میان نانوذرات و سیال پایه به صورت زیر بیان می‌گردد[۷]:

$$\left(\rho C_p\right)_m\left(\frac{\partial T_m}{\partial t}+u_m\frac{\partial T_m}{\partial x}+v_m\frac{\partial T_m}{\partial y}+w_m\frac{\partial T_m}{\partial z}\right)$$
$$=\left(k_{eff}+k_d\right)\left(\frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2}\right) \qquad (۱۰)$$

در این معادله T_m دمای میانگین و k_{eff} ضریب رسانش حرارتی و k_d ضریب رسانش حرارتی حاصل از نشر[۷۵] نانوذرات است. در حقیقت شیب تند تغییرات دما به واسطه نشر نانوذرات، محققین را ناچار به وارد کردن ضریب رسانش انتشاری[۷۶] نانوذرات در معادله انرژی کرده است.

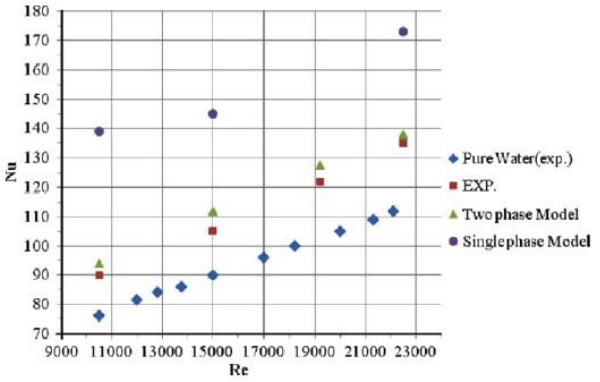
کلیه مدلسازی‌هایی که با استفاده از مدل تک-فازی انجام شده نتایج رضایت بخشی ارائه کرده اند. به عنوان مثال یکی از جالب‌ترین مطالعات کار لین[۷۷] و ویولی[۷۸][۱۷] است. آن‌ها به بررسی اثر استفاده از نانوذراتی با اندازه غیر یکنواخت در یک محفظه عمودی پرداختند. این محققین اعلام کردند که اگر نسبت کوچکترین قطر به بزرگترین قطر را از ۰/۰۱ به ۰/۰۷ بیفزاییم، نرخ انتقال حرارت افزایش می‌یابد. همچنین با تفصیل بیشتر گفتند که این اثر با افزایش دما بیشتر می‌شود.

موضوع جالب این است که فرض تک-فاز بودن نانوسیالات در هندسه‌های پیچیده حاوی نانوسیال هم بکار رفته است. برای مثال وَجها[۷۹] و همکاران[۱۰] این فرض را برای مدلسازی نانوذرات اکسید آلومینیوم[۸۰] و اکسید مس[۸۱] در مخلوط آب و اتیلن گلیکول[۸۲] در یک خنک کننده اتومبیل[۸۳] با استفاده از نرم‌افزار تجاری فلوئنت[۸۴] مورد استفاده قرار دادند. نتایج این کار انحراف ناچیزی با نتایج تئوری دارد و افزایش توان حرارتی و البته نیاز به قدرت پمپ کردن بیشتر را هنگام استفاده از نانوسیال نسبت به سیال معمولی نشان می‌دهند. در حالت کلی می‌توان گفت که اگرچه نانوسیالات ماهیت دو-فازی دارند ولی به جز در برخی موارد خاص می‌توان فرض کرد که رفتاری مانند

---

۶۵ Incompressible flow
۶۶ Newtonian behavior
۶۷ Steady-state
۶۸ Boussinesq approximation
۶۹ Ding
۷۰ Wen
۷۱ Peclet number
۷۲ Concentration
۷۳ Peclet number
۷۴ Homogenous flow assumption

۷۵ Dispersion
۷۶ Dispersion thermal conductivity
۷۷ Lin
۷۸ Violi
۷۹ Vajjha
۸۰ Al2O3
۸۱ CuO
۸۲ Ethylene glycol
۸۳ Automobile radiator
۸۴ Fluent



شکل ۴: مقایسه عدد ناسلت حاصل از روش‌های مختلف عددی و نتایج آزمایشگاهی[۱۸]

سیالات معمولی دارند. پس می‌توان معادلات بقا را مانند سیالات معمولی نوشت و خواص فیزیکی نانوسیال را در حل آن معادلات وارد نمود.

مدلسازی دو-فازی

برخی از محققین حل عددی نانوسیالات، با تکیه بر این عقیده که احتمال دارد سرعت نسبی میان نانوذرات و سیال پایه صفر نباشد، تلاش خود را در یافتن راهی برای بیان دو-فازی نانوسیالات متمرکز کرده‌اند. بهزادمهر و همکاران[۱۸] برای اولین بار از یک مدل مخلوط دو-فازی[۸۵] برای مدلسازی نانوسیالات استفاده نمودند. آن‌ها سرعت جریان نانوسیال آب-مس[۸۶] را در یک لوله مدل نموده و نتایج خود را با مدل‌های تک-فاز گذشته و همچنین نتایج آزمایشگاهی مقایسه نمودند. آن‌ها مفصلاً توضیح دادند که فرض رفتار جداگانه نانوذرات وسیال پایه می‌تواند به پاسخ‌های بسیار دقیق‌تری نسبت به سایر روش‌های قبلی به کار رفته در مدلسازی نانوسیالات منجر شود. این محققین که در مطالعه خود از تئوری مخلوط[۸۷] استفاده نمودند، پیشنهاد کردند که بهتر است معادلات اندازه حرکت و انرژی را برای مخلوطی از فاز سیال و فاز جامد بنویسیم. البته این مدل بر فرض‌هایی هم تکیه دارد. مثلاً فرض می‌کنیم که یک جفت شدگی[۸۸] قوی میان دو فاز برقرار است و همچنین ذرات فاز جامد، فاز سیال را با اختلاف سرعتی که سرعت لغزشی[۸۹] نانوذرات نامیده می‌شود دنبال می‌کنند. رابطه(۱۱) سرعت لغزشی نانوذرات را نشان می‌دهد:

$$V_{pf} = V_p - V_f = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_f f_{drag}} \frac{(\rho_p - \rho_m)}{\rho_p} a \qquad (۱۱)$$

در شکل۴ مقایسه میان مدل مخلوط دو-فازی و مدلی تک-فاز و یک کارآزمایشگاهی برای همان نانوسیال آب-مس با غلظت ۰/۰۱ نشان داده شده‌است. در این شکل دقت بیشتر مدل دو-فازی به وضوح دیده می‌شود.

در کار دیگری کالته[۹۰] و همکاران[۱۹] جهت مدلسازی جریان نانوسیال آب-مس در ریزمجرا[۹۱]، از یک مدل دو-فازی اویلری[۹۲] استفاده نمودند. به عبارت دیگر برای بیان جریان نانوسیالات از شکل اویلری معادلات بقا که بهره گرفتند. پاسخ‌های آن‌ها نسبت به مدل‌های تک-فاز دقیق تر بوده و ضریب انتقال حرارت بزرگتری را نشان می‌داد. بطور کلی می‌توان گفت که مدل‌های دو-فاز به هر شکلی که باشند، نسبت به مدل‌های تک-فازی ابزار قدرتمندتری در مدلسازی نانوسیالات هستند.

تلاش‌های بسیاری برای سنجش توانایی مدل‌های عددی صورت گرفته‌است. اهمیت این مطالعات در این است که به ما در انتخاب بهترین مدل کمک می‌کنند. یکی از جالب ترین مقالات به این سبک، کار لطفی و همکاران[۲۰] است. آن‌ها برای مقایسه مدلی تک-فاز و دو مدل دو-فازی مخلوط و اویلری، تمام این مدل‌ها را در مدلسازی جابجایی اجباری درون لوله عمودی به کار بردند. این تحقیق نشان داد که مدل مخلوط از دقت بالاتری نسبت به دو مدل دیگر برخوردار است. در انتها طبق آنچه تا کنون گفته شد، نتیجه می‌گیریم که در مدلسازی عددی رفتار نانوسیالات بهتر است که از مدل‌های دوفازی استفاده نماییم.

روش شبکه بولتزمن

اخیراً علاوه بر روش‌های معمول مکانیک سیالات عددی برای پیشگویی رفتار حرارتی نانوسیالات روش‌های جدیدی هم معرفی و به کار گرفته شده است. استفاده از روش‌های جدید علاوه بر اینکه می‌تواند به توسعه این روش‌ها منجر شود، قدرت انتخاب بیشتری به محققین می‌دهد. یکی از این روش‌های غیر متداول که نسبت به بقیه پیشرفت بیشتری داشته و در حوزه‌های بیشتری مورد استفاده قرار گرفته، روش شبکه بولتزمن است. این روش مسائل را با دیدگاهی مابین دیدگاه میکروسکوپیک[۹۳] و ماکروسکوپیک[۹۴] مورد بررسی قرار می‌دهد. در واقع معادلات بقا را با فرض اینکه ذرات به صورت مزوسکوپیک[۹۵] در شبکه[۹۶] قرار گرفته باشند حل می‌کند. به این ترتیب که توزیع ذرات را با کمک یک تابع توزیع چگالی[۹۷] بیان

---

[۸۵] Two-phase mixture model
[۸۶] Cu-water
[۸۷] Mixture theory
[۸۸] Coupling
[۸۹] Slip velocity

[۹۰] Kalteh
[۹۱] Microchannel
[۹۲] Eulerian
[۹۳] Microscopic
[۹۴] Macroscopic
[۹۵] Mesoscopic
[۹۶] Lattice
[۹۷] Distribution density function

می‌کند و با استفاده از یک مدل برخورد ذرات[۹۸]، معادله بولتزمن[۹۹] را که در عمل شکل کلی‌تر معادلات نویر-استوکس[۱۰۰] هستند، حل می‌کند. در نهایت از روابطی خاص مقادیر ماکروسکوپیک سرعت و چگالی و دما بدست می‌آیند. در دو دهه اخیر، روش شبکه بولتزمن برای حل عددی بسیاری از مسایل حرارتی و جریان سیال مورد استفاده قرار گرفته است. به علت سادگی خاص استفاده از آن در کنار دقت خوبی هم که دارد، این روش به روش مورد علاقه بسیاری از دانشمندان بدل شده است. البته لازم به ذکر است که مفاهیم پایه‌ای این روش بسیار دشوار بوده و تا این حد توسعه و ساده‌سازی این روش فقط به دست دانشمندان علم فیزیک صورت گرفته است.

برای اولین بار کفایتی و همکاران[۲۱] و لایی[۱۰۱] و یانگ[۱۰۲][۲۲] به طور جداگانه از روش شبکه بولتزمن جهت مدلسازی جابجایی طبیعی نانو سیالات در یک حفره[۱۰۳] استفاده نمودند. این تحقیقات نتایج قابل قبولی را در استفاده از روش شبکه بولتزمن جهت مدلسازی نانوسیالات نشان می‌دهند. در کار کفایتی هنگام استفاده از نانوسیال، افزایش زیاد ناسلت در رایلی 10^4-10^3 دیده می‌شود ولی در رایلی‌های بالاتر اثر استفاده از نانو سیال بر عدد ناسلت با شیب تندی کاهش می‌یابد. در کار دیگری لایی و یانگ[۲۳] به بررسی انتقال حرارت اجباری نانوسیال در ریزمجرا پرداختند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که ویسکوزیته بالای نانوسیال که ناشی از وجود نانوذرات است، تأثیری بر پروفیل سرعت[۱۰۴] ندارد. همچنین توزیع دما در نانوسیالات یکنواخت تر است. این نتایج کاملاً منطبق بر کارهای عددی گذشته هستند ولی این محققین به عنوان یک عیب روش شبکه بولتزمن از ناپایداری آن هنگام استفاده از شبکه درشت یاد کردند.

البته جهت رفع برخی از کاستی‌های روش شبکه بولتزمن تغییراتی هم در آن صورت گرفته است. مثلاً زو[۱۰۵] و همکاران[۲۴] برای مدلسازی جریان نانوسیال میان دو صفحه موازی محیط حل را به دو ناحیه با شبکه ریز و درشت تقسیم نمودند. نتایج آن‌ها علاوه بر پایداری بیشتر و اعتبار کافی حاکی از آن است که تقسیم شبکه در هر مسأله دیگری هم می‌تواند مفید واقع شود. در کار دیگری نبوی طباطبایی و همکاران[۲۵] برای مدلسازی جابجایی طبیعی نانوسیال در یک حفره مربعی از روش شبکه بولتزمن با زیرتخفیف چندگانه[۱۰۶] استفاده نمودند و ضمن اعتبارسنجی[۱۰۷] نتایج با کارهای قبلی اعلام کردند که این روش نسبت به روش شبکه بولتزمن با یک زیرتخفیف[۱۰۸]، از پایداری[۱۰۹] و دقت بیشتری برخوردار است.

مطالعات مذکور و همچنین بسیاری دیگر از مدلسازی‌های انجام شده با استفاده از روش شبکه بولتزمن از دقت قابل قبول نتایج این روش حکایت دارند. علاوه بر این شاید بتوان سادگی بی‌نظیر این روش را یکی از دلایل اصلی گرایش محققین به استفاده از این روش عنوان کرد. ولی در هر صورت جای خالی تحقیقی جامع برای بیان مزیت‌های این روش نسبت به سایر روش‌های عددی احساس می‌شود.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

با توجه به مطالب گفته شده، می‌توان روش‌های عددی مطالعه نانوسیالات را به ۳ گروه اصلی تقسیم نمود:

۱- مدلسازی تک-فازی

۲- مدلسازی دو-فازی

۳- مدلسازی به روش‌های نامتعارف (روش شبکه بولتزمن)

نتایج حاکی از آن است که گروه اول اگرچه ساده بوده و نتایج قابل قبولی داشته است ولی استفاده از روش‌های زیر مجموعه این گروه همواره با احتمال رسیدن به پاسخ‌های ضد و نقیض حتی بسیار گمراه کننده همراه است. تمام روش‌های زیر مجموعه گروه دوم از اعتبار بیشتری برخوردارند ولی در عین حال باید گفت که به کارگیری این روش‌ها نسبت به گروه اول بسیار دشوارتر است. سردسته گروه سوم روش شبکه بولتزمن بوده و کاربرد تک-فازی آن تفاوت چندانی با گروه اول ندارد جز اینکه کمی ساده‌تر است. مدل دو-فازی روش شبکه بولتزمن هم برای مدلسازی نانوسیالات معرفی شده است ولی این روش در ابتدا راه بوده و دارای ابهامات و نقایص بسیار است به همین دلیل استفاده از این روش به مبتدیان توصیه نمی‌شود. در نهایت به عنوان روشی قابل اعتماد استفاده از روش‌های گروه دوم را پیشنهاد می‌کنیم.

چشم انداز پایان‌نامه

با وجود اینکه روش شبکه بولتزمن پیشرفت و کاربرد بسیار زیادی در مدلسازی انواع پدیده‌های مهندسی داشته است ولی هنوز هم نقایص فراوانی در این روش دیده می‌شود. آینده این روش به مطالعاتی وابسته است که در جهت رفع این نقایص انجام شوند. سعی ما بر این است که با محوریت مدلسازی نانوسیالات تلاشی هم در جهت بهبود برخی از نقایص این روش داشته باشیم.

---

[۹۸] Collision

[۹۹] Boltzmann equation

[۱۰۰] Navier-stoks

[۱۰۱] Lai

[۱۰۲] Yang

[۱۰۳] Cavity

[۱۰۴] Velocity profile

[۱۰۵] Zhou

[۱۰۶] Multiple-relaxation times

[۱۰۷] Validation

[۱۰۸] Single-relaxation time

[۱۰۹] Stability

مراجع

مراجـــع از ورژن رایگـــان ســـمینار حـــذف شـــده اســـت.