

تصاویر رنگی کتاب

مکانیک سیالات در ابعاد میکرو و نانو

ویرایش دوم

دکتر احسان روحی گل ختمی
استاد دانشگاه ماساچوست امهرست

فهرست مطالب

- فصل ۱. مفاهیم جریان‌های میکرو و نانو ۳
- فصل ۲. مفاهیم بنیادی جریان‌های گازی در میکروکانال‌ها ۱۴
- فصل ۳. جریان رانده‌شده با گرادیان فشار ۲۱
- فصل ۴. جریان‌های رانده‌شده با گرادیان / اختلاف دما در میکروهندسه‌ها ۳۹
- فصل ۵. جریان کوئت و جریان فوریه ۶۶
- فصل ۶. کاربرد یادگیری ماشین در تحلیل جریان‌های میکرونانو ۷۵

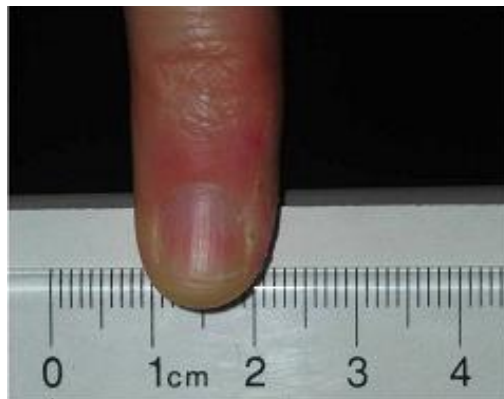
مفاهیم جریان‌های میکرو و نانو



أ. تصویری از فاصله بین دو نقطه در یک شهر که معرف بزرگای کیلومتر است.



ب. تصویری از ارتفاع قد کودکان معرف کاربرد محدوده متر است.



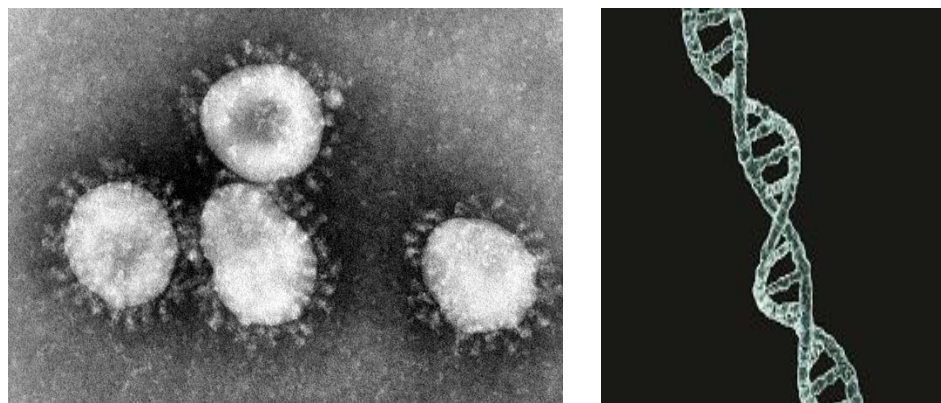
ج. تصویری از ابعاد جبه‌های قند که در بازه سانتی‌متر قرار دارند.



د. تصویری از سنگ ریزه‌ها که در محدوده میلی‌متر هستند.

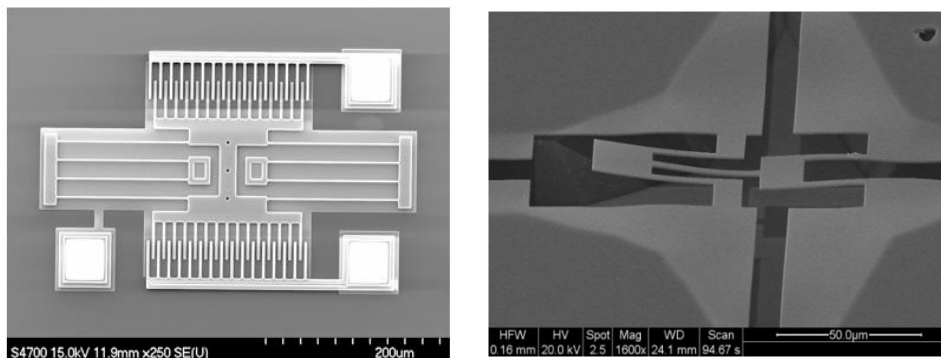


ه. نمای بزرگ‌شده از یک تار مو (۴۰-۵۰ میکرون) و ذرات گردوغبار (۴۰۰ میکرون) برای درک ابعاد میکرومتر

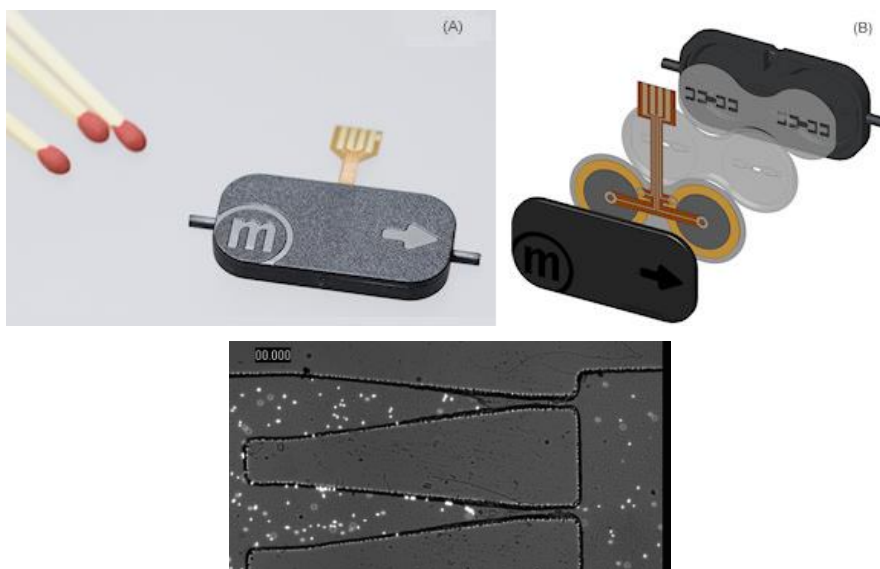


و. نمایی از DNA (۲,۵ نانومتر) و ویروس کرونا (قطر ویروس: ۶۰ تا ۱۴۰ نانومتر، طول شاخک ۹ تا ۱۲ نانومتر)

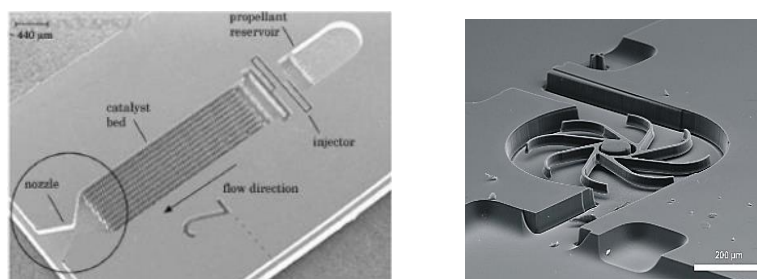
شکل ۱-۱ نمونه‌های عینی از واحدهای مختلف طول



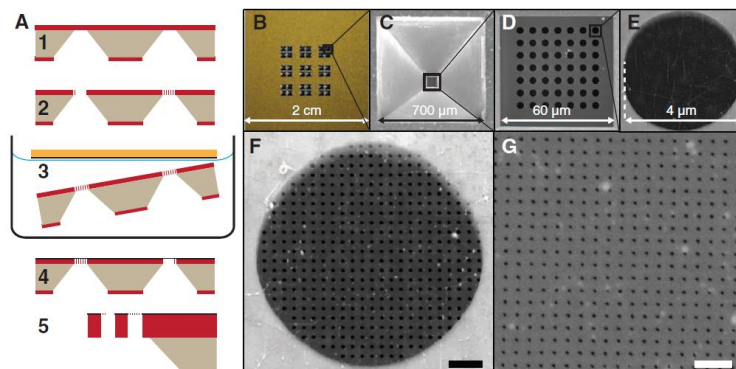
ا. سمت راست: میکرو سنسور، سمت چپ: عملگر میکرو



ب. نمونه از میکروپمپ‌ها و نازل دیفیوزرها در ابعاد کوچک

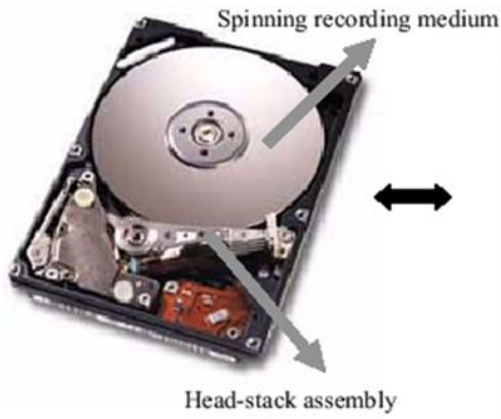


ج. نمونه‌ای از کاربرد میکروکانال‌ها با سطح متغیر: (سمت راست) میکروتوربین، (سمت چپ) میکرونازل [۲]



د. نانوفیلتر جهت جداسازی گاز در صنایع نفت و گاز

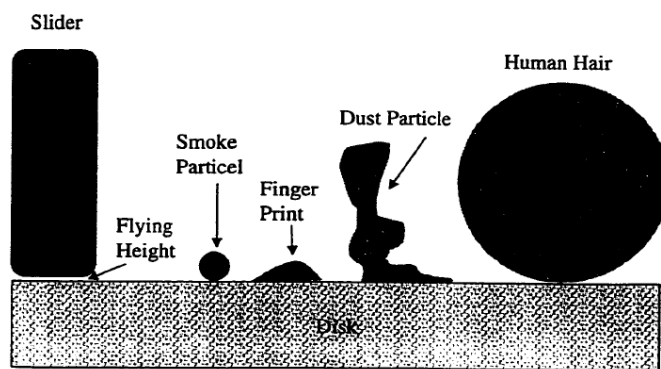
شکل ۱-۲ نمونه‌هایی از کاربردهای فناوری‌های میکرو و نانو [۳]



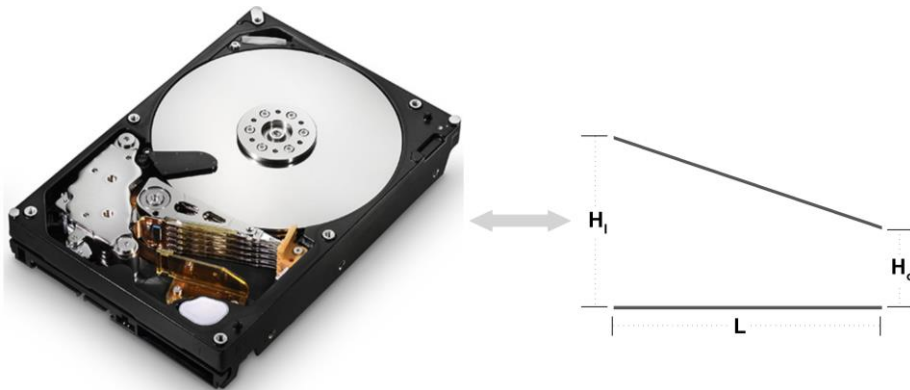
ب. لغزنده و دیسک به صورت مجزاً



أ. لغزنده و مرکز دیسک سخت

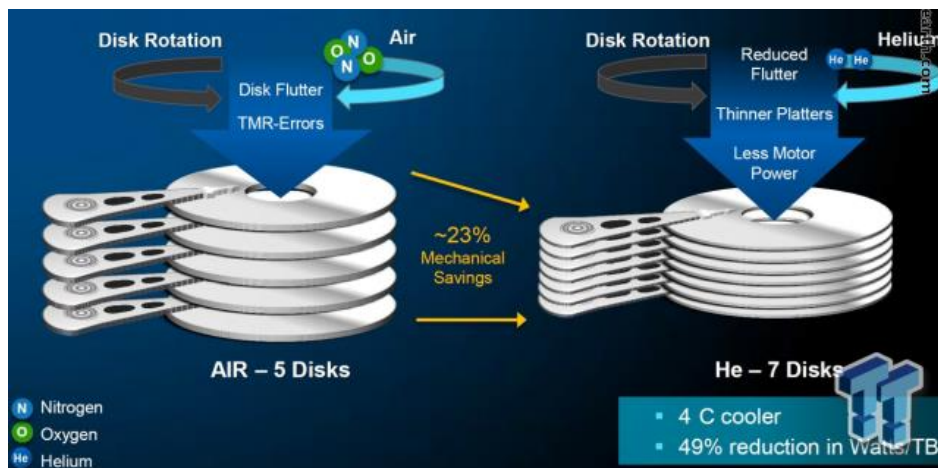


ج. مقایسه فاصله لغزنده و دیسک سخت با ضخامت موی انسان، ذره غبار، اثر انگشت و ذره دود

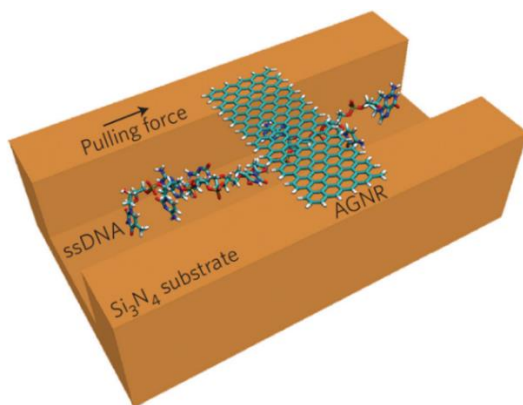


د. شباهت فضای بین لغزنده و دیسک با یک کانال

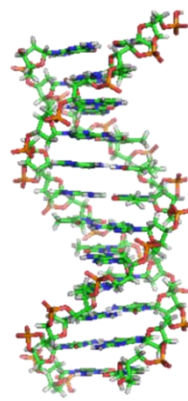
شکل ۱-۳ دیسک سخت



شکل ۴-۱ مقایسه تأثیر استفاده از هلیوم و هوا در فضای بین دیسک‌های سخت

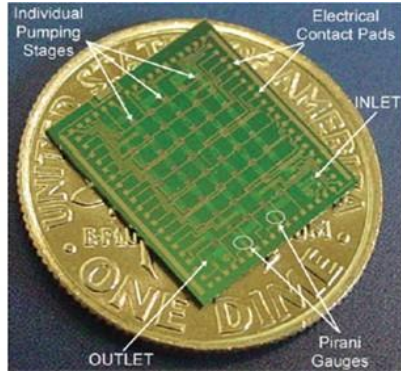


ب. ابزار آز- تراشه برای تغییر توالی DNA

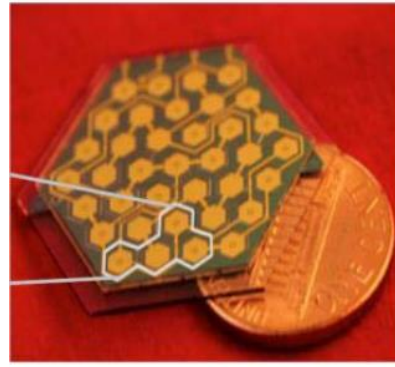


ا. DNA

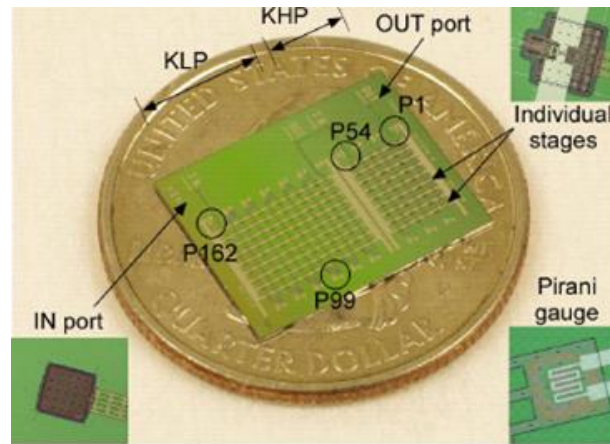
شکل ۵-۱ تغییر توالی DNA [۴]



ب. پمپ خلأ ۴۸ مرحله‌ای (۲۰۱۲)

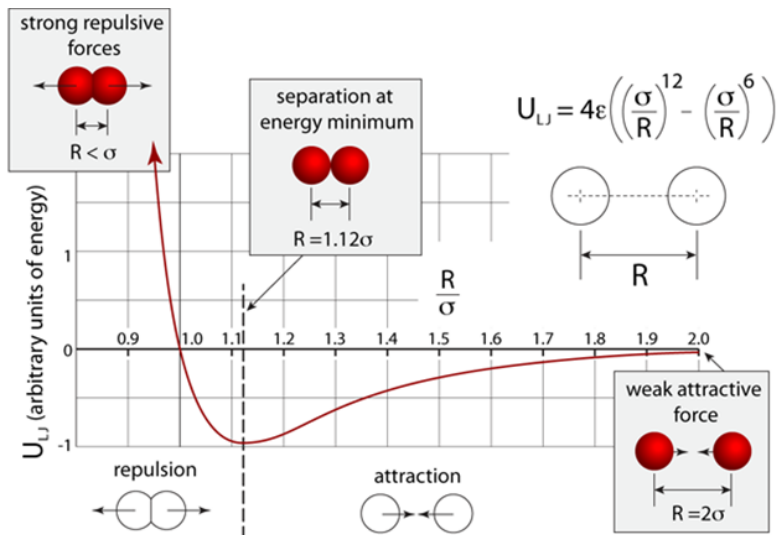


ا. پمپ خلأ ۲۴ مرحله‌ای (۲۰۱۲)

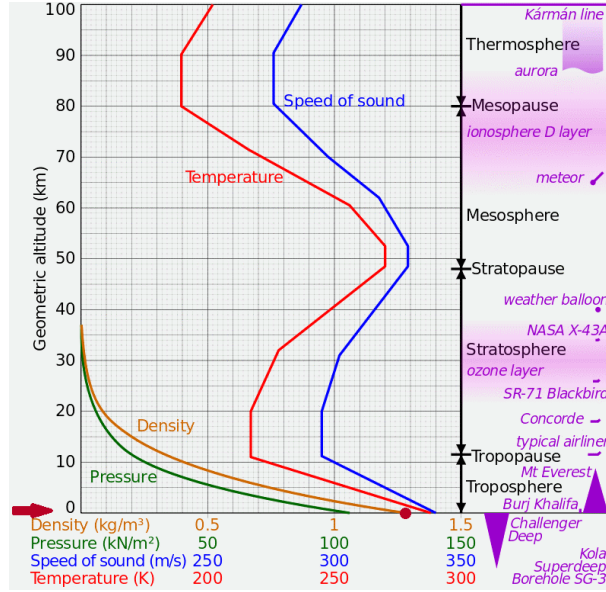


ج. پمپ خلأ ۱۶۲ مرحله‌ای (۲۰۱۴)

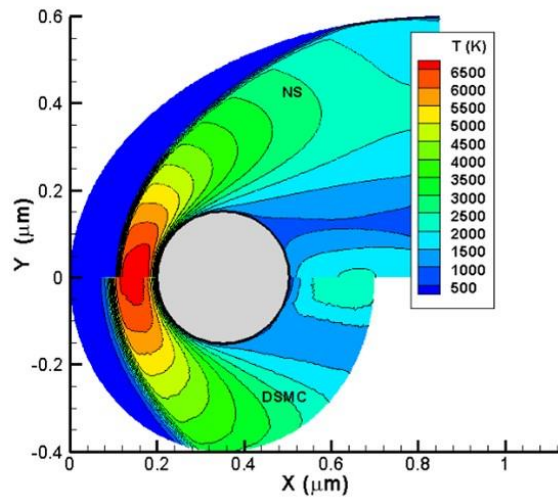
شکل ۶-۱ مراحل تکامل ساخت آز- تراشه‌های پمپ‌های خلأ در مدت ۲ سال [۵-۷]



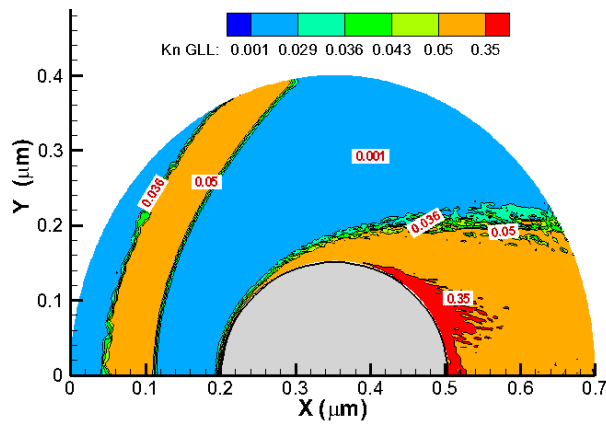
شکل ۸-۱ توزیع پتانسیل لنارد- جونز برحسب فاصله بین مولکولی



شکل ۹-۱ تأثیر افزایش ارتفاع بر دما، چگالی، سرعت صوت و فشار

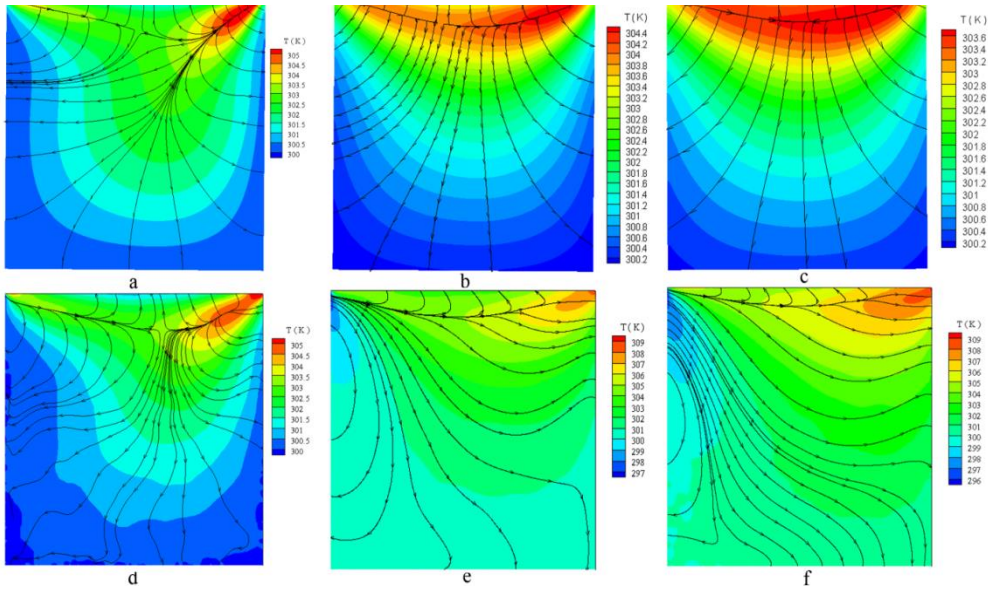


آ. کانتور دما از حل پیوسته (بالا) و حل مولکولی جریان حول میکرو-استوانه

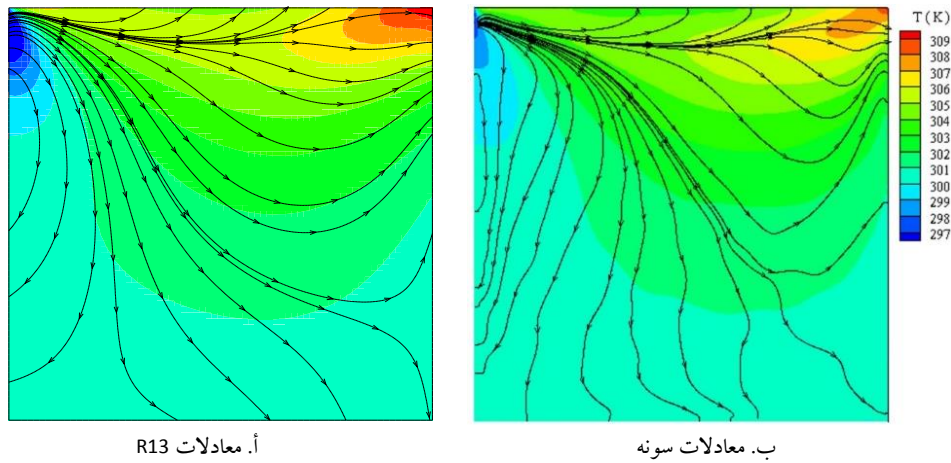


ب. کانتور عدد نودسن طول-گرادسانی حول میکرو-استوانه

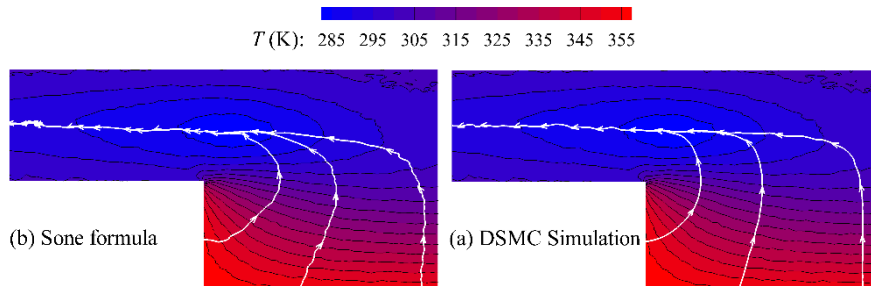
شکل ۱۴-۱ جریان حول میکرو-استوانه [۱۳]



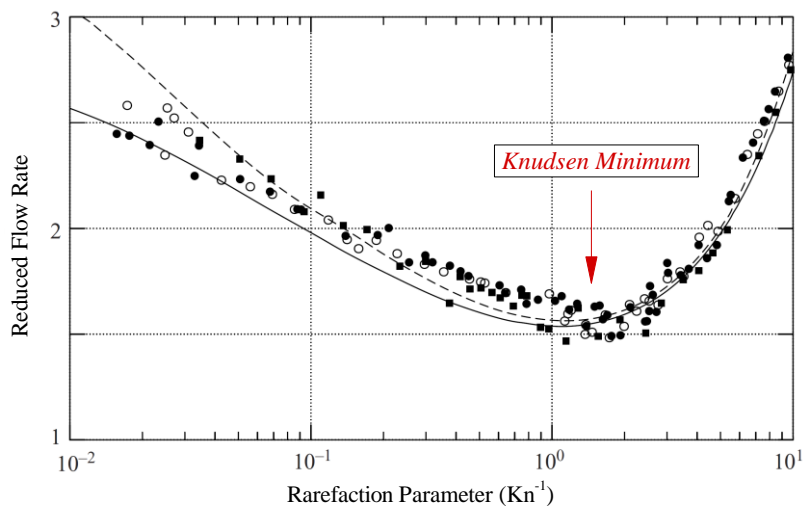
شکل ۱۷-۱ مقایسه نتایج حل ناویر-استوکس (ردیف بالا) و حل DSMC (ردیف پایین) در مسئله کاویتی با سرعت دیواره بالایی ۱۰۰ متر بر ثانیه، کانتورهای دما با خطوط شار حرارت جریان در سه عدد نودسن، ۰/۰۰۵ (سمت چپ) و ۰/۰۵ (وسط)، ۰/۱ (سمت راست) [۱۴]



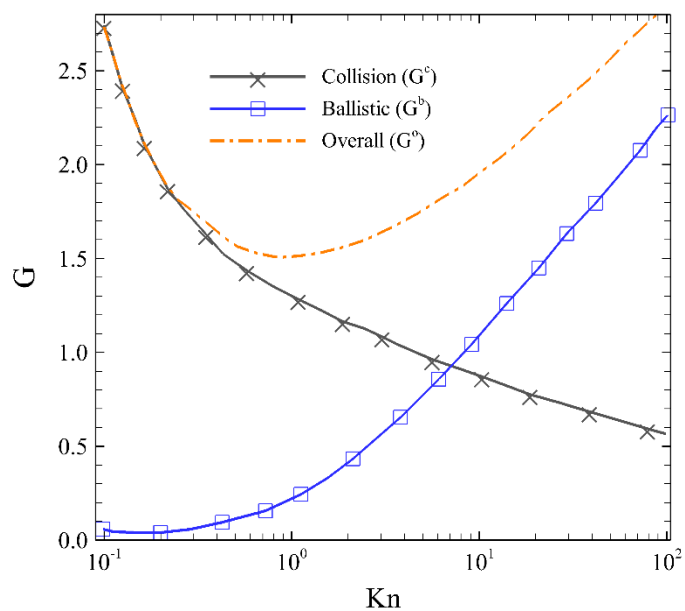
شکل ۱۸-۱ کانتور دما و خطوط شار حرارتی ثابت در مسئله کاویتی در عدد نودسن (۰/۰۵) [۱۴]



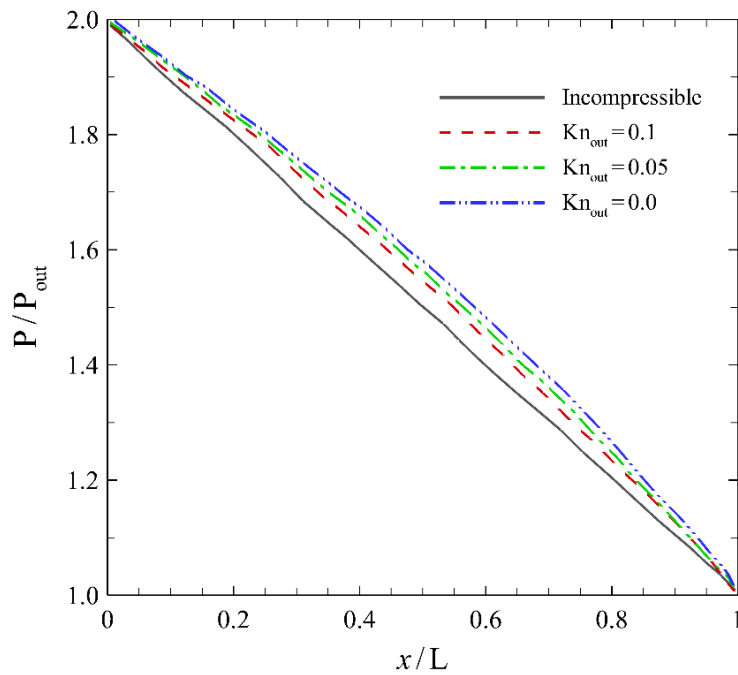
شکل ۱۹-۱ خطوط شار حرارتی و میدان دما برای هندسه پله $T_{wall} = 360 \text{ K}$ ، $Kn = 0.01$ [۱۵]



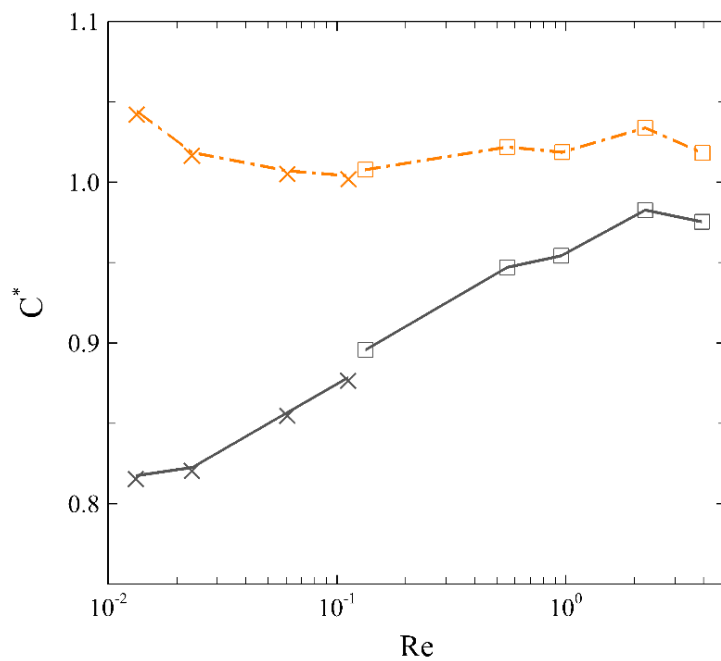
شکل ۱-۲۰ وقوع پدیده کمیته نودسن در عدد نودسن حدود ۱ [۱۹]



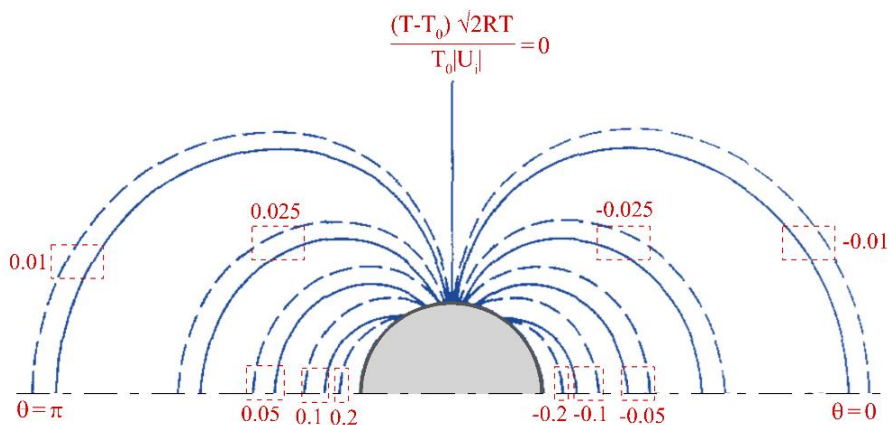
شکل ۱-۲۱ تجزیه دبی جریان به دبی مربوط به حرکت بدون برخورد و دبی مربوط به برخورد بین مولکولی [۲۰]



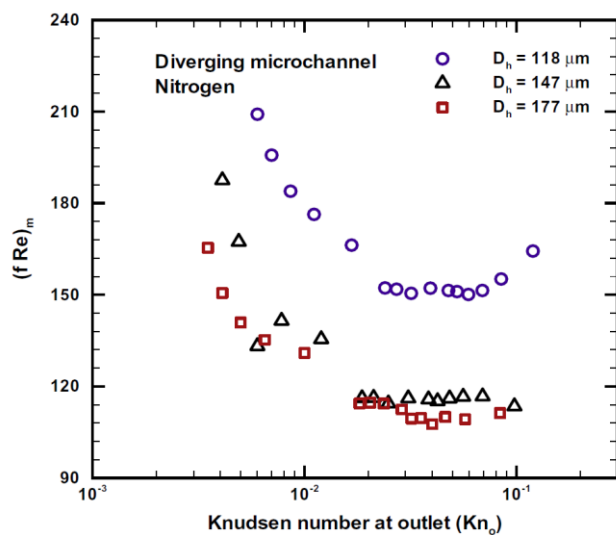
شکل ۲۲-۱ نمودار توزیع فشار داخل میکروکانال در اعداد نودسن مختلف [۲۱]



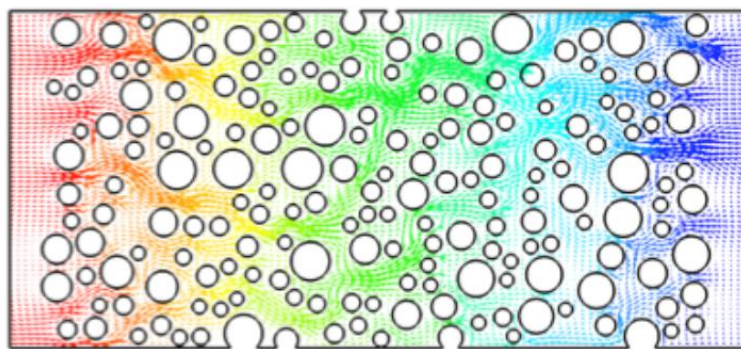
شکل ۲۳-۱ تغییرات عدد پوایزی در برابر عدد رینولدز. خط صلب متناظر با نرمال‌سازی بر اساس تئوری بدون لغزش و خط نقطه‌خطچین متناظر با تئوری لغزش است. در اینجا، مربع‌ها و علامت ضربدر به ترتیب نشان‌دهنده جریان‌های نیترژن و هلیوم هستند. [۸]



شکل ۲۴-۱ کانتورهای دمای بی‌بعد شده در اطراف یک کره هم‌دم در جریان مولکولی آزاد [۲۲]

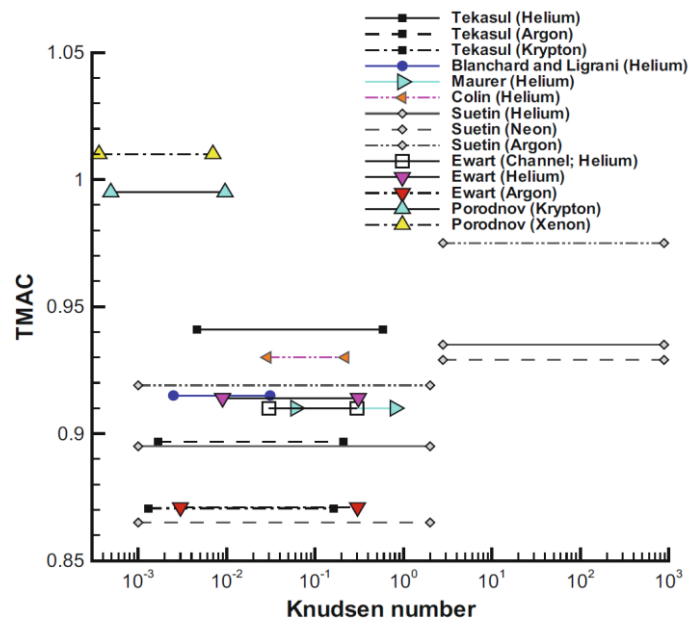


شکل ۲۶-۱ عدد پویایی در یک کانال واگرا برحسب عدد نودسن [۲۳]

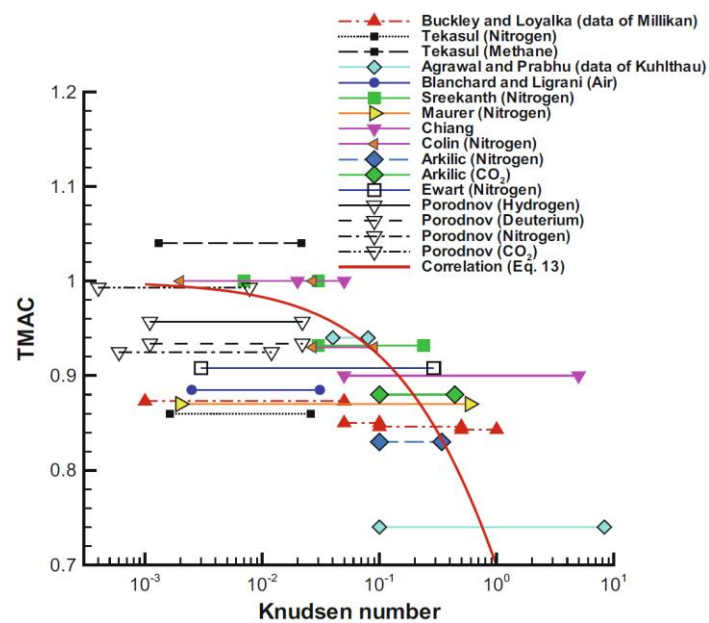


شکل ۲۷-۱ کانال متخلخل (حفره‌های سفید موانع در جریان هستند).

مفاهیم بنیادی جریان‌های گازی در میکروکانال‌ها

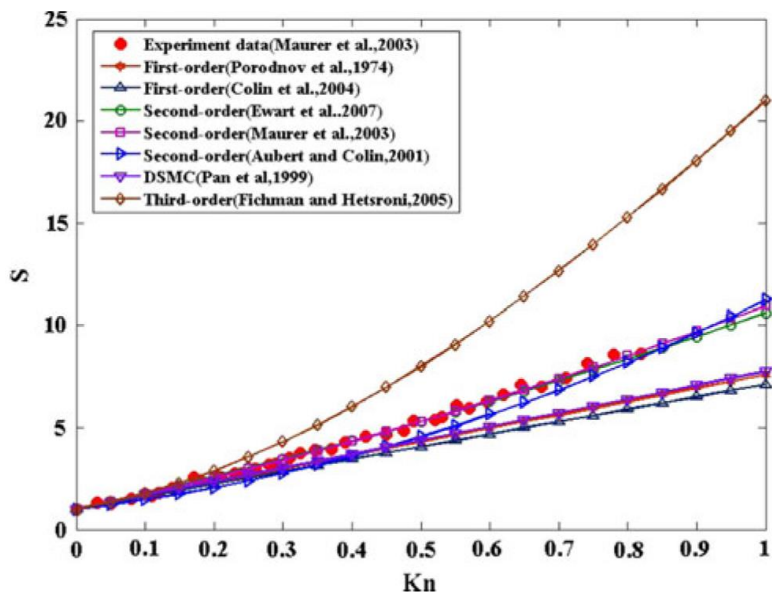


أ. گازهای تک‌گازی

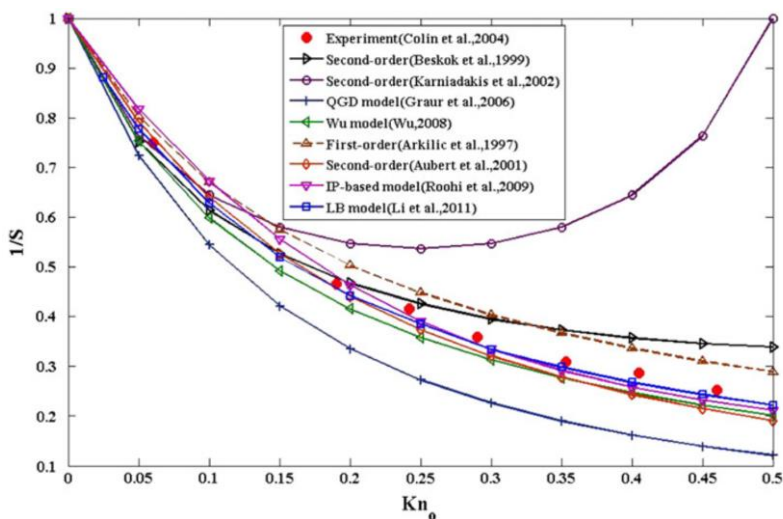


ب. گازهای چندگازی

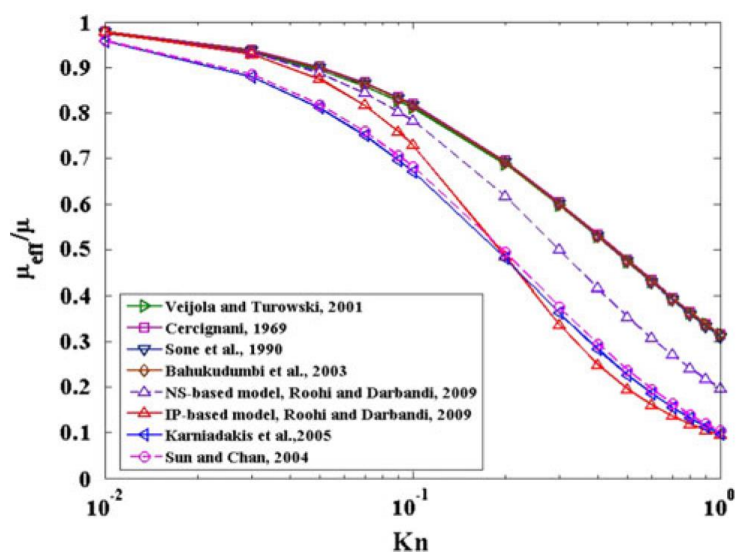
شکل ۲-۳ تغییرات ضریب تبادل ممنتوم مماسی مولکول و سطح (TMAC) برای سطوح و گازهای مختلف [۲]



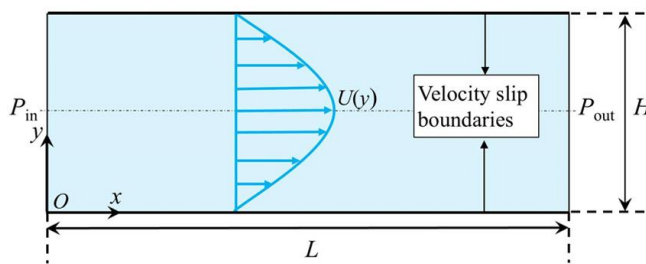
شکل ۷-۲ ضریب لغزش برحسب عدد نودسن از مدل‌های مختلف و نتایج تجربی [۳]



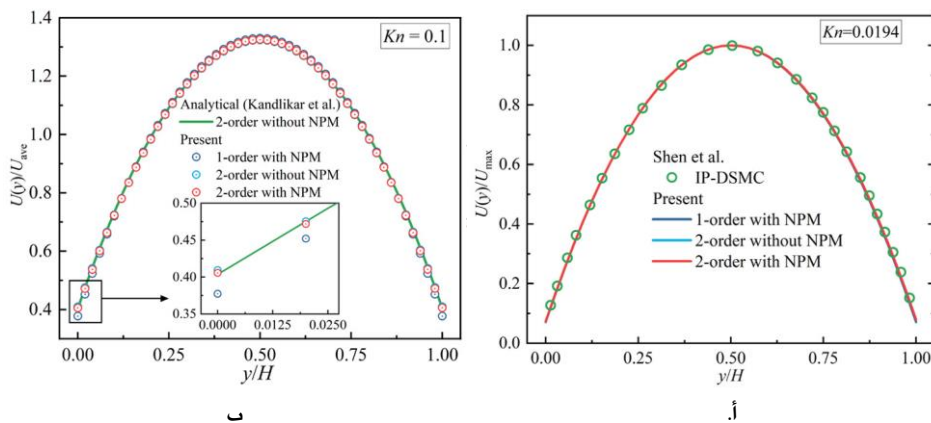
شکل ۸-۲ معکوس ضریب لغزش برحسب عدد نودسن، مقایسه نتایج تجربی و عددی مختلف [۳]



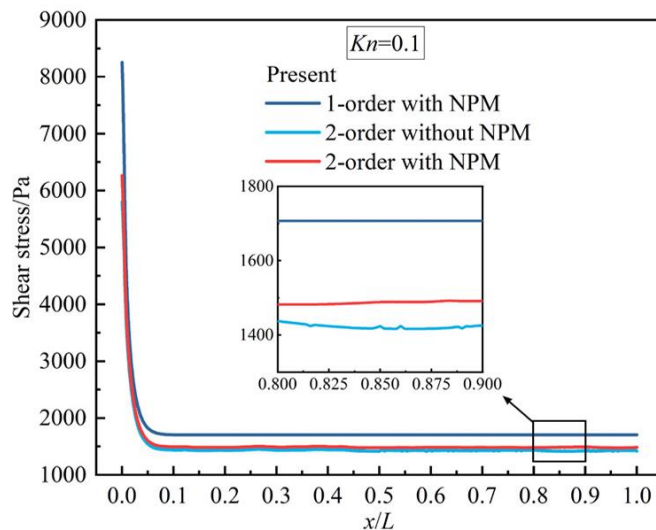
شکل ۹-۲ تغییرات لزجت مؤثر با عدد نودسن [۳]



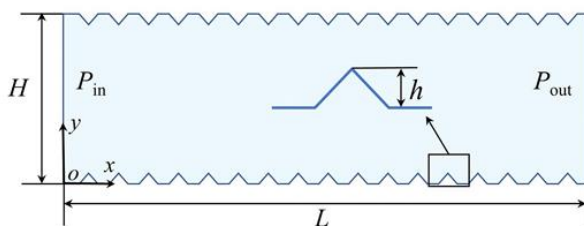
شکل ۲-۱۶ نمای شمایی میکروکانال



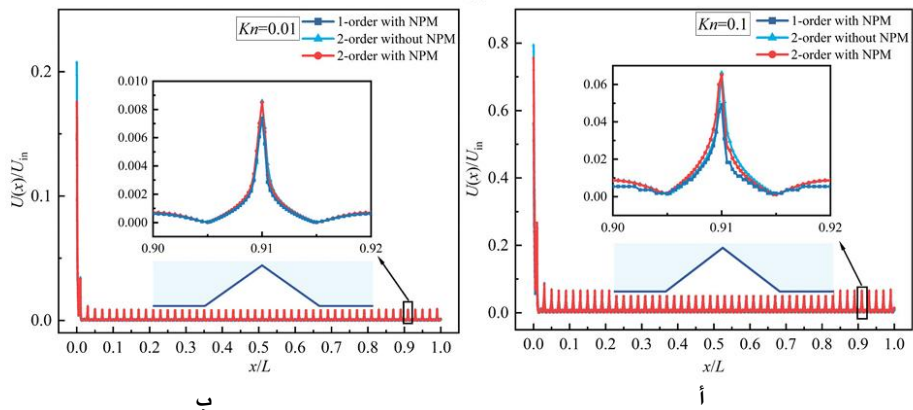
شکل ۲-۱۷ توزیع سرعت در راستای عمودی (y) بر حسب نسبت ارتفاع میکروکانال (H) در مقطع خروجی، ا. ب. Kn=0.1. ب. Kn=0.0194



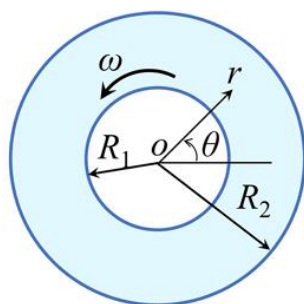
شکل ۲-۱۸ توزیع تنش برشی در راستای x بر حسب طول میکروکانال (L) در دیواره میکروکانال برای Kn=0.1



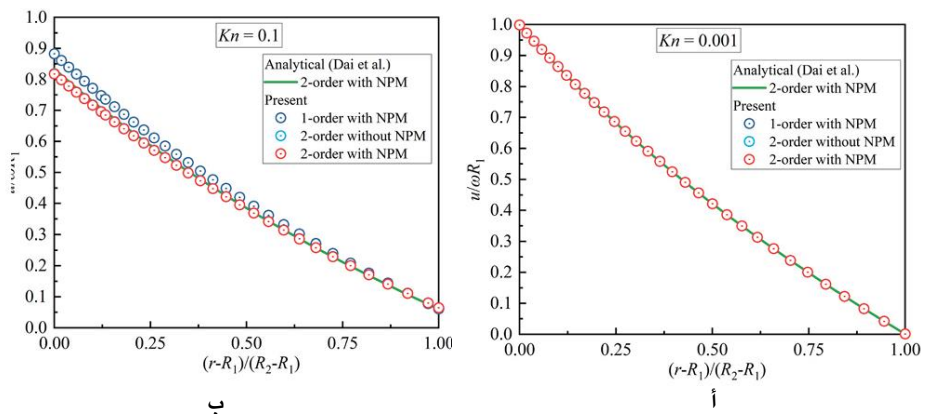
شکل ۲-۱۹ نمای شمایی میکروکانال غیرصفحه‌ای با برآمدگی‌های مثلثی



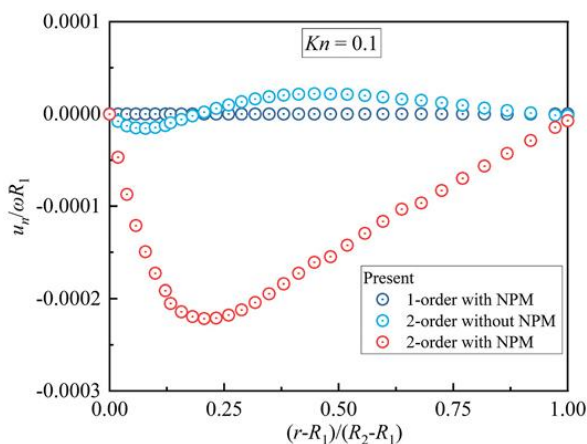
شکل ۲۰-۲ توزیع‌های سرعت در راستای افقی (x) بر حسب نسبت طول میکروکانال (L) در دیواره، ا. برای $Kn = 0.1$ ب. $Kn = 0.01$



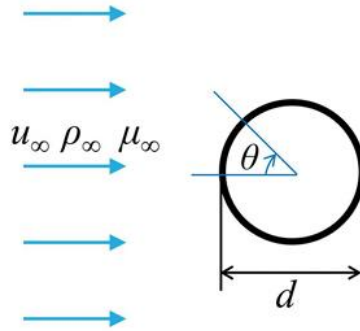
شکل ۲۱-۲ نمای شمایی جریان تیلور-کوئت بین دو استوانه متحدالمرکز



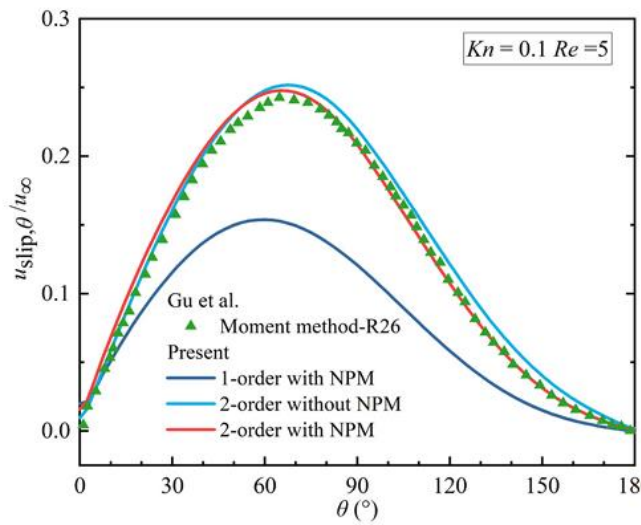
شکل ۲۲-۲ توزیع‌های سرعت در راستای شعاعی (r) پیش‌بینی‌شده توسط سه مدل لغزش سرعت و حل تحلیلی ا. $Kn=0.001$ ب. $Kn=0.1$



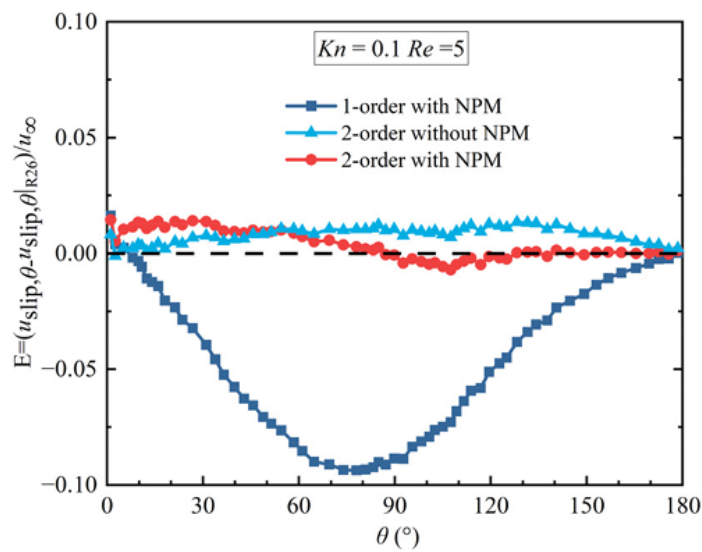
شکل ۲۳-۲ توزیع‌های سرعت عمودی در راستای شعاعی در $Kn=0.1$



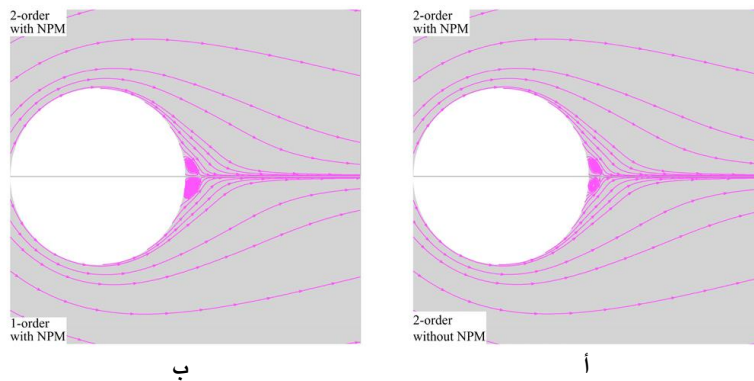
شکل ۲-۲۴ نمای شمایی شبیه‌سازی جریان گاز بر روی یک استوانه



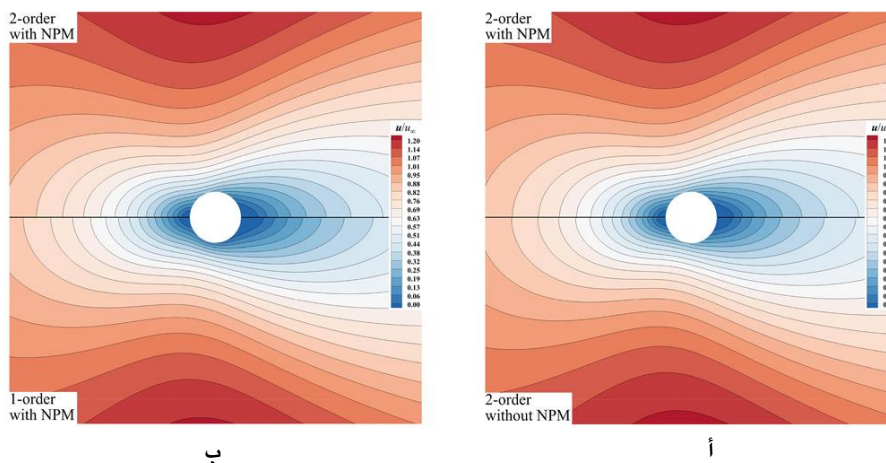
شکل ۲-۲۵ توزیع‌های لغزش سرعت موضعی بر روی سطح استوانه در زوایای مختلف برای $Kn=0.1$ و $Re=5$



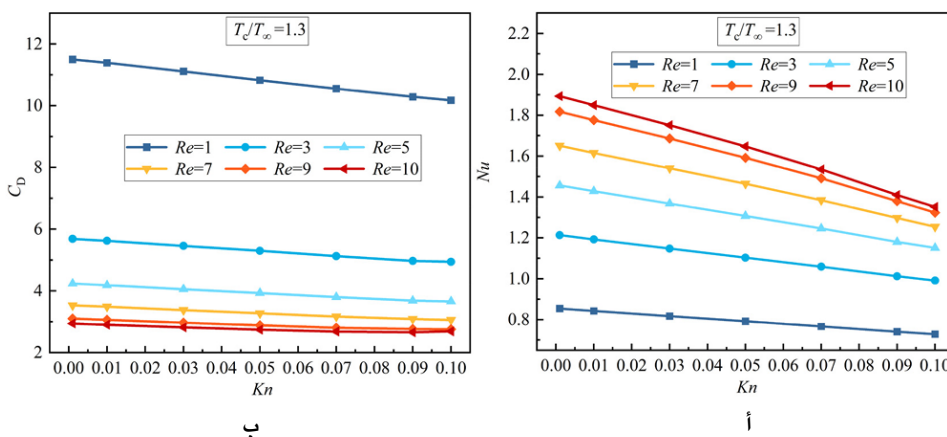
شکل ۲-۲۶ خطای توزیع لغزش سرعت موضعی بر روی سطح استوانه برای $Kn=0.1$ و $Re=5$



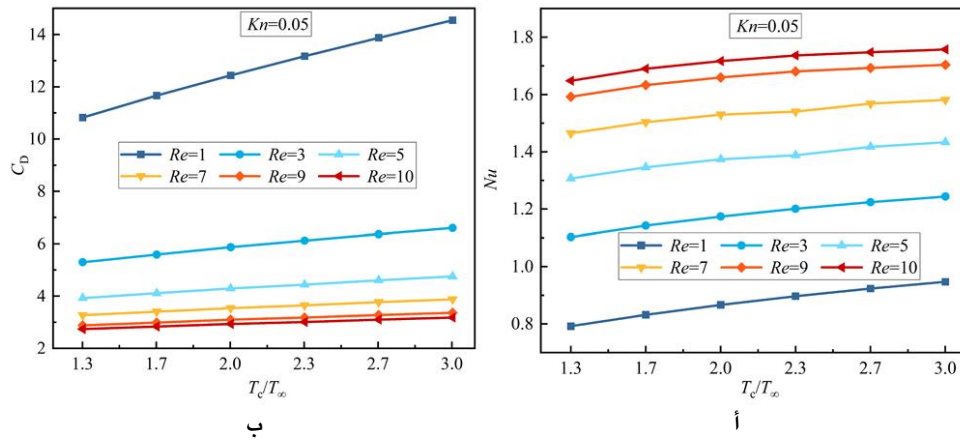
شکل ۲۷-۲. توزیع خطوط جریان در اطراف استوانه برای $Re=10$ و $Kn=0.01$. ا. مقایسه بین مدل لغزش مرتبه دوم با NPM و مدل لغزش مرتبه دوم بدون NPM؛ ب. مقایسه بین مدل لغزش مرتبه دوم با اصلاح غیرصفحه‌ای (NPM) و مدل لغزش مرتبه اول با NPM.



شکل ۲۸-۲. توزیع‌های سرعت در اطراف استوانه برای $Re=10$ و $Kn=0.1$. ا. مقایسه بین مدل لغزش مرتبه دوم با NPM و مدل لغزش مرتبه دوم بدون NPM؛ ب. مقایسه بین مدل لغزش مرتبه دوم با اصلاح غیرصفحه‌ای (NPM) و مدل لغزش مرتبه اول با NPM.

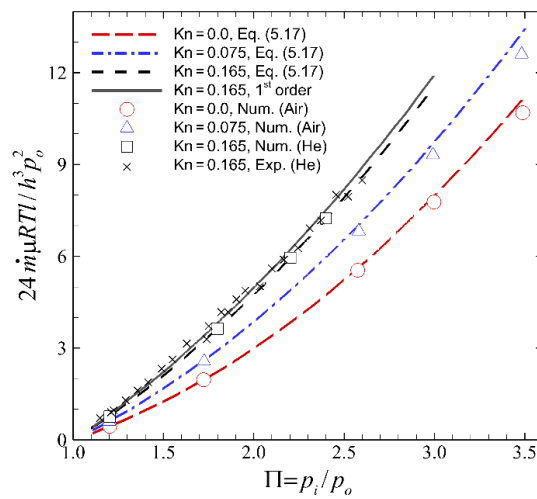


شکل ۲۹-۲. تأثیر عدد نودسن (Kn) و عدد رینولدز (Re) بر ا. عدد نوسلت و ب. ضریب پسا

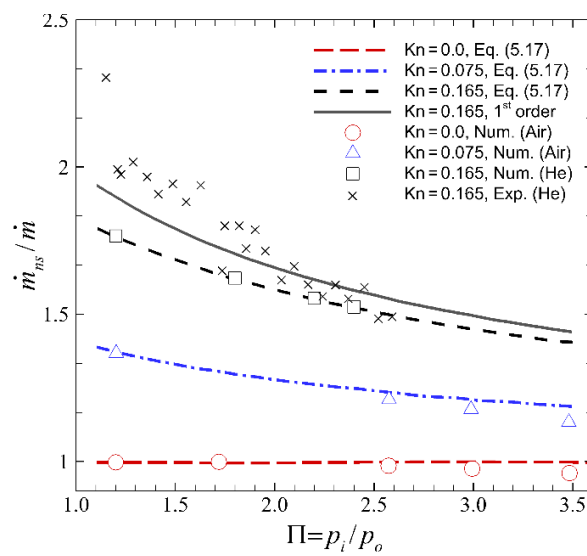


شکل ۲-۳۰ تأثیر نسبت دمای استوانه به گاز و عدد رینولدز (Re) بر: ا. عدد نوسلت و ب. ضریب پسا

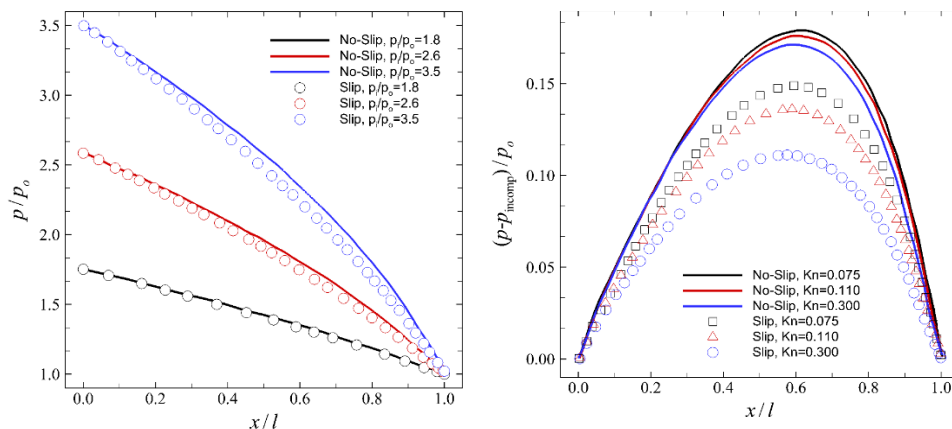
جریان رانده شده با گرادیان فشار



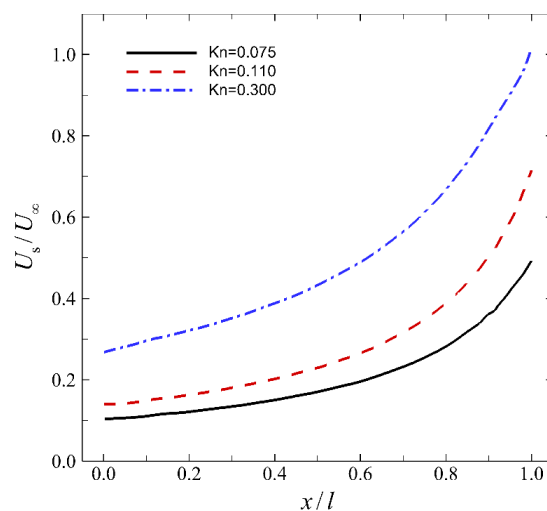
شکل ۲-۳ نمودار دبی برحسب نسبت فشار [۸]



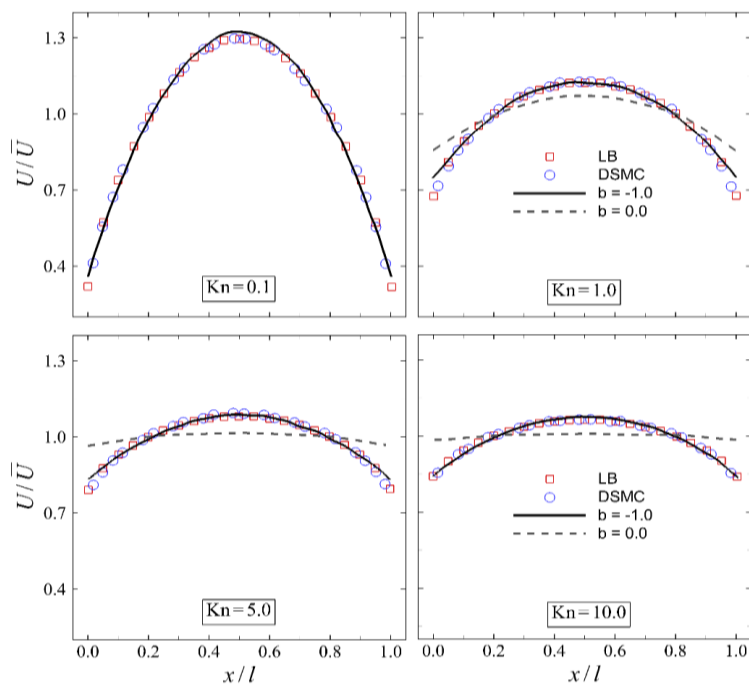
شکل ۳-۳ نمودار نسبت دبی به نسبت فشار [۸]



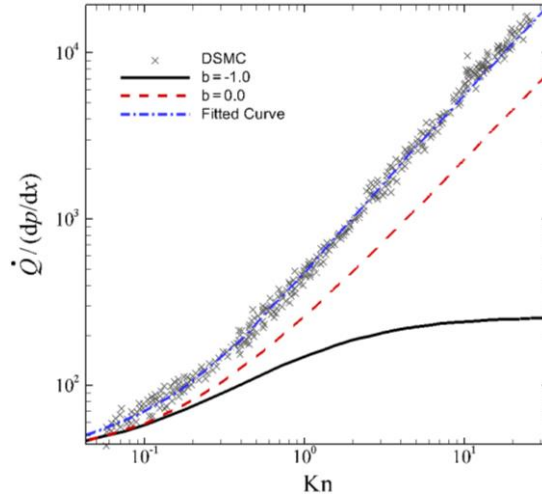
شکل ۳-۴ نمودار نسبت فشار و اختلاف فشار از فشار خطی برحسب طول کانال [۸]



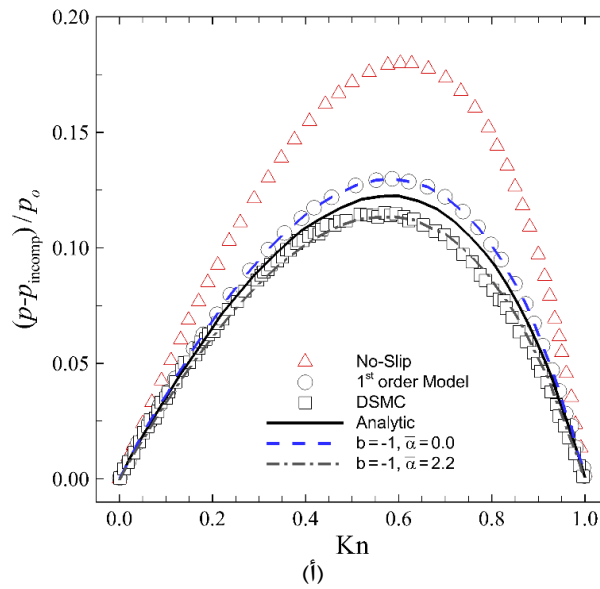
شکل ۳-۵ نمودار سرعت لغزش برحسب طول کانال [۸]



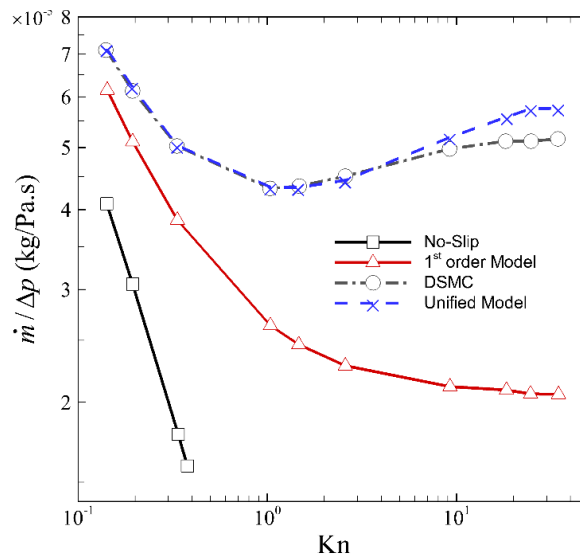
شکل ۳-۶ بررسی دقت مدل یکپارچه در پیش‌بینی نیم‌رخ سرعت در مقایسه با حل بولتزمن خطی شده و DSMC در اعداد نودسن مختلف [۸]



شکل ۳-۷ دبی حجمی برحسب عدد نودسن [۸]

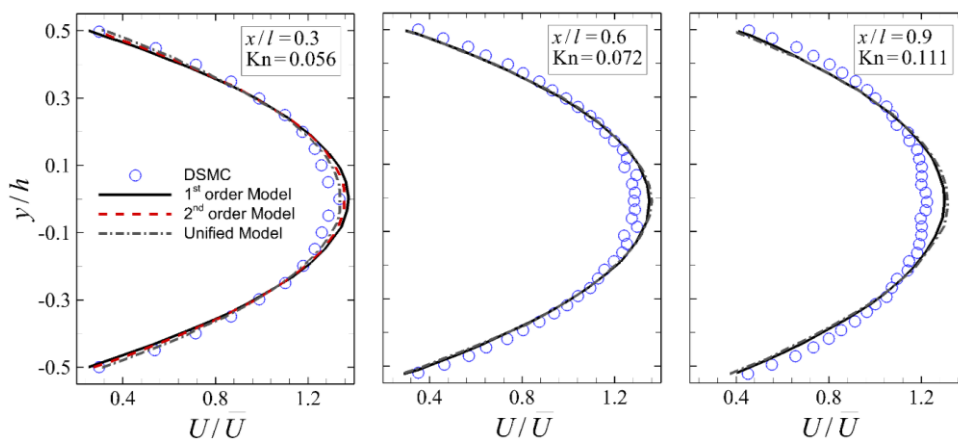


(ا)

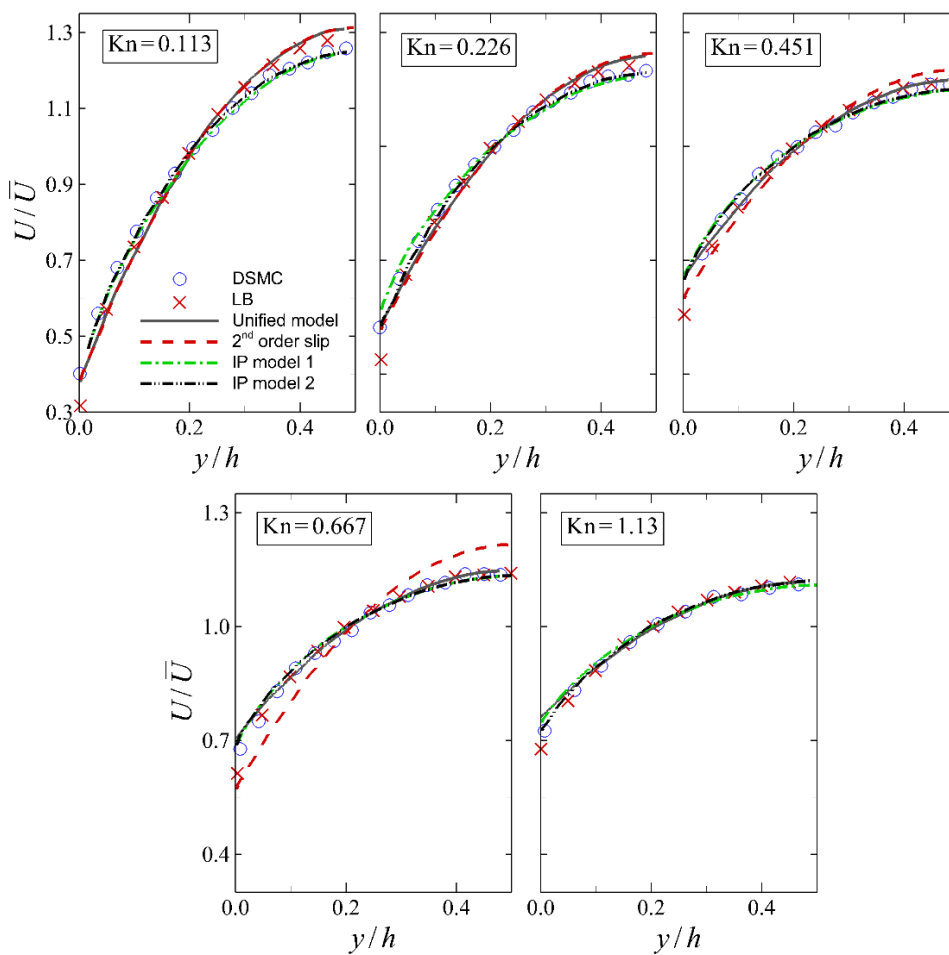


(ب)

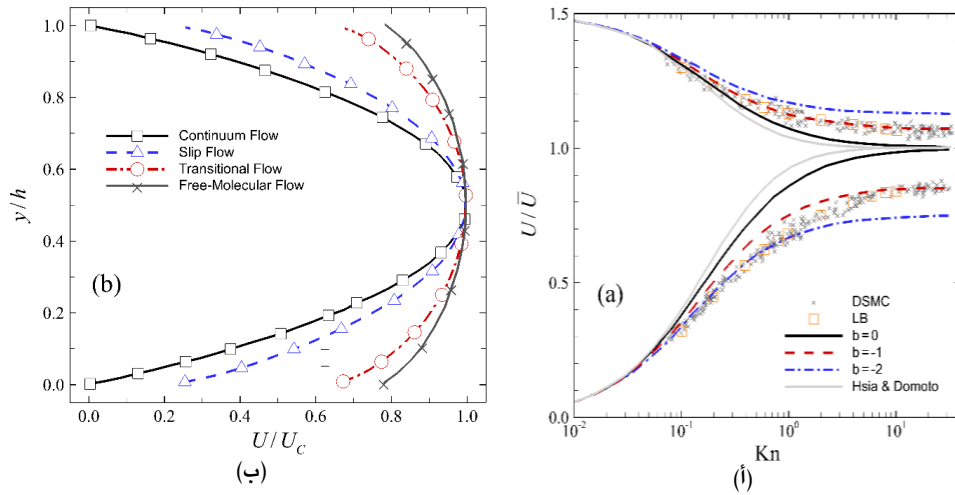
شکل ۳-۸. ا. اختلاف توزیع فشار از توزیع خطی از حل‌های تحلیلی و عددی معادله ناویر-استوکس و حل مولکولی، ب. دقت مدل‌های مختلف (بدون شرط مرزی لغزش، شرط مرزی مرتبه اول و مدل یکپارچه همراه با اصلاح لزجت) در پیش‌بینی دبی جرمی [۸]



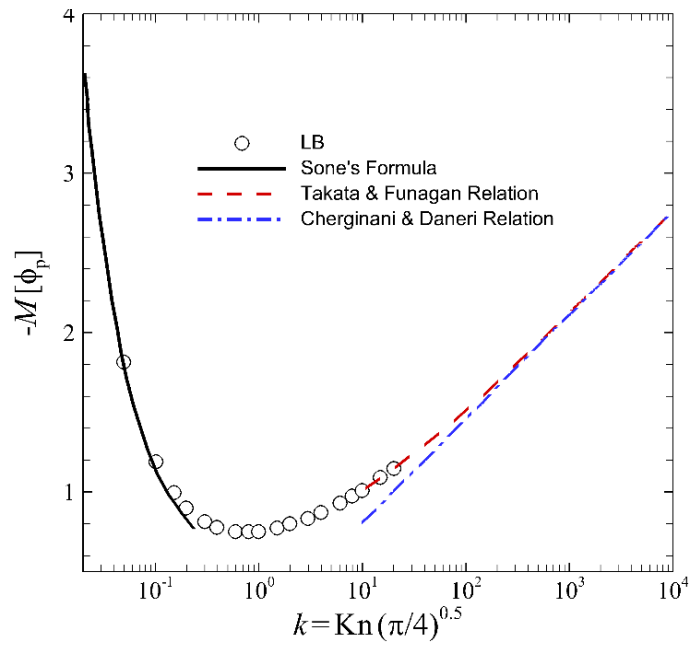
شکل ۹-۳ توزیع سرعت از حل مولکولی و تحلیلی در جریان میکروکانال [۸]



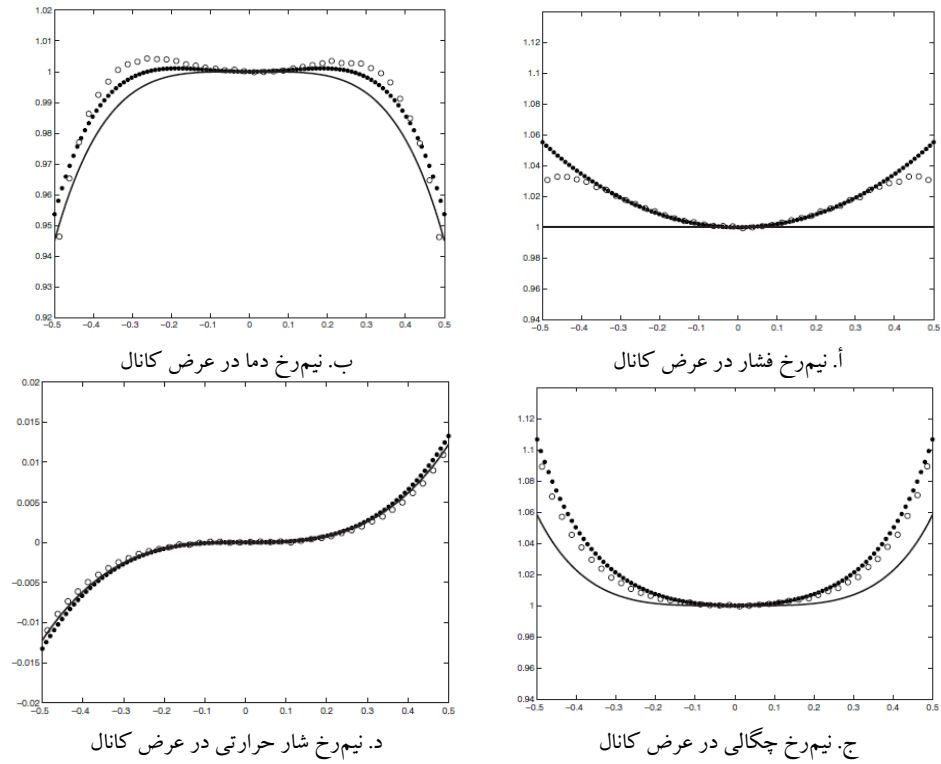
شکل ۱۰-۳ توزیع سرعت پیش‌بینی شده از مدل‌های تحلیلی مختلف و حل مولکولی [۲]



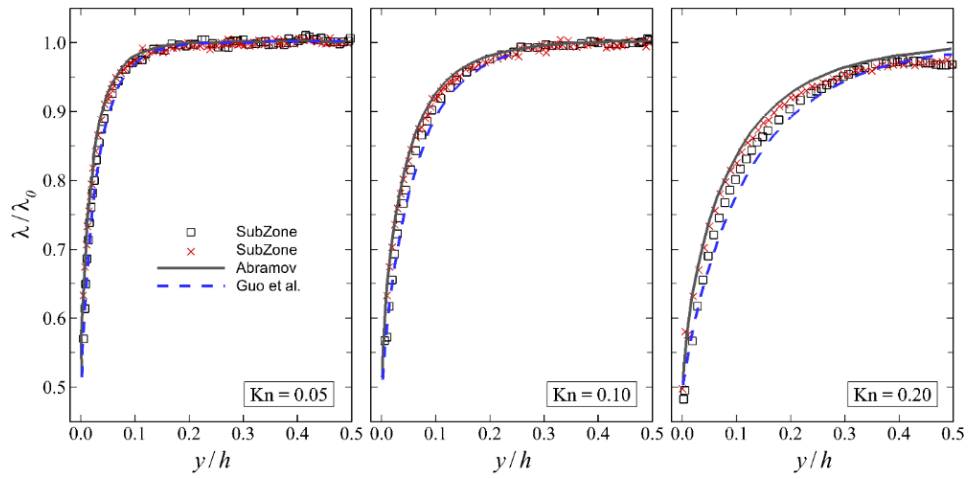
شکل ۳-۱۱. تغییرات سرعت لغزشی و سرعت در مرکز کانال برحسب عدد نودسن [۱]: ب. نیمرخ سرعت در جریان پوایی در رژیم‌های مختلف عدد نودسن (U_c سرعت در مرکز کانال است). [۳]



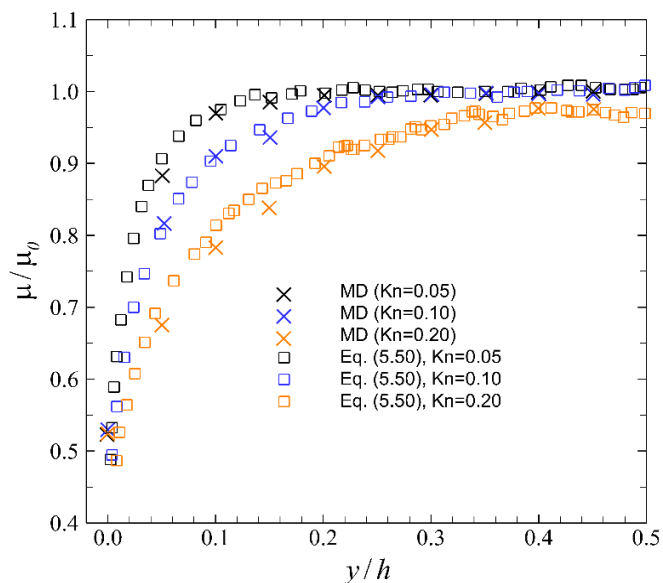
شکل ۳-۱۲. دبی جرمی جریان پوایی برحسب عدد k [۸]



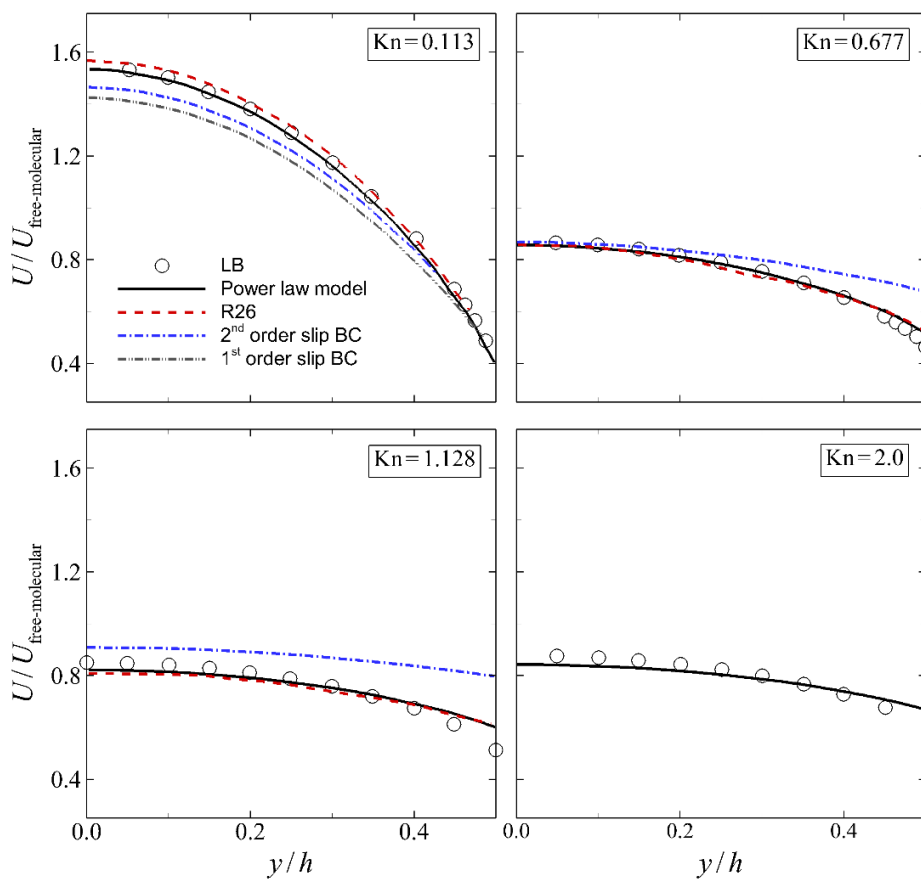
شکل ۳-۱۳ نیم‌رخ‌های بی‌بعد فشار و دما در جریان پوایزی غیر هم‌دما، (محور افقی عرض بی‌بعد کانال است) خط صلب: حل ناویر-استوکس، دایره توخالی: حل DSMC، دایره پر: حل روش NCCR [۹]



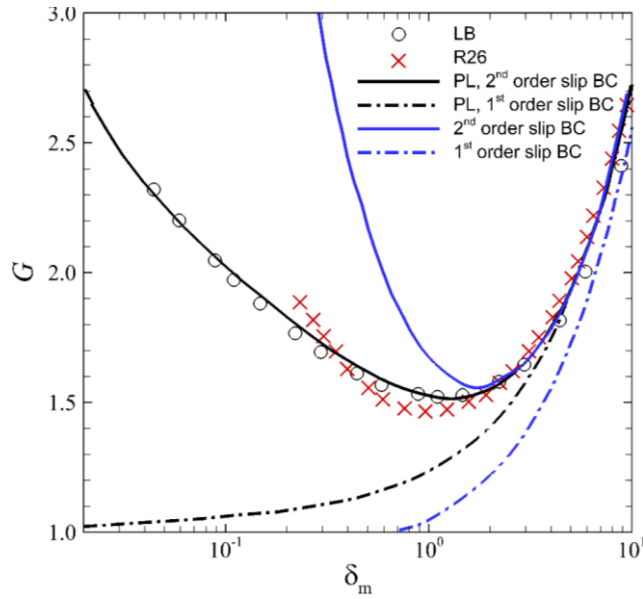
شکل ۳-۱۴ تغییرات مکانی طول پویش آزاد مولکولی [۱۰]



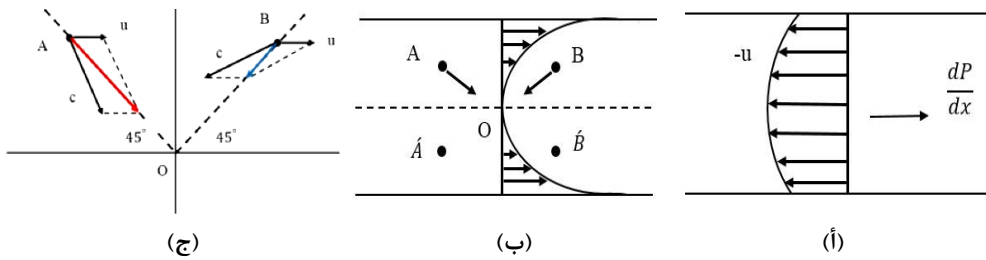
شکل ۳-۱۵ توزیع نسبت ضریب لزجت گاز در مجاورت دیواره [۱۰]



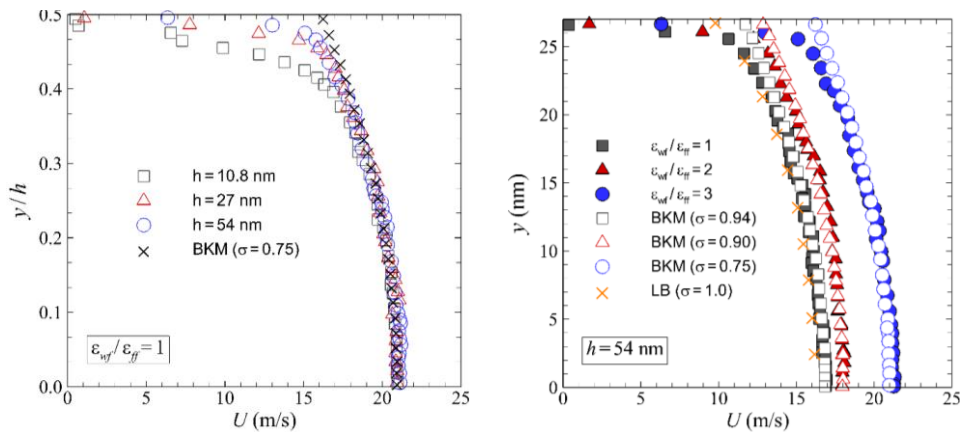
شکل ۳-۱۷ مقایسه سرعت بی بعد شده در یک کانال در اعداد نودسن مختلف، حل بولتزمن خطی شده، مدل قانون توانی، معادلات R26، معادلات ناویر-استوکس با شرط مرزی مرتبه اول و دوم [۱۴]



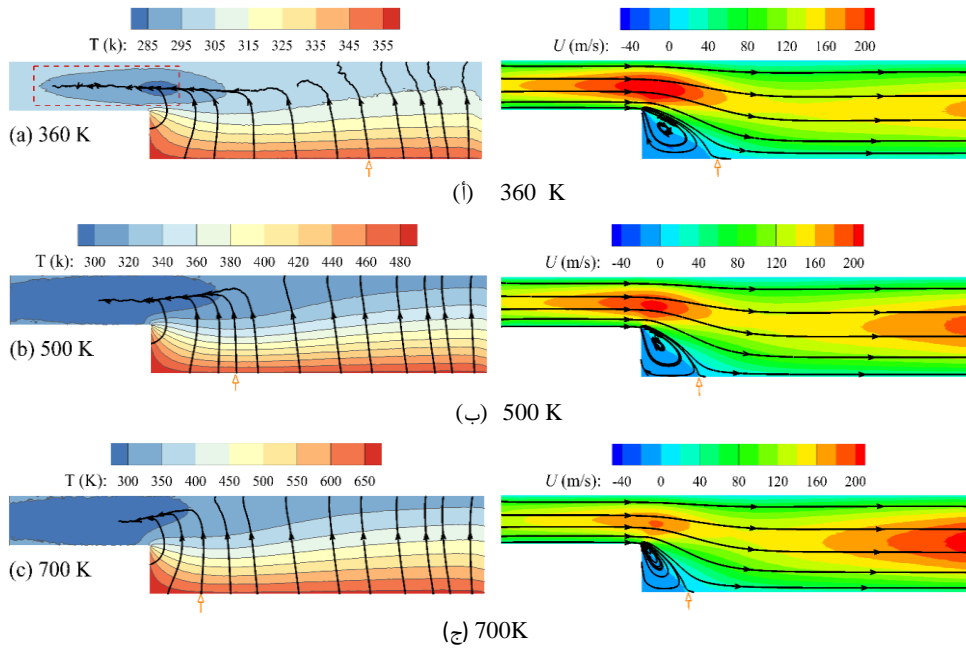
شکل ۳-۱۸ نمودار دبی جرمی بی‌بعدشده برحسب معکوس عدد نودسن [۱۴]



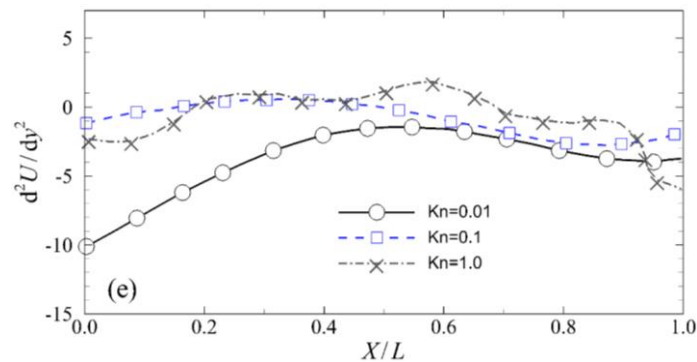
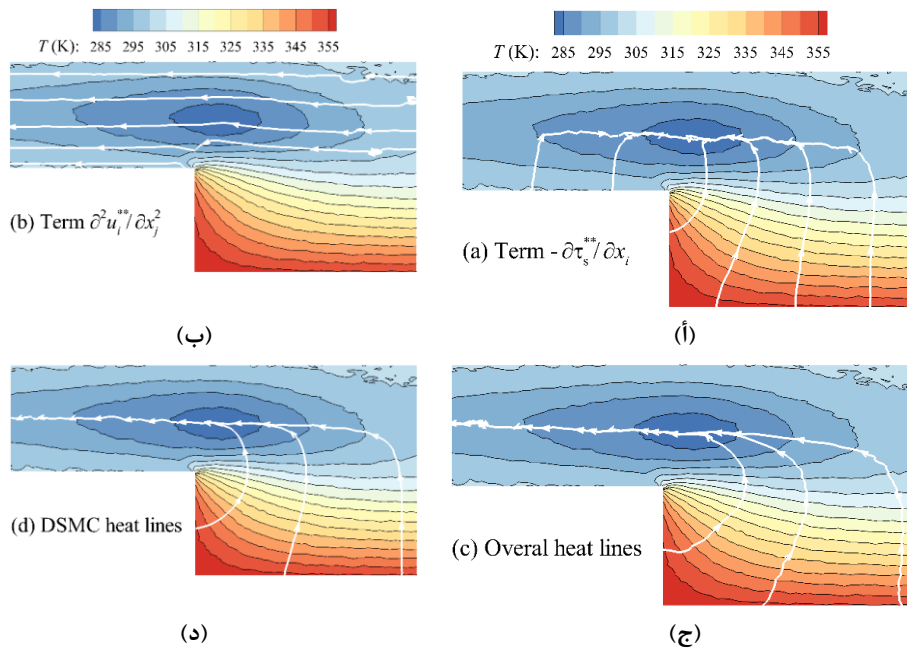
شکل ۳-۱۹ ا. نیمرخ سرعت در جریان پویایی؛ ب. نیمرخ سرعت نسبی برای ناظر در نقطه مبدأ؛ ج. مقایسه ممتمم و انرژی منتقل‌شده از دو نقطه A و B به نقطه مبدأ



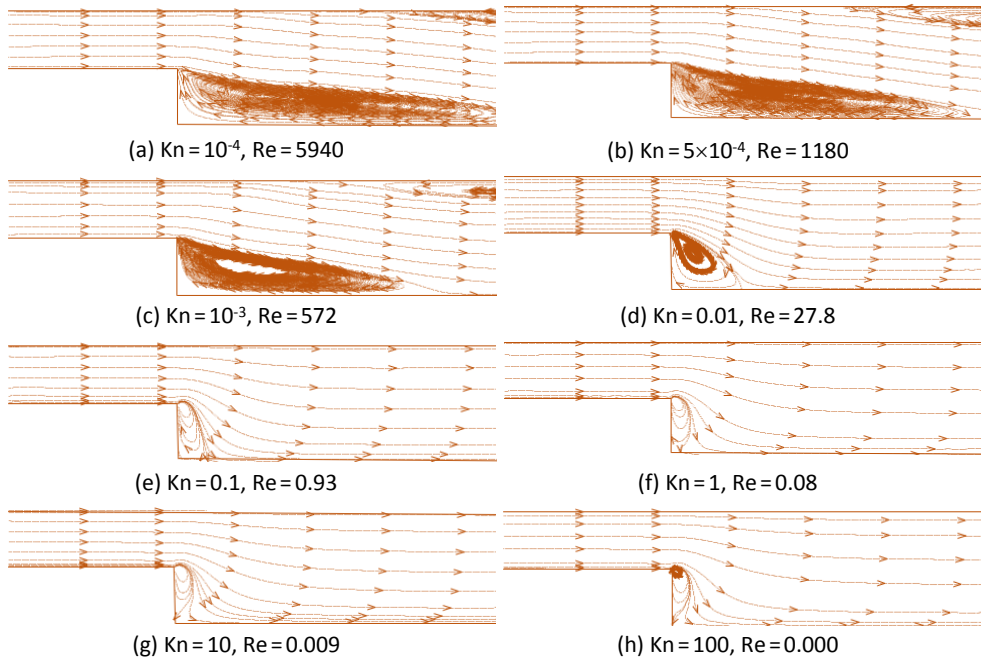
شکل ۳-۲۰ نیمرخ سرعت در عدد نودسن $\sqrt{\pi}/4$ در کانال‌هایی با ضرایب تبادل ممتمم با سطح (TMAC) مختلف و ارتفاع‌های مختلف (H) [۱۵]



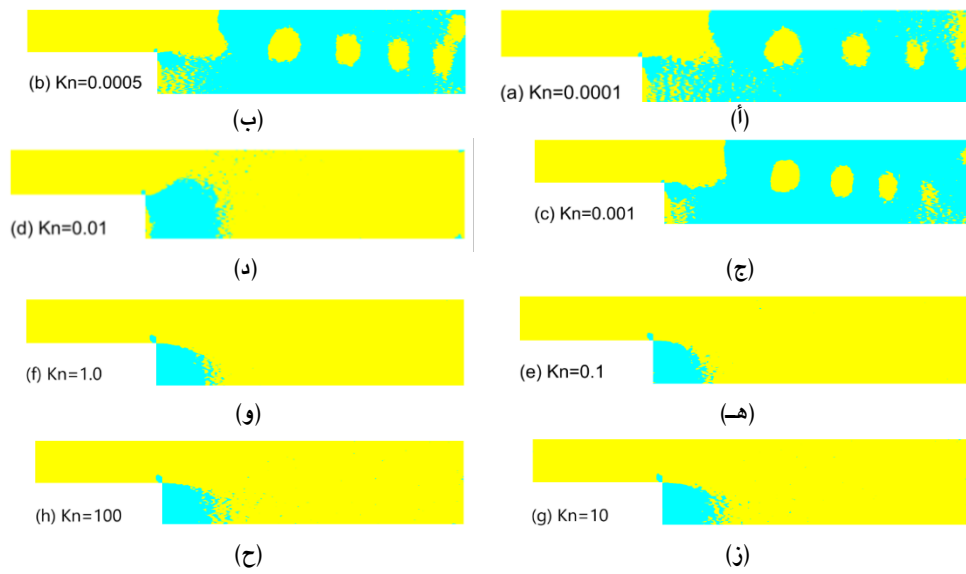
شکل ۲۳-۳ کانتورهای سرعت همراه با خطوط جریان و کانتورهای دما همراه با خطوط حرارتی در مقادیر مختلف $T_{wall2,3}$ با $Kn=0.01$ [۱۷]



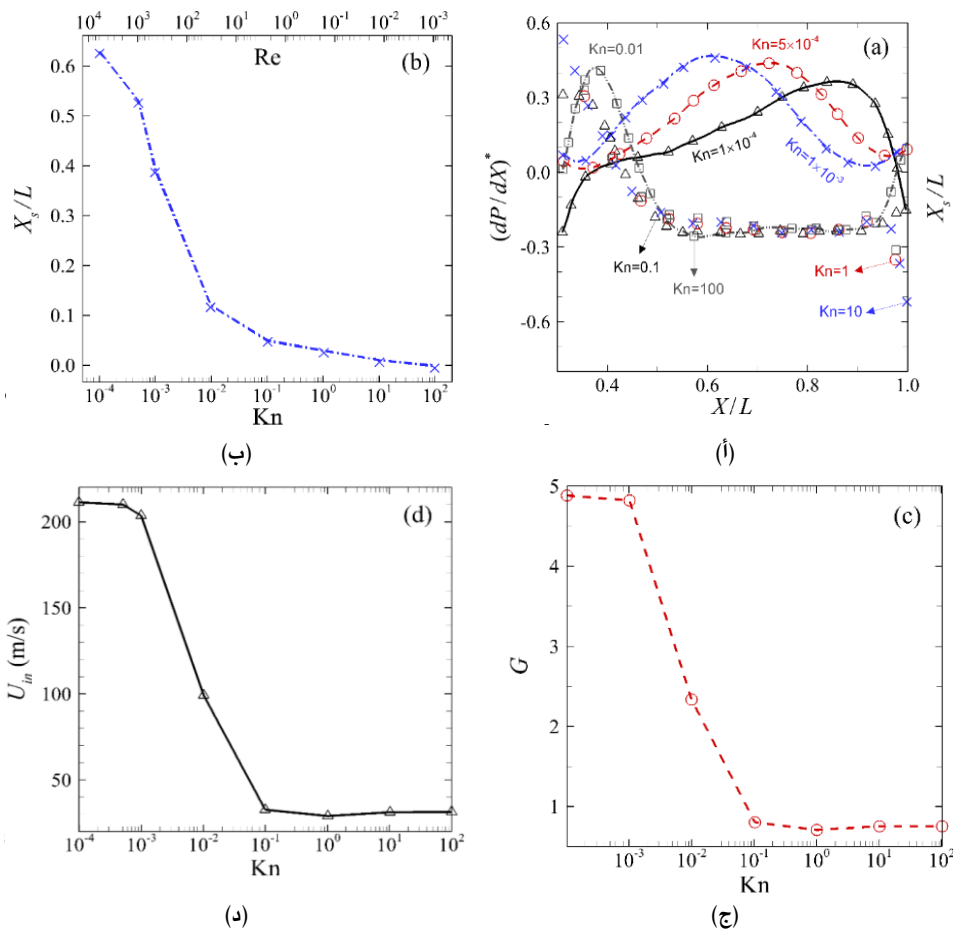
شکل ۲۴-۳ ا-د. خطوط حرارتی ترسیم شده در حالت بزرگ‌نمایی شده هندسه پله، ه. مشتق دوم سرعت در $Y/L=0.2$ [۱۷]



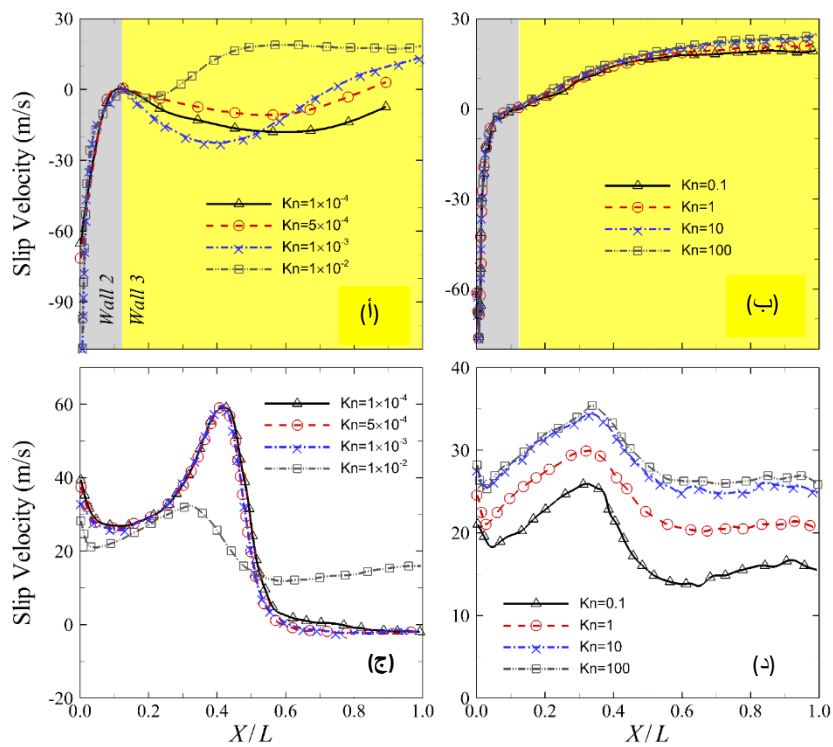
شکل ۳-۲۵ خطوط جریان در هندسه میکرو-پله [۱۸]



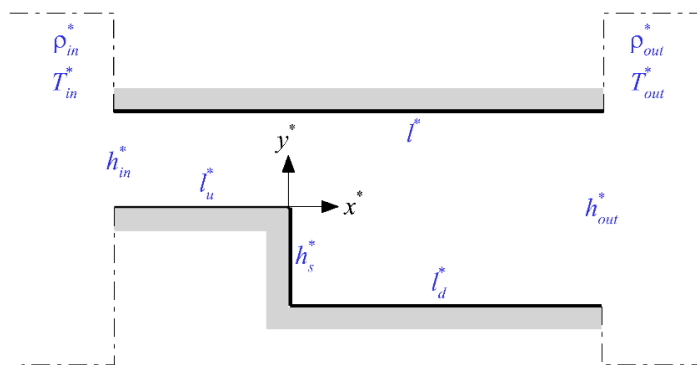
شکل ۳-۲۶ کانتورهای dP/dX ؛ رنگ آبی $dP/dX > 0$ و رنگ زرد $dP/dX < 0$ [۱۸]



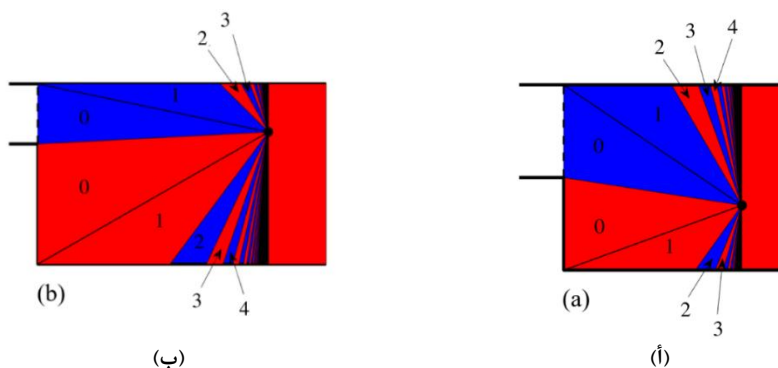
شکل ۳-۲۷ ویژگی‌های مختلف جریان در اعداد نودسن مورد بررسی [۱۹]



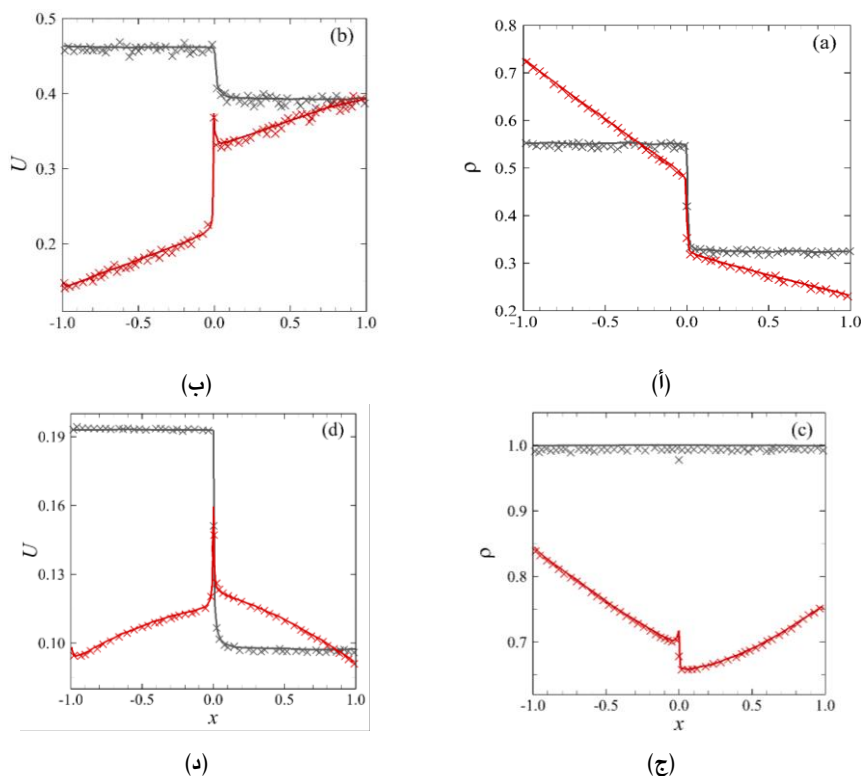
شکل ۳-۲۸ لغزش سرعت برای مقادیر مختلف عدد نودسن: (ا، ب، ج، د) روی دیواره‌های ۲ و ۳، و (د، ج، د) روی دیواره ۴ [۱۸]



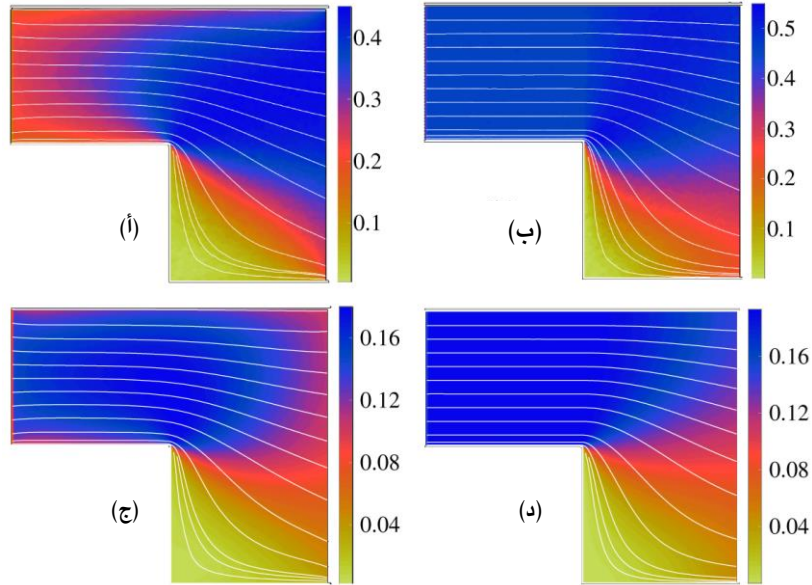
شکل ۳-۲۹ نمای شمایی هندسه کانال میکروپله



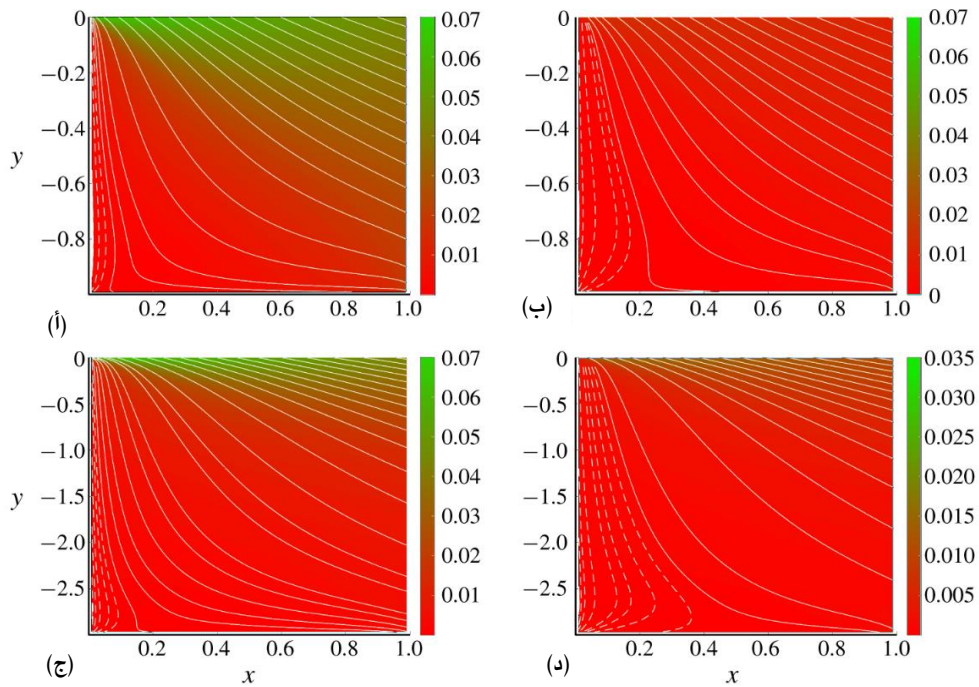
شکل ۳-۳۱ تقسیم ناحیه پایین دست $x > 0$ در یک کانال با انعکاس آینه‌ای به بخش‌هایی بر اساس منشأ ذرات: ورودی (آبی) و خروجی (قرمز). در یک نقطه مشخص (x_p, y_p) از کانال‌هایی با اندازه پله $h_s = 1$ و $h_s = 2$ [۱۹]



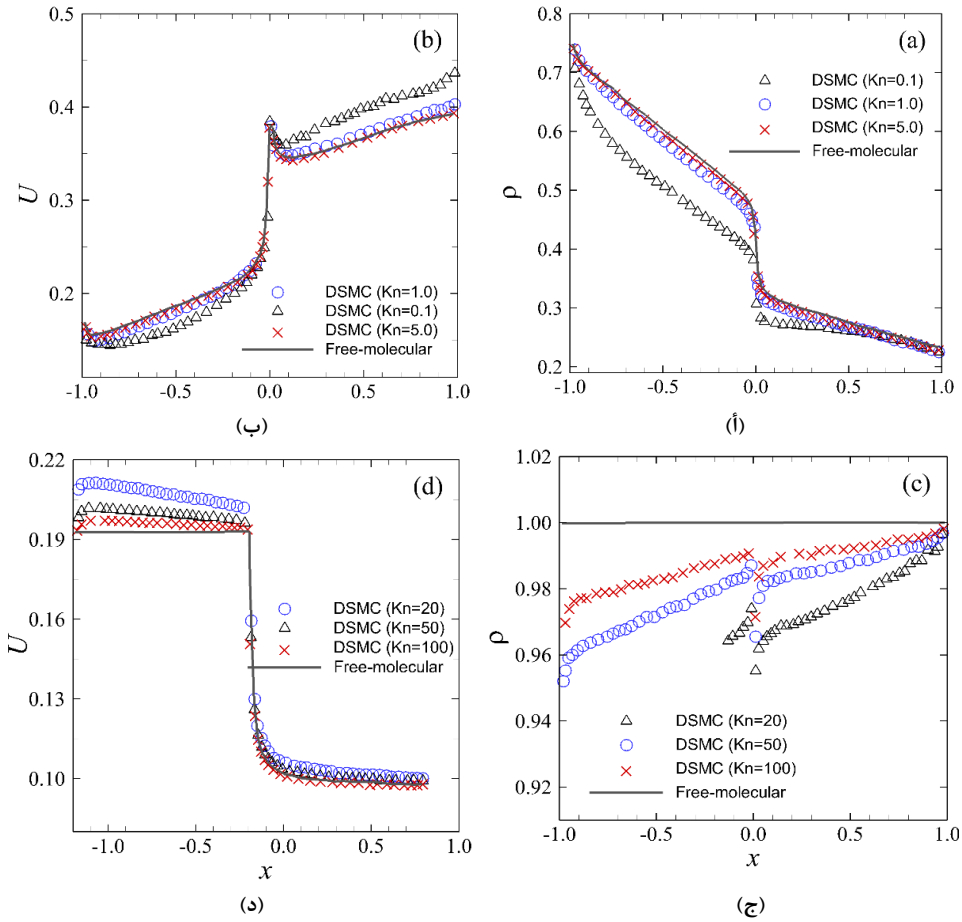
شکل ۳-۳۲ مقایسه راه حل تحلیلی رژیم آزاد مولکولی (خطوط) و نتایج DSMC (نمادها) برای جریان (آ.ب). چگالی-محور (ج-د). دما-محور. خطوط سیاه صلب و علامت ضربدر نتایج مربوط به کانالی با دیواره‌های پخشی را نشان می‌دهند و منحنی‌های آبی خطچین و دایره‌ها داده‌های کانالی با دیواره‌های آینه‌ای را نمایش می‌دهند. همه مقایسه‌ها در $y = 0.002$ و در بازه $-1 \leq x \leq 1$ انجام شده‌اند. [۱۹]



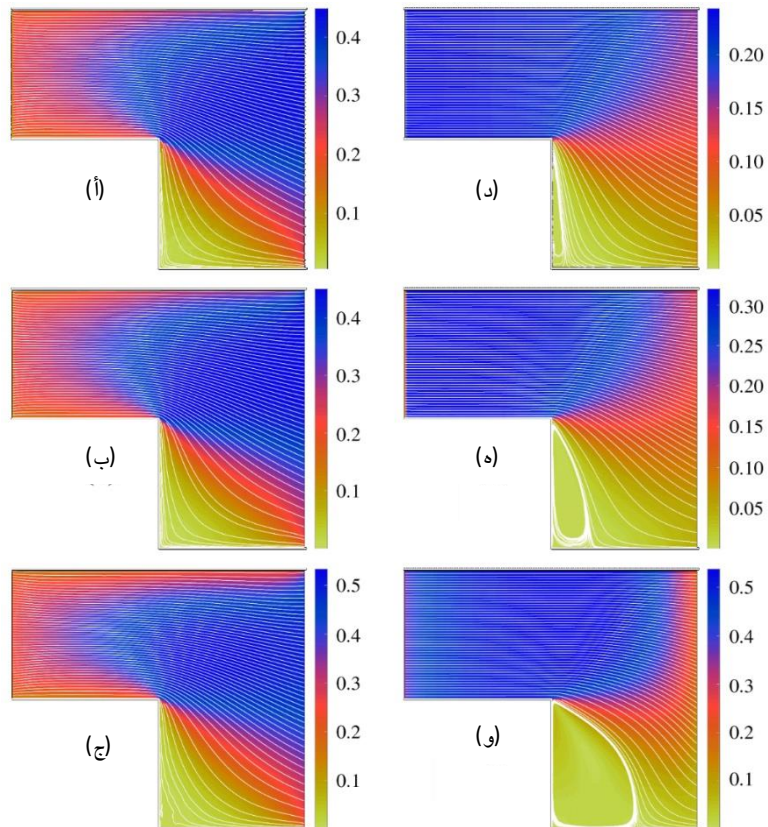
شکل ۳-۳۳ میدان رژیم آزاد مولکولی در جریان (أ، ب). چگالی-محور و (ج، د). دما-محور: (أ، ج) و (ب، د) به ترتیب مربوط به کانالهایی با دیوارهای پخشی و آینه‌ای هستند. کانتورها و طیف رنگی به ترتیب خطوط جریان و مقدار سرعت گاز را نشان می‌دهند [۱۹].



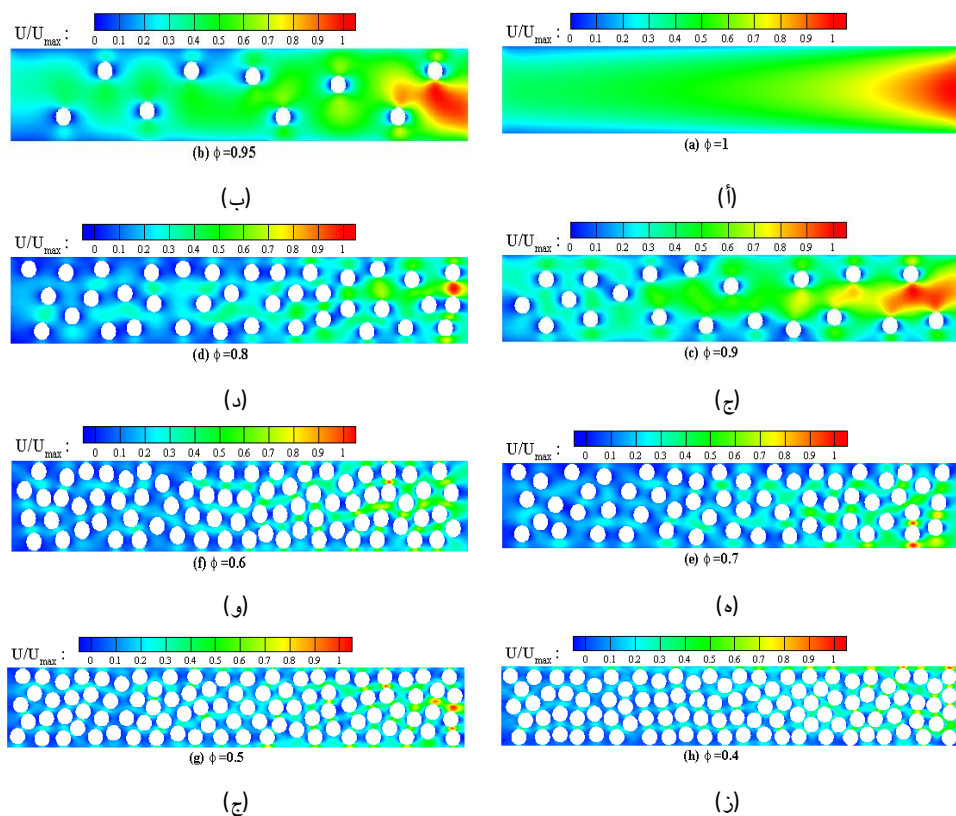
شکل ۳-۳۵ اثر اندازه پله ($h_s=3; h_s=1$) و دمای خروجی ($T_{out}=0.4; T_{out}=0.8$) بر خطوط جریان (منحنی‌ها) و سرعت گاز (طیف‌های رنگی) در مجاورت دیواره پله (منطقه III) در شرایط آزاد مولکولی. در همه حالت‌ها $p_{out}=1$ است و دیواره‌های کانال به صورت پخشی بازتاب می‌کنند. منحنی‌های خط‌چین خطوط جریانی را نشان می‌دهند که به ترتیب از لبه‌های سطح پله $(0,0)$ و $(0,-h_s)$ شروع و پایان می‌یابند [۱۹]



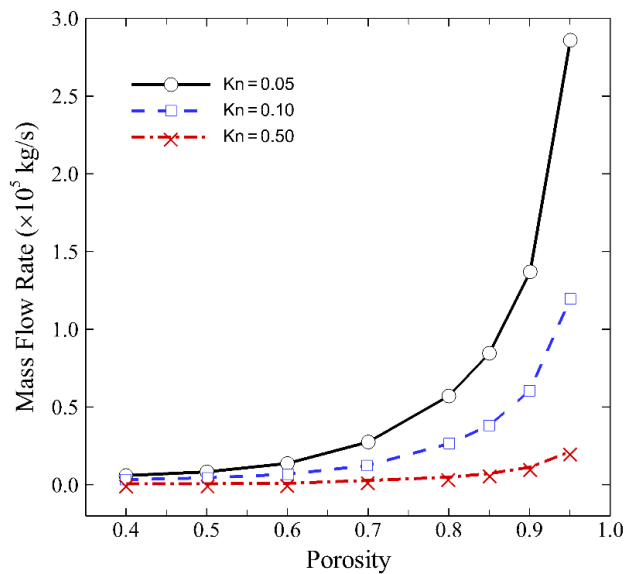
شکل ۳-۳۶ شکست رژیم آزاد مولکولی با کاهش عدد نودسن: تغییرات در راستای x در $\gamma=0.01$ برای میدان چگالی و میدان سرعت x برای حالتی با (ا، ب). $T_{out}=1, \rho_{out}=0.1$ و دیواره‌های انعکاس پخششی و (ج، د). $T_{out}=1, \rho_{out}=0.1$ و دیواره‌های انعکاس آینه‌ای. خط صلب حل آزاد مولکولی را نشان می‌دهد و نمادها داده‌های DSMC را در مقادیر مشخص شده Kn نمایش می‌دهند [۱۹]



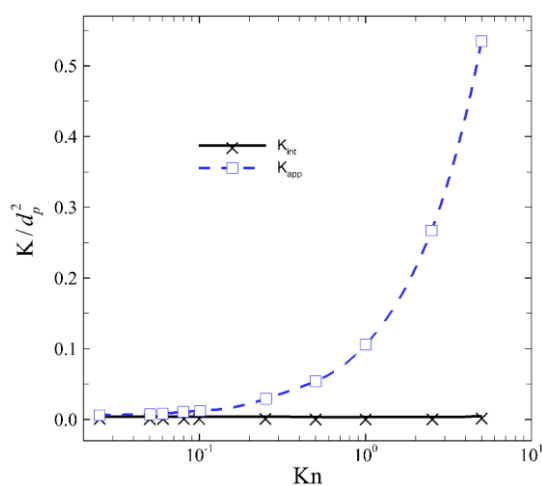
شکل ۳-۳۷ اثر عدد نودسن (ا ، د ، ه ، ب ، ج ، و) $Kn=0.1$ و شرایط مخزن خروجی (ا-ج).
 $\rho_{out}=1, T_{out}=0.1$ و دیواره‌های انعکاس پخشی؛ (د-و). $\rho_{out}=1, T_{out}=0.1$ و دیواره‌های انعکاس آینه‌ای، بر خطوط جریان
 (منحنی‌ها) و سرعت گاز (طیف‌های رنگی) [۱۹]



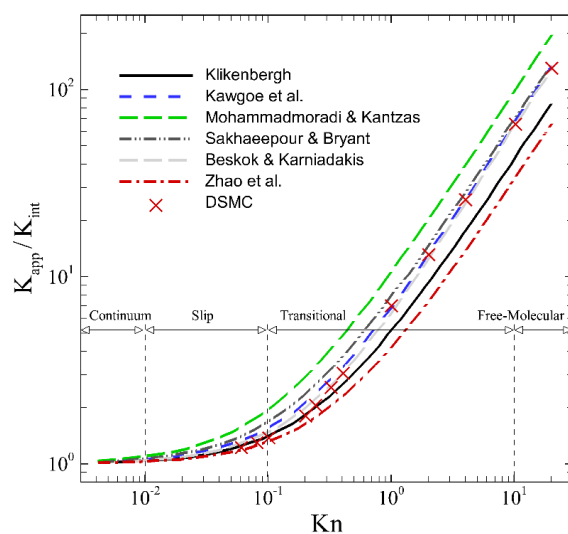
شکل ۳-۳۸ توزیع سرعت در راستای جریان در میکروکانال متخلخل با تخلخل‌های مختلف. در تمامی حالات $Kn_{in}=0.1$ و
 $P_{in}/P_{out}=3$ است [۲۰]



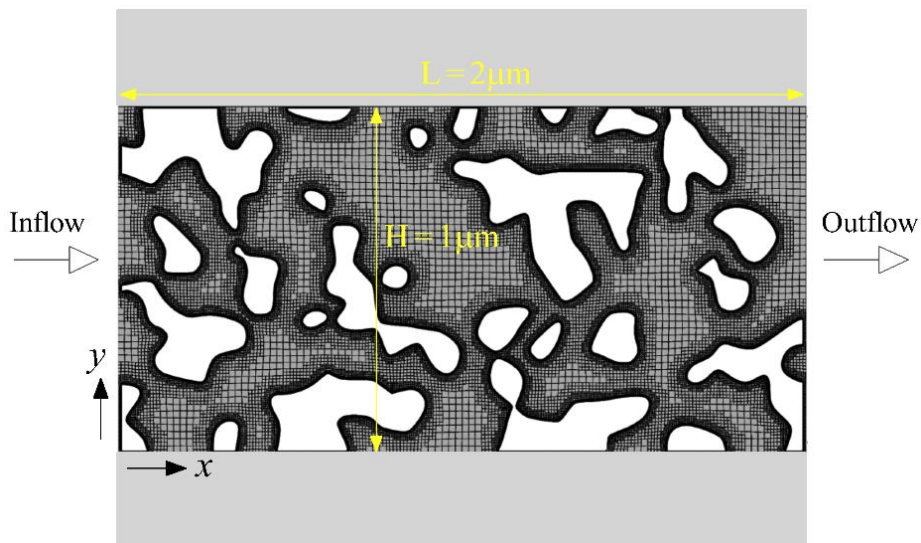
شکل ۳-۳۹ تغییرات دبی جرمی با تخلخل در اعداد نودسن مختلف [۲۰]



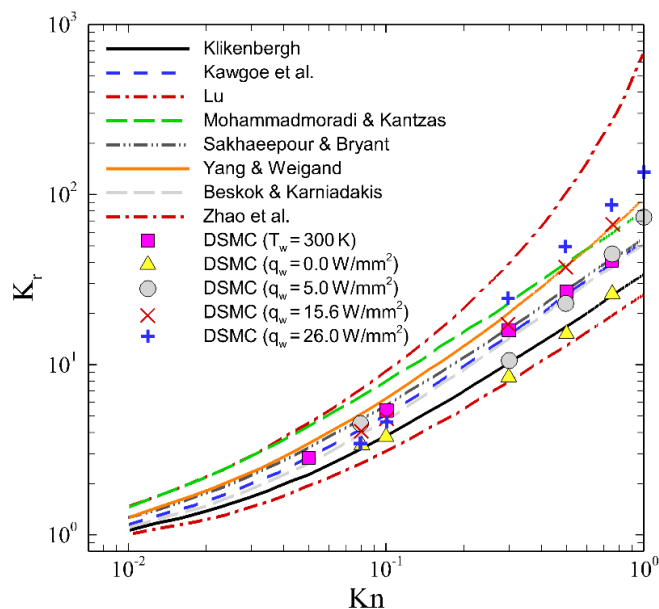
شکل ۳-۴۰ نفوذپذیری محیط متخلخل بی بعد شده بر حسب قطر ذرات جامد ($d_p=1000\text{ nm}$) در نودسن‌های مختلف ورودی [۲۰]



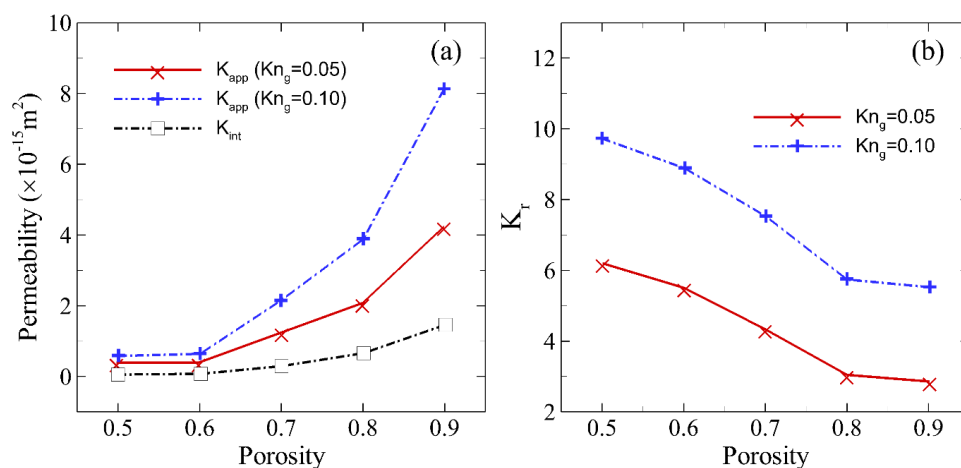
شکل ۳-۴۱ مقایسه مدل‌های مختلف نفوذپذیری با نتایج شبیه‌سازی DSMC [۲۰]



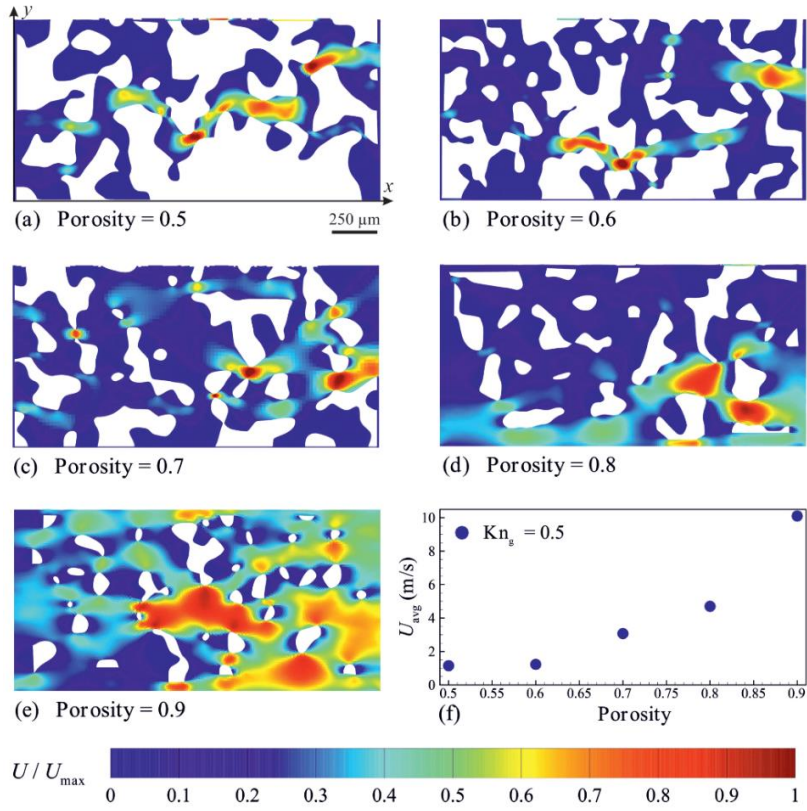
شکل ۳-۴۲ نمای شمایی از یک ساختار متخلخل تولید شده با poreSpy package و ناحیه شبکه بندی شده [۲۱]



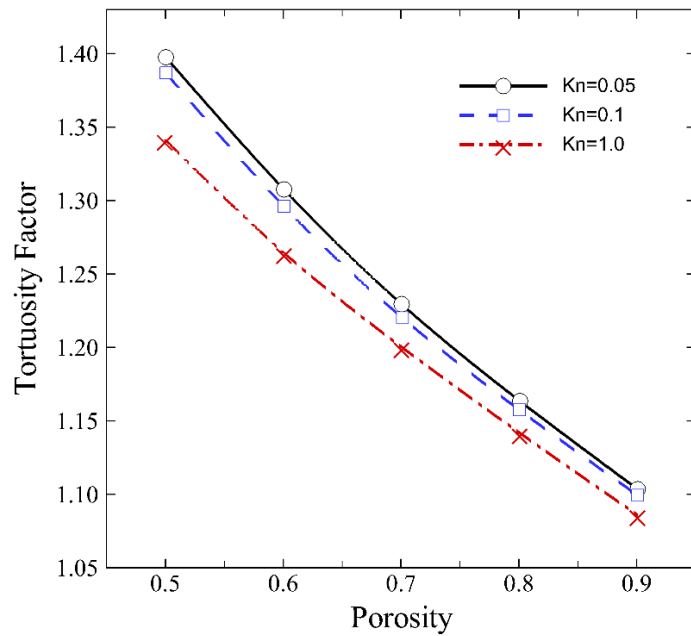
شکل ۳-۴۳ مقایسه نسبت نفوذپذیری (k_r) شبیه سازی های اخیر برای تخلخل ۰/۸ [۲۱]



شکل ۳-۴۴ نفوذپذیری ظاهری (K_{app})، نفوذپذیری ذاتی (K_f) و نسبت آن‌ها در تخلخل های مختلف [۲۱]

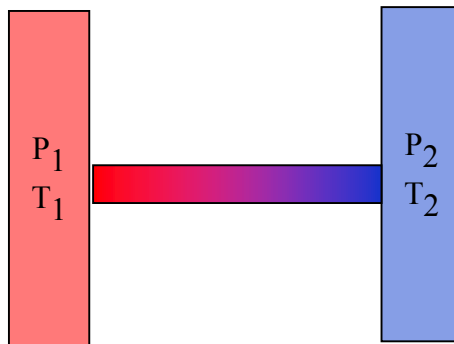


شکل ۳-۴۵ تأثیر تخلخل‌های مختلف بر پروفیل سرعت در میکروکانال متخلخل در شرایط $P_{in}/P_{out}=2$, $Kn_{inlet}=0.5$ [۲۸]

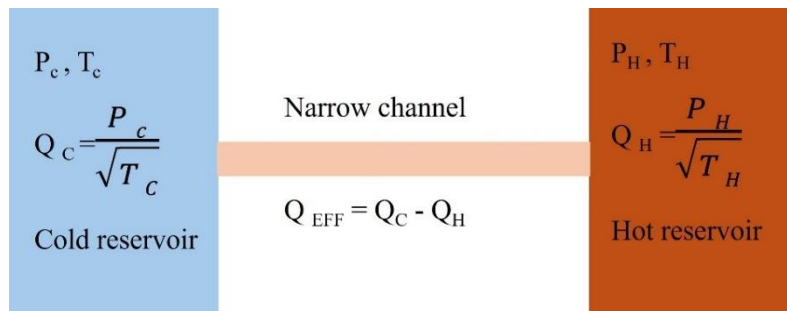


شکل ۳-۴۶ پیچیدگی مسیر (τ_h) بر حسب تخلخل در اعداد نودسن مختلف [۲۹]

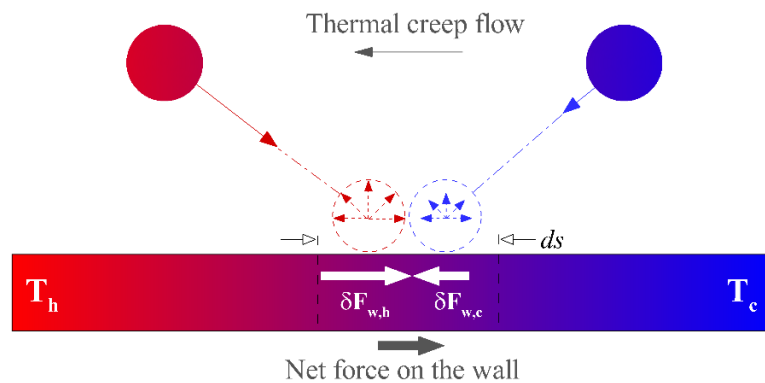
جریان‌های رانده‌شده با گرادیان / اختلاف دما در میکروهندسه‌ها



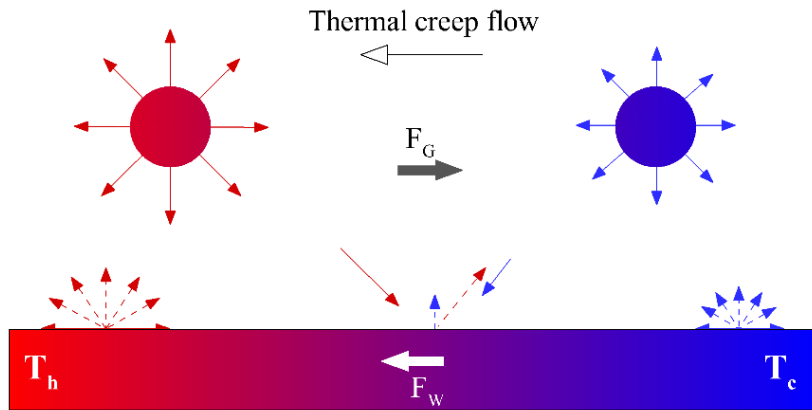
شکل ۱-۴ دو مخزن با فشار یکسان و دمای متفاوت



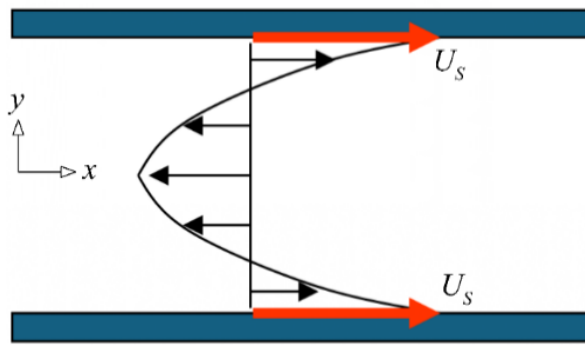
شکل ۲-۴ دو مخزن دارای جریان خزشی گرمایی در حالت دائمی



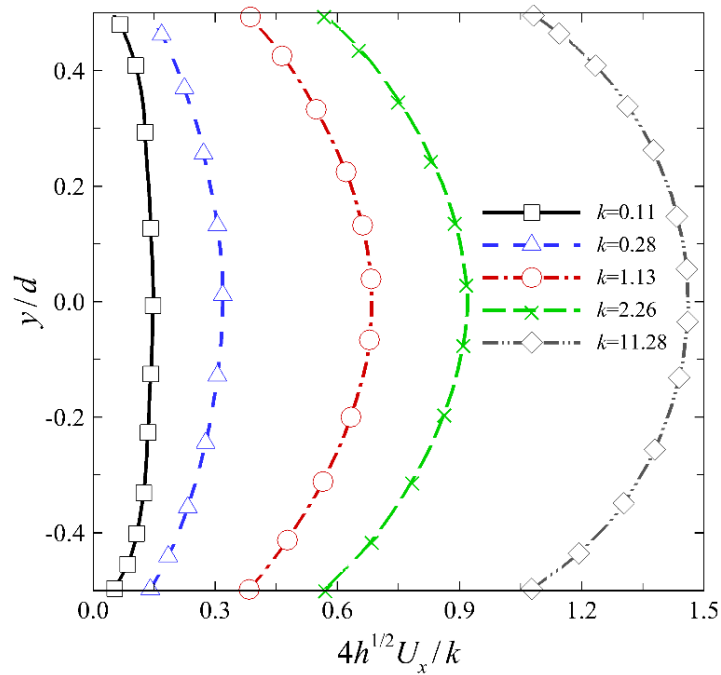
شکل ۳-۴ مکانیسم ایجاد جریان خزشی گرمایی [۳]



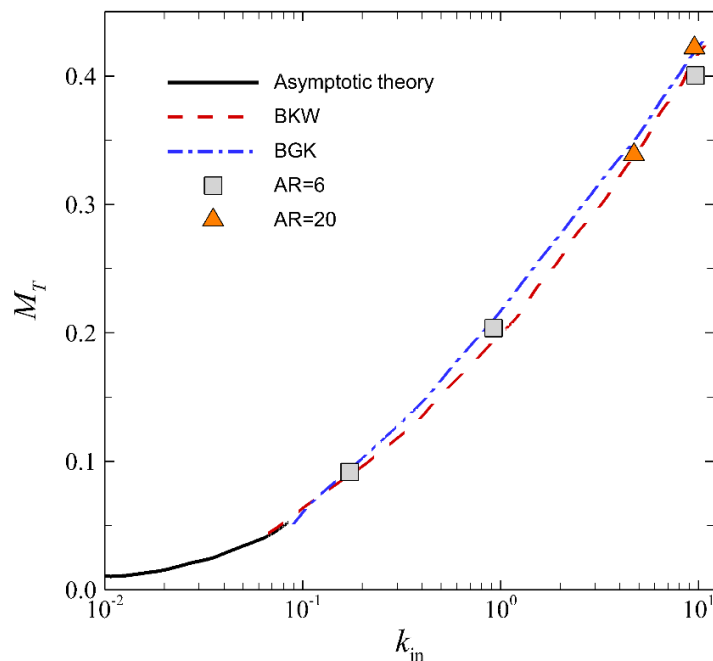
شکل ۴-۴ طریقه ایجاد جریان جریان خزشی گرمایی در دیوار پخشی [۴]



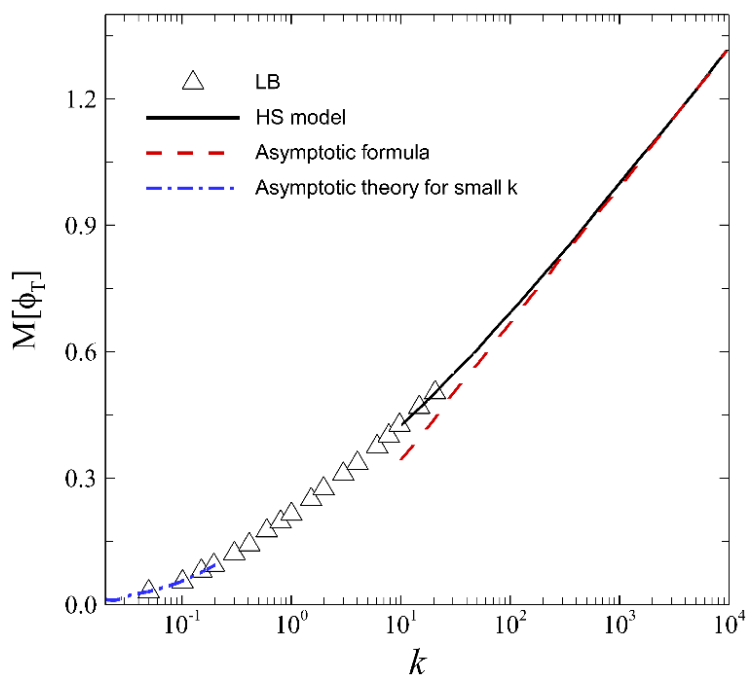
شکل ۴-۵ سرعت لغزشی در یک کانال



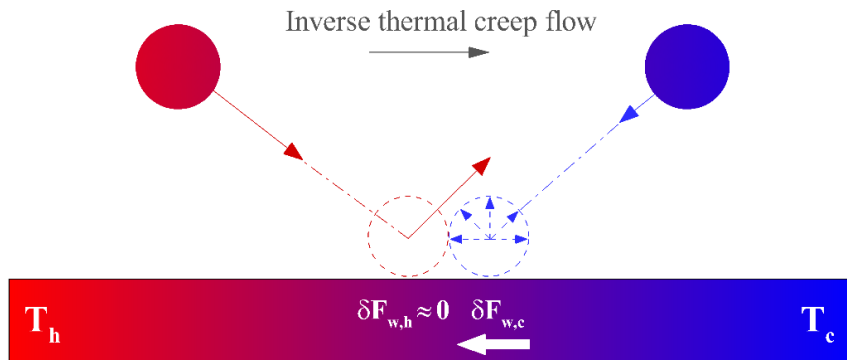
شکل ۴-۶ نیمرخ سرعت در یک کانال در اعداد نودسن مختلف (نشان داده شده در شکل) [۶]



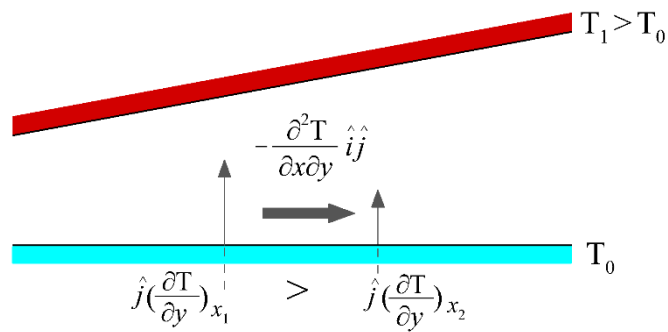
شکل ۴-۷ تغییرات دبی جرمی برحسب عدد k در ورودی، نمادها مربوط به داده‌های DSMC برای مجرای مستقیم با $[V] DT_w/T_{in}=0.02$



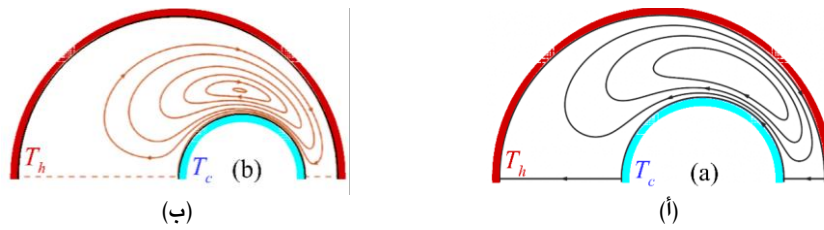
شکل ۴-۹ تغییرات دبی جرمی جریان خزش حرارتی در کانال برحسب پارامتر k . خط صلب داده‌های استخراج‌شده بر اساس مدل HS [۸] را نشان می‌دهند، خط چین مربوط به فرمول مجانبی [۸] هستند، خط نقطه-خط نظریه مجانبی برای مقادیر کوچک نودسن [۱] را نمایش می‌دهند و نمادها داده‌های عددی حاصل از بولتزمن خطی شده [۵] را نشان می‌دهند [۸].



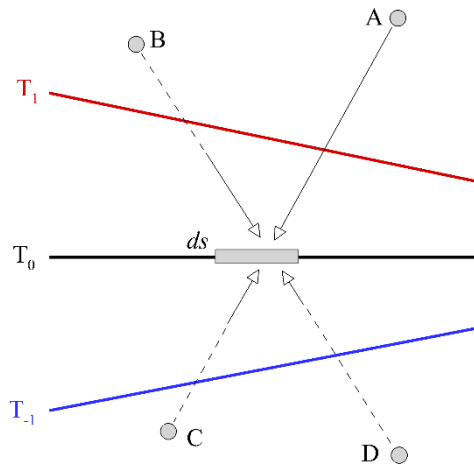
شکل ۴-۱۰ انعکاس مولکول‌ها از مرز تابع سرعت و جریان خزش حرارتی معکوس [۳]



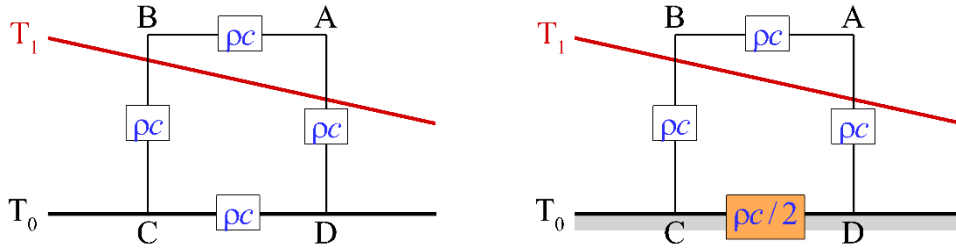
شکل ۴-۱۱ جریان تنش حرارتی لغزشی بین دو دیوار هم‌دما (دیوار بالایی مورب و دیوار پایینی صاف است). [۷]



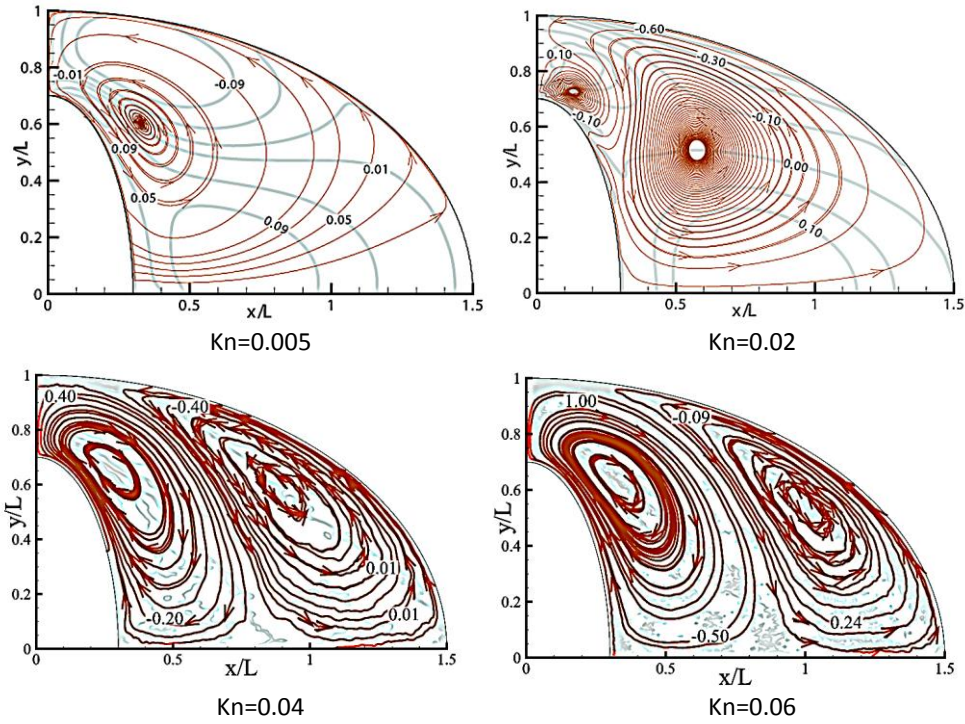
شکل ۴-۱۲ جریان حرارتی لغزشی بین دو استوانه غیرهم‌مرکز: ا. حل معادله بولتزمن خطی؛ ب. حل معادله ناویر-استوکس با شرط مرزی لغزش از معادله برنت [۱۰]



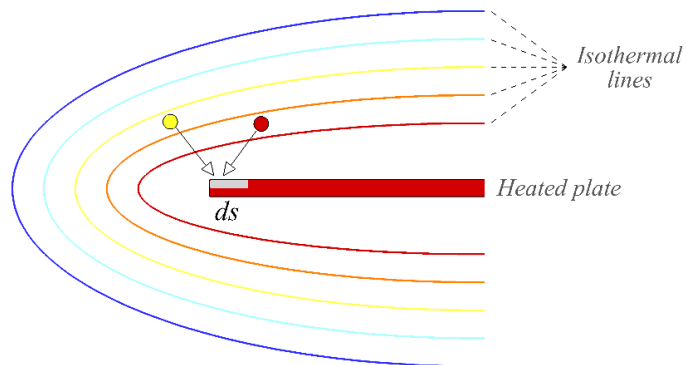
شکل ۴-۱۳ علت ایجاد جریان تنش حرارتی [۷]



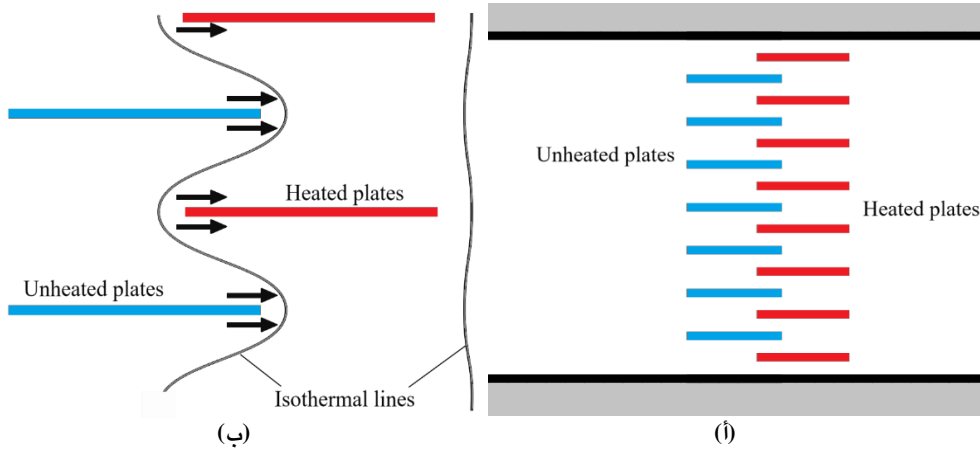
شکل ۴-۱۴ بررسی جریان تنش حرارتی لغزشی در حجم کنترل بسته [۱]



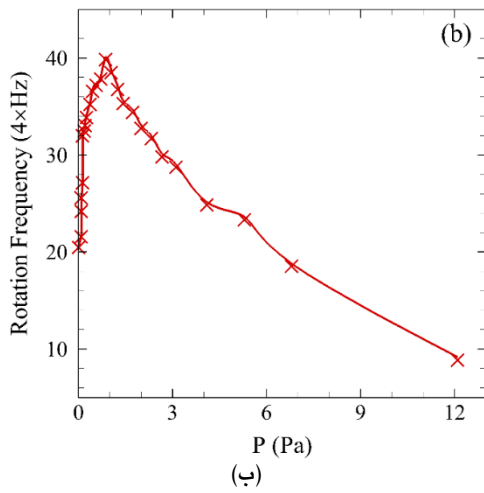
شکل ۴-۱۵ جریان حرارتی بین دو استوانه بیضوی هم‌مرکز دما ثابت در اعداد نودسن مختلف. دمای استوانه بیرونی T_1 و دمای استوانه درونی T_0 است ($T_1/T_0=5$). اعداد مقدار سرعت بی‌بعد را بیان می‌کنند [۱۲]



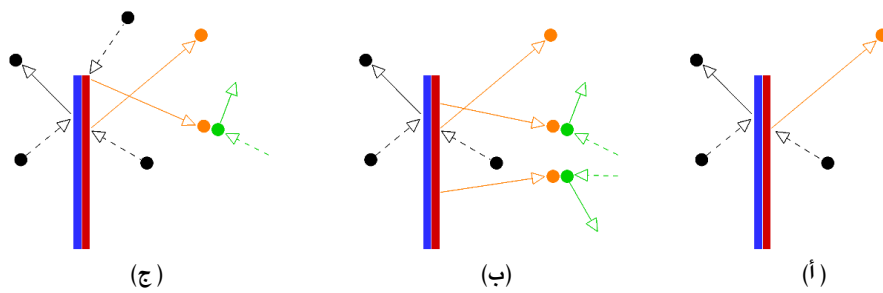
شکل ۴-۱۶ جریان لبه‌ای گرمایی روی لبه صفحه تخت



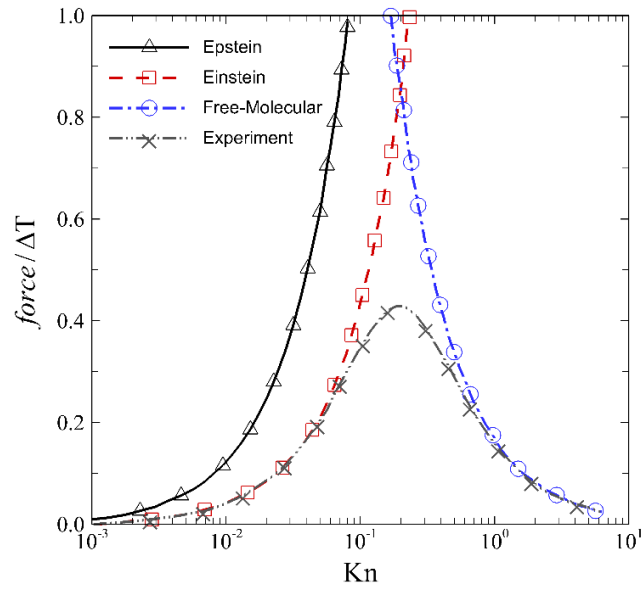
شکل ۴-۱۸ جریان لبه حرارتی [۲۴]: ا. آرایش صفحات گرم‌شده و گرم‌نشده؛ ب. خطوط هم‌دما و جریان لبه حرارتی ایجادشده توسط صفحات در محفظه [۱۵]



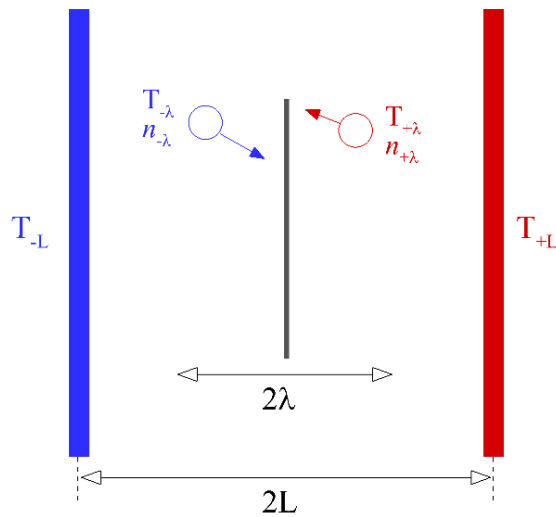
شکل ۴-۱۹ ا. رادیومتر کروک ب. سرعت دورانی اندازه‌گیری‌شده آن



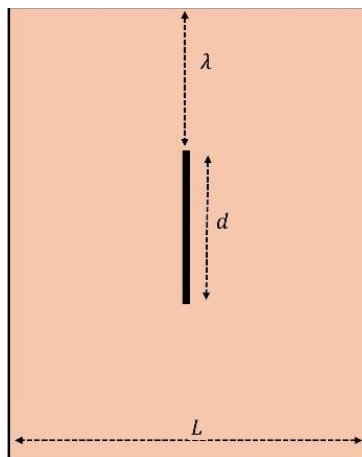
شکل ۴-۲۰ علت نیروی رادیومتریک [۱۷]: ا. مولکول‌های سرعت‌بالای منعکس‌شده از سطح گرم؛ ب. مولکول‌های سرعت‌بالای هنگام برخورد به مولکول‌های اطراف؛ ج. در نزدیکی لبه [۱۷]



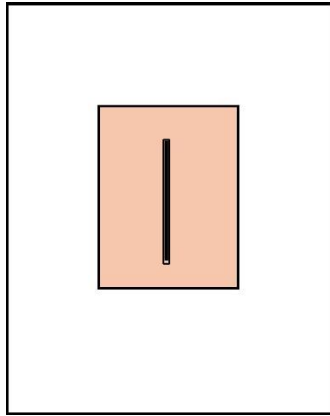
شکل ۲۱-۴ مقایسه نتایج تئوری‌های انیشتین، اپستین، مولکولی آزاد و نتایج تجربی بروخ و لیتوین [۲۲] برای نیرو بر واحد گرادیان دما برحسب عدد نودسن [۱۸]



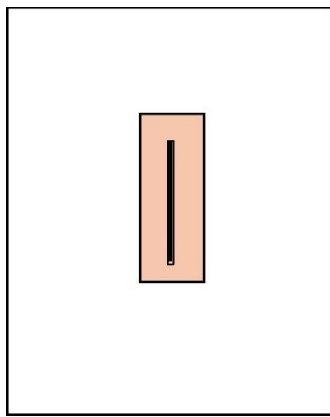
شکل ۲۲-۴ شبیه‌سازی پره رادیومتریک



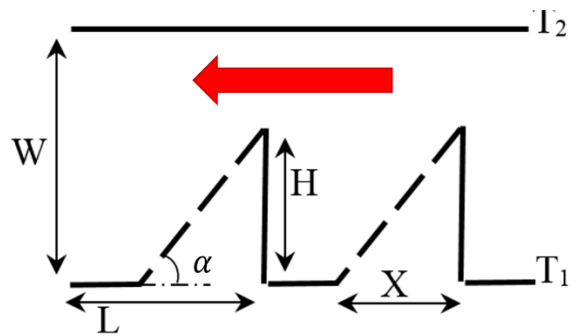
شکل ۲۳-۴ حجم کنترل پره رادیومتریک- عدد نودسن بزرگ



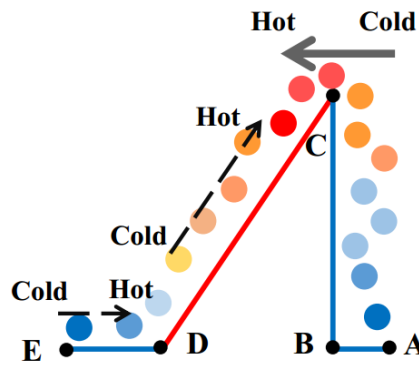
شکل ۴-۲۴ حجم کنترل پره رادیومتریک در اعداد نودسن متوسط



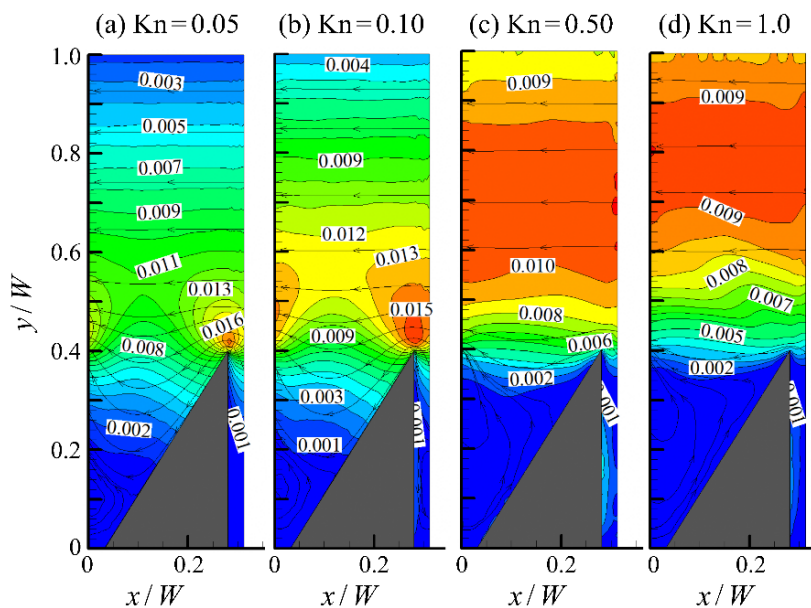
شکل ۴-۲۵ حجم کنترل پره رادیومتریک- اعداد نودسن کوچک



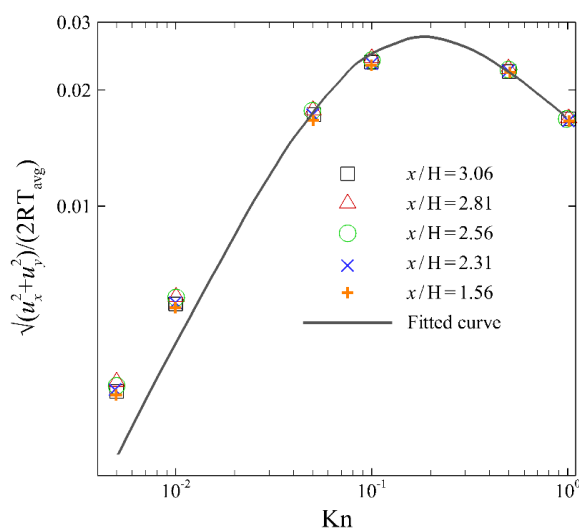
شکل ۴-۲۶ میکروپمپ گازی ($T_1 < T_2$)



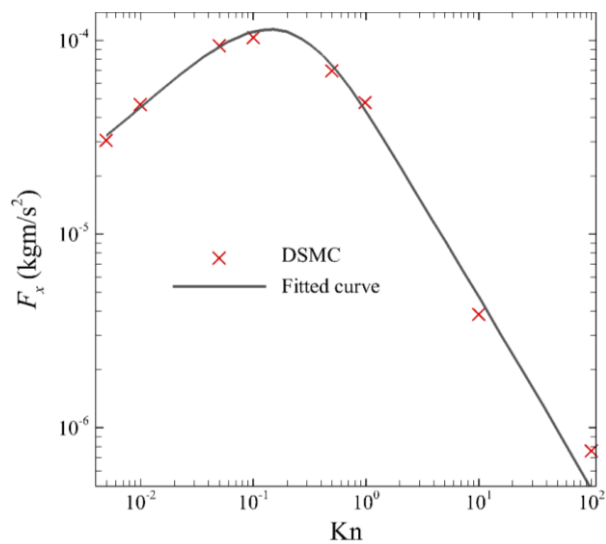
شکل ۴-۲۷ مکانیسم ایجاد جریان در اطراف دندان [۲۳]



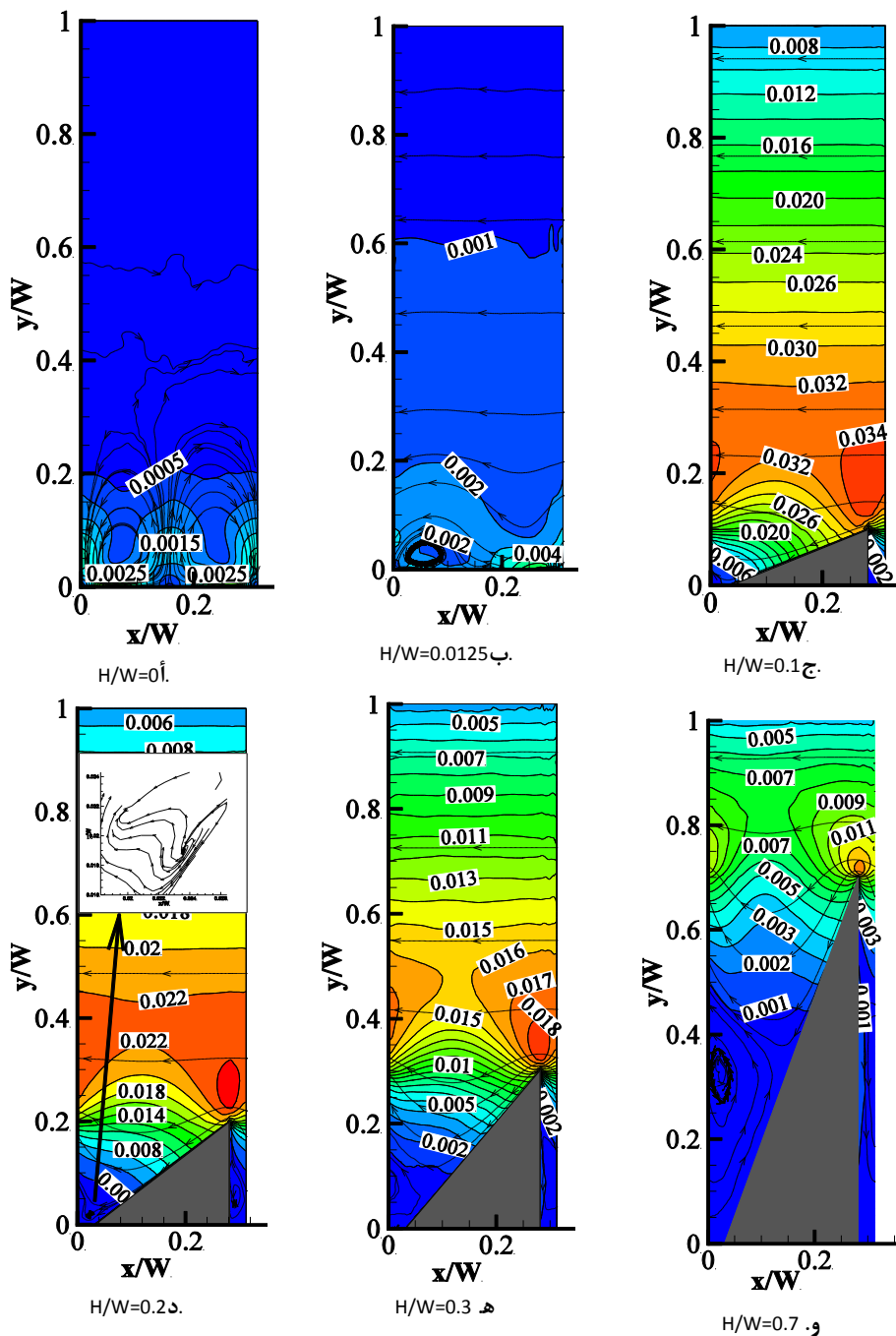
شکل ۴-۲۸ کانتورهای سرعت به‌همراه خطوط جریان در میکروپیپ رادیومتریک [۲۳]



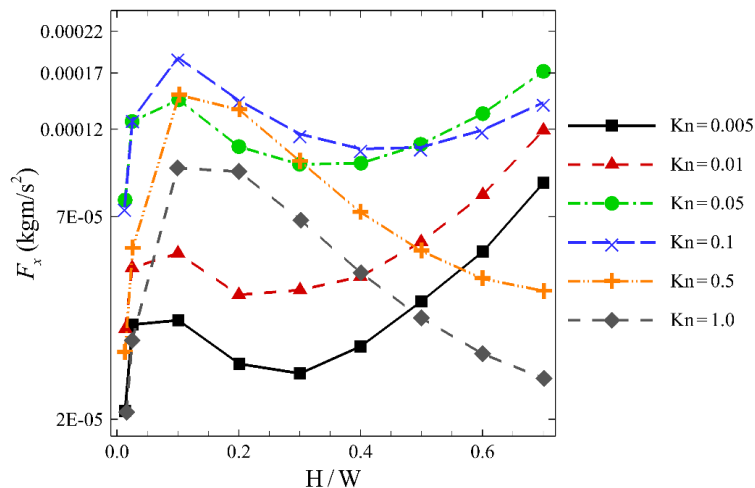
شکل ۴-۲۹ تغییرات اندازه‌ی سرعت برحسب عدد نودسن در موقعیت‌های مختلف برای دندانه به ارتفاع ۴۰۰ نانومتر [۲۳]



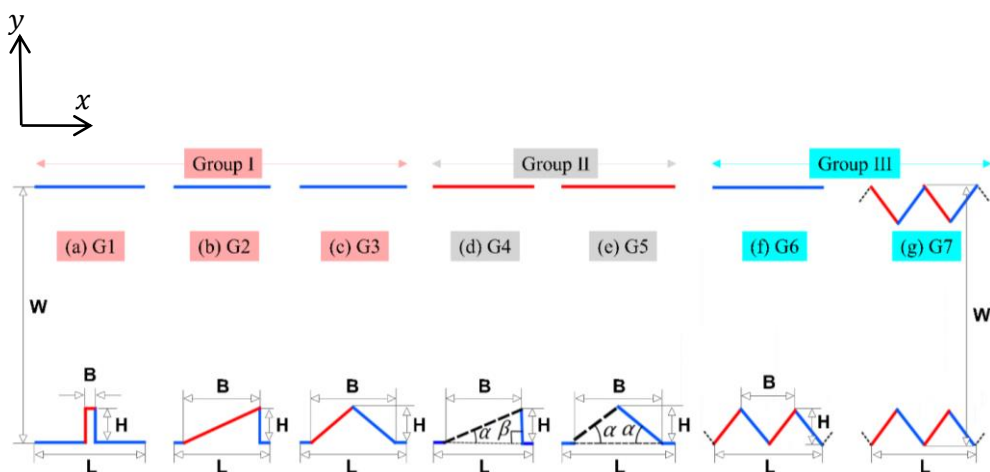
شکل ۴-۳۰ تغییرات نیروی محوری برحسب عدد نودسن [۲۳]



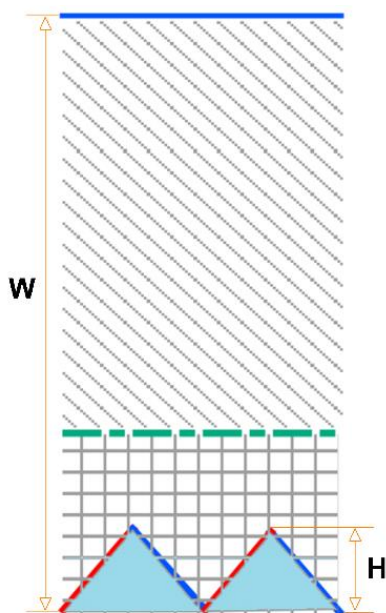
شکل ۳۱-۴ تأثیر تغییر ارتفاع دندان بر رفتار سرعت و خطوط جریان در میدان حل در نودسن ۰/۸ و اختلاف دمای ۳۰۰ کلوین [۲۳].



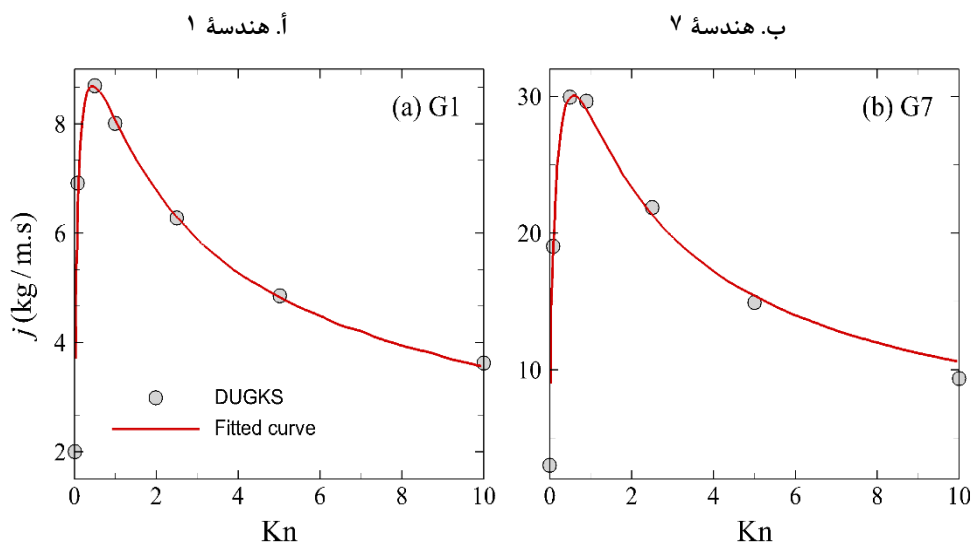
شکل ۴-۳۲ تغییرات نیروی افقی با ارتفاع پره در اعداد نودسن مختلف [۲۳]



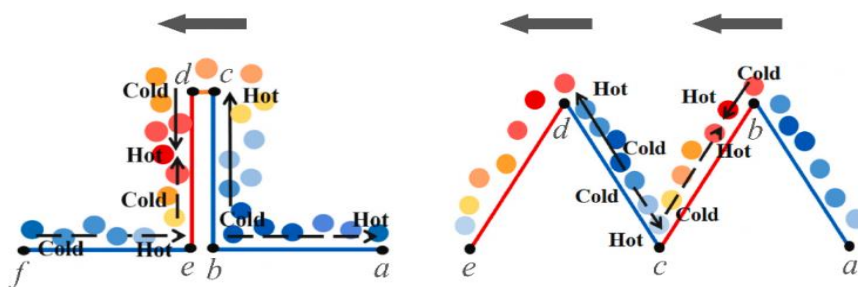
شکل ۴-۳۳ نمای شمایی ۷ هندسه طراحی شده برای پمپ‌های رادیومتریک که در سه گروه دسته‌بندی شده‌اند [۲۷]



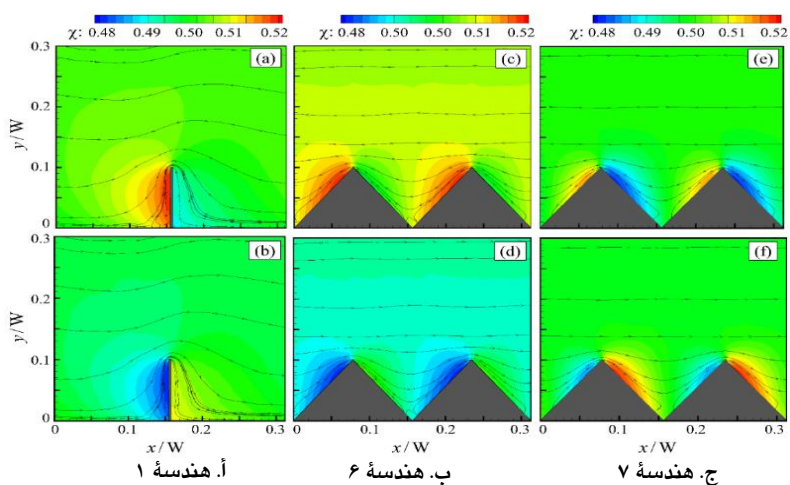
شکل ۴-۳۴ ناحیه‌های مؤثر هر دو عدد نودسن تعریف‌شده: یکی براساس طول مشخصه ارتفاع مؤثر کانال و دیگری براساس طول مشخصه ارتفاع پره/دندان‌اره‌ای [۲۷]



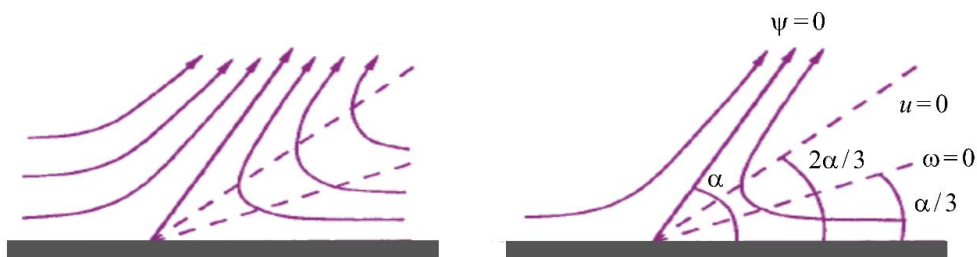
شکل ۴-۳۵ تغییرات شار جرمی با عدد نودسن برای هندسه‌های ۱ و ۷ [۲۷]



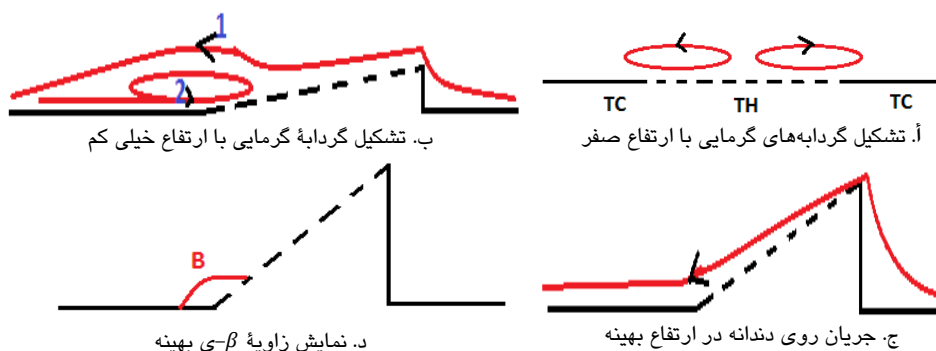
شکل ۴-۳۶ مکانیسم ایجاد جریان رادیومتریکی (فلش با خط صلب) و جریان شبیه جریان خزشی حرارتی (فلش با خط چین) در اطراف دندانه مثلثی متساوی‌الساقین و هندسه ۱. دایره‌های آبی و قرمز به ترتیب معرف مولکول‌های سرد و گرم هستند [۲۸].



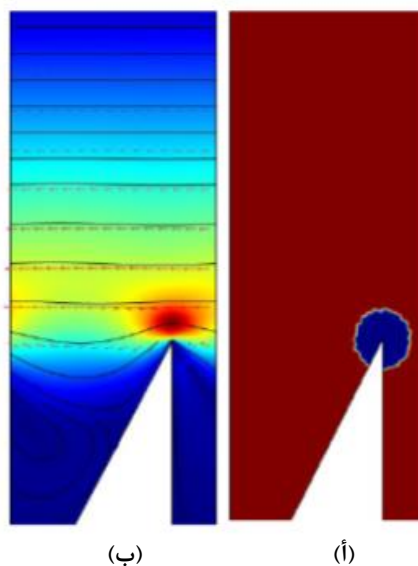
شکل ۴-۳۷ کانتورهای نسبت مولی هلیم (ردیف بالا) و زنون (ردیف پایین) در سه هندسه مختلف [۲۸]



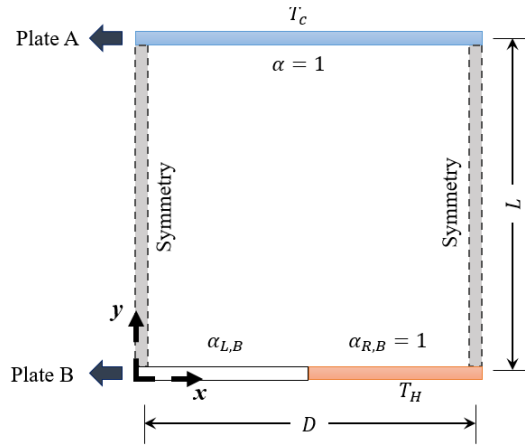
شکل ۴-۴۰ جدایش روی جریان یک صفحه، سمت چپ: جریان واقعی؛ سمت راست: جریان مدل‌شده [۲۹]



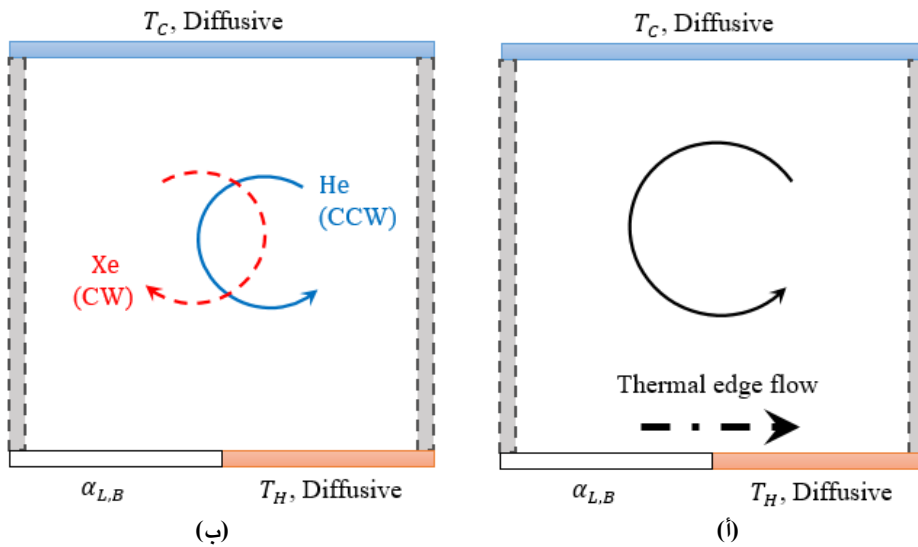
شکل ۴-۴۸ نمای شمایی تشکیل گردابه و الگوی جریان بر روی سطح دندان‌دار در ارتفاع‌های مختلف



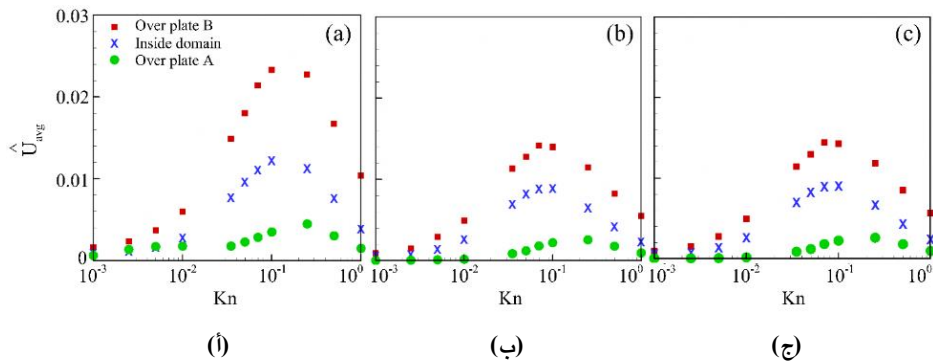
شکل ۴-۴۹. نیروی متمرکز اطراف دندان‌دار؛ ب. جریان استوکس در هندسه هم‌دما با تراکم نیروی ثابت



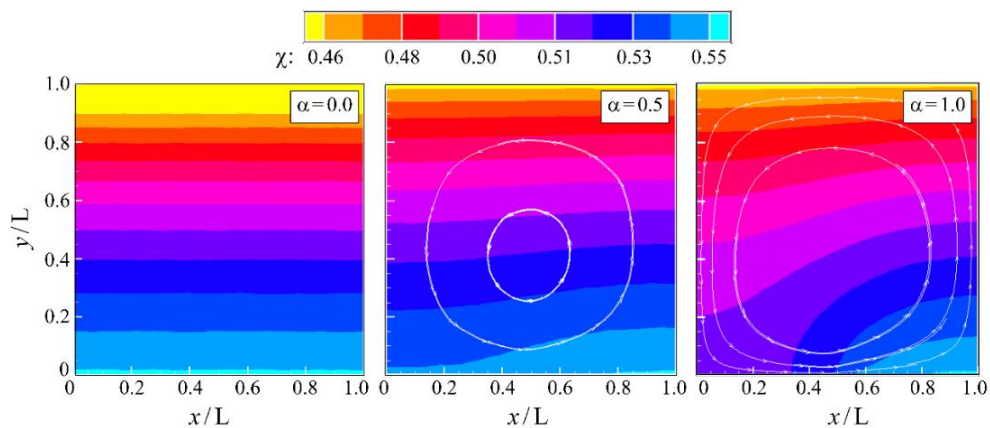
شکل ۴-۵۰ نمای شمایی از هندسه موردنظر



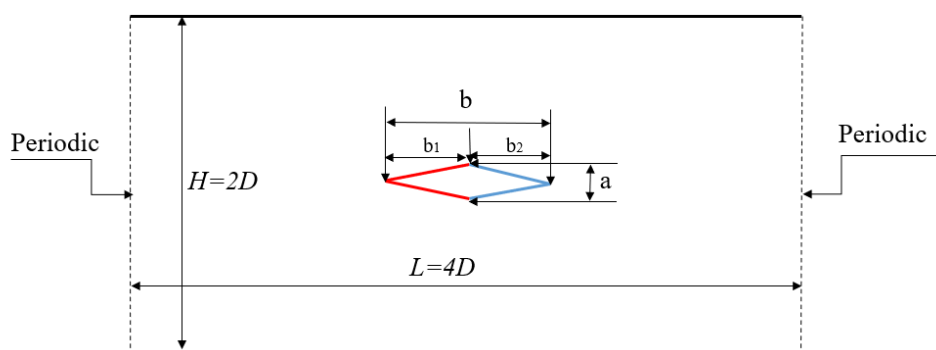
شکل ۴-۵۱ نمای شمایی از ا. مکانیسم‌های جریان، ب. خطوط جریان سرعت پخشی برای هلیوم و زنون در سیستم مورد بررسی



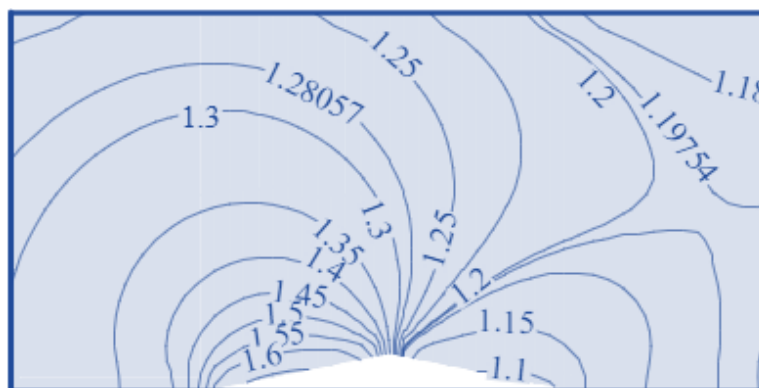
شکل ۴-۵۲ بزرگی سرعت متوسط بی‌بعد شده در عدد نودسن مخلوط مورد بررسی برای: ا. هلیوم، ب. زنون و ج. مخلوط، با تعریف $\hat{U} = |U|/U_{mp,mix}$. شرایط شبیه‌سازی عبارتند از $\Delta T/T_C = 2.0$ و $\alpha_{L,B} = 0$ و $L/D = 1.0$ [۳۰]



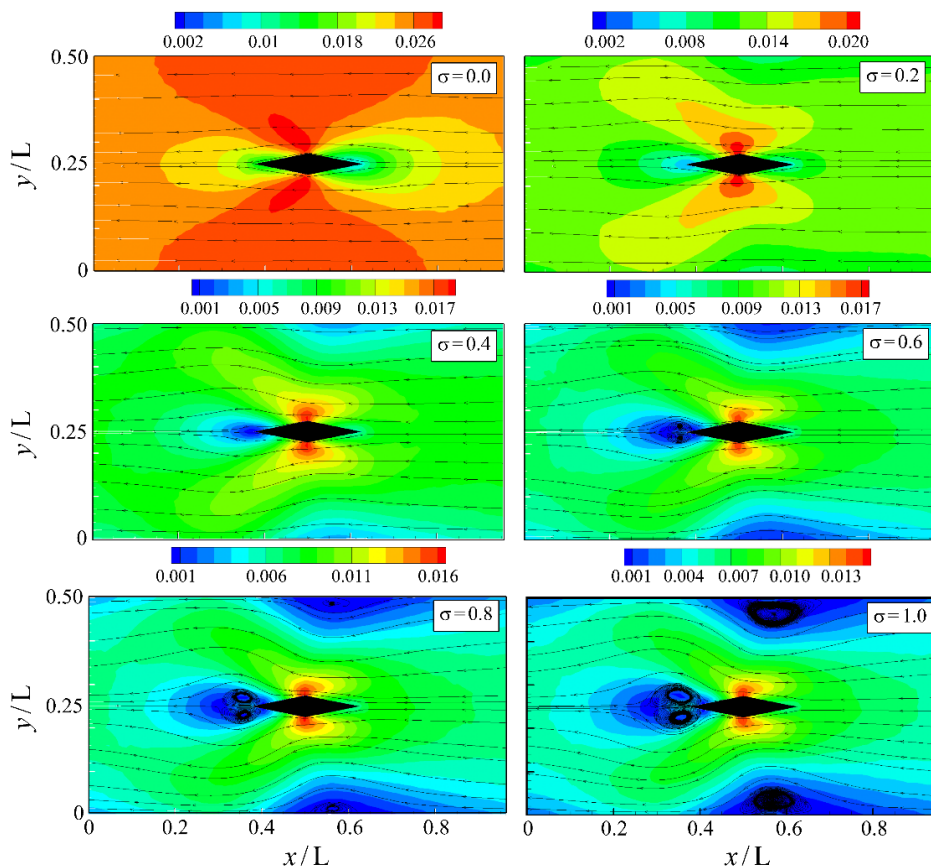
شکل ۴-۵۴ کسر مولی هلیوم در مقادیر مختلف α برای دیواره پایینی-چپ در شرایط $\Delta T/T_c = 2.0$ ، $L/D = 1.0$ ، $Kn_{mix} = 0.05$ [۳۰]



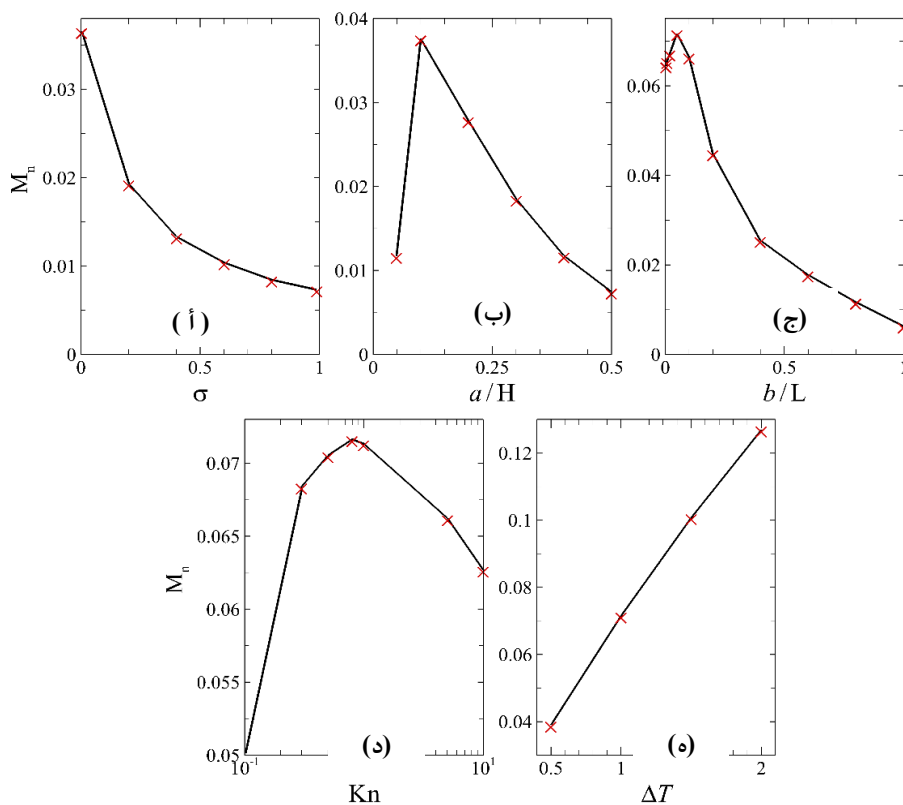
شکل ۴-۵۵ نمای شمایی هندسه مورد بررسی [۳۲]



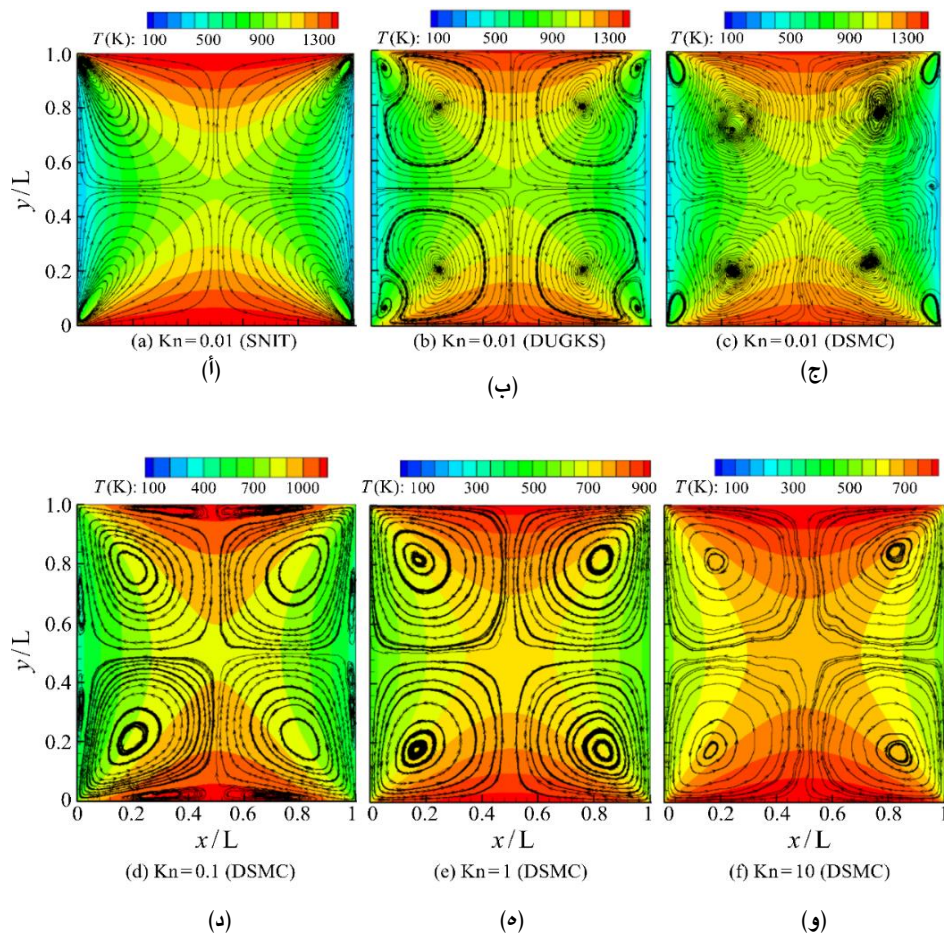
شکل ۴-۵۶ خطوط هم‌دما پیرامون جسم لوزی شکل، $Kn = 1$ [۳۲]



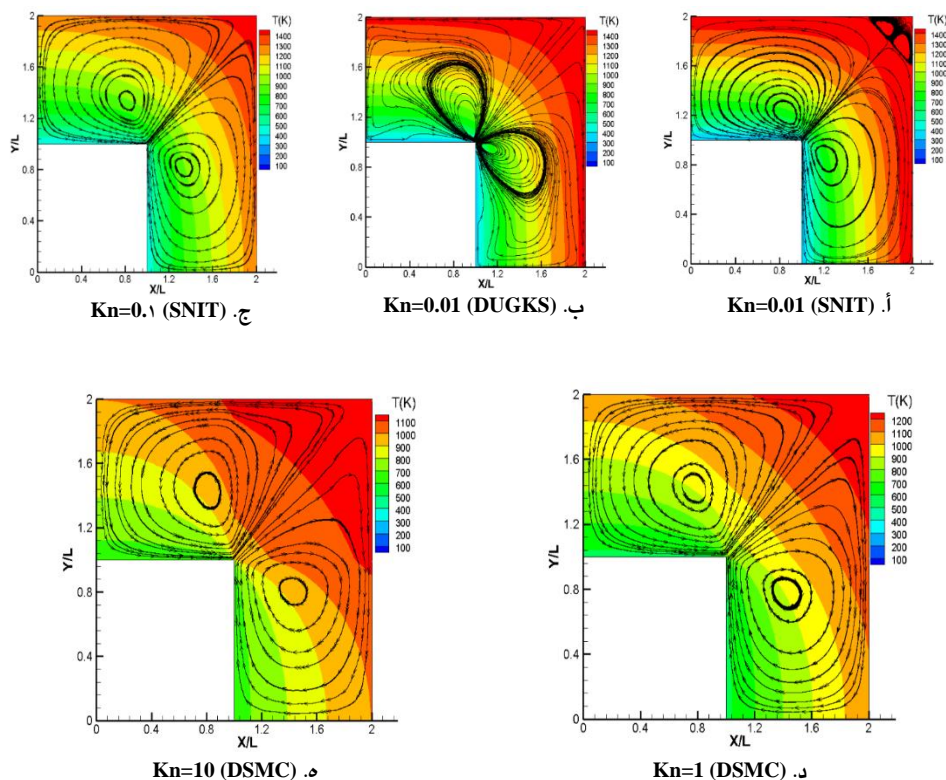
شکل ۴-۵۷ کانتورهای سرعت و خطوط جریان در ضرایب تبادل ممنتم مختلف [۳۲]



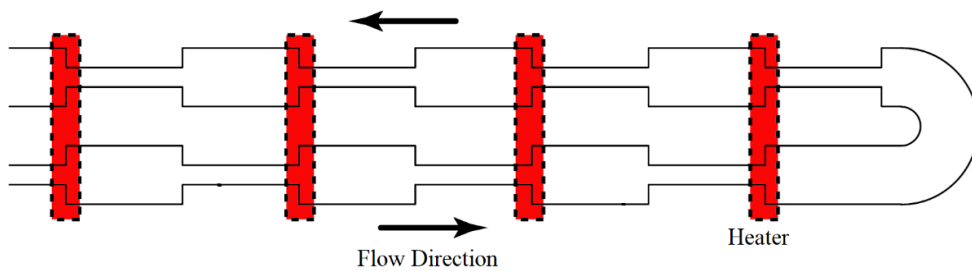
شکل ۴-۵۸ وابستگی دبی جرمی به پارامترهای مختلف: ا. ضریب تبادل ممنتم، ب. ارتفاع، ج. طول، د. عدد نودسن، و ه. اختلاف دما [۳۲]



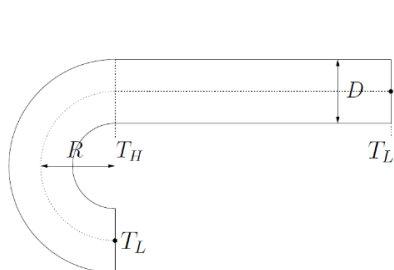
شکل ۴-۶۰ خطوط جریان و کانتور دما در کابوتی مربعی [۳۳]



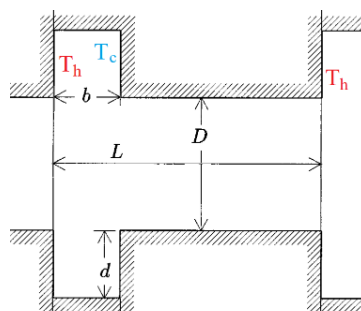
شکل ۴-۶۱ خطوط جریان و کانتور دما در خم مستطیلی $0.01 \leq Kn \leq 10$ [33]



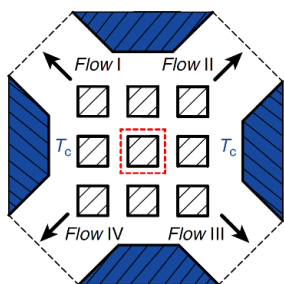
شکل ۴-۶۲ مدل اولیه پمپ نودسنی با جریان لغزش حرارتی (TCF) پیشنهاد شده توسط نودسن [۳۵]



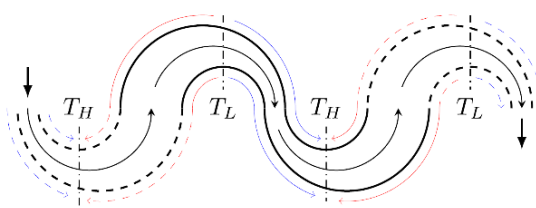
ب. کانال خمیده-مستقیم



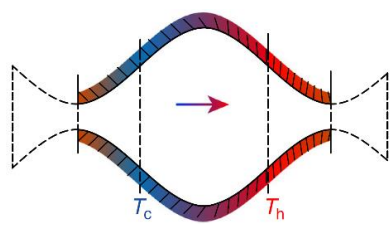
أ. کانال مستطیلی



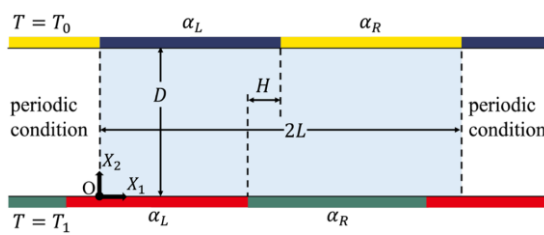
د. کانال ماتریسی (شبکه‌ای)



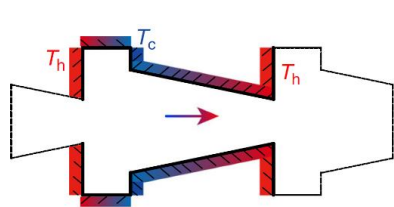
ج. کانال با دو انحنا (خم)



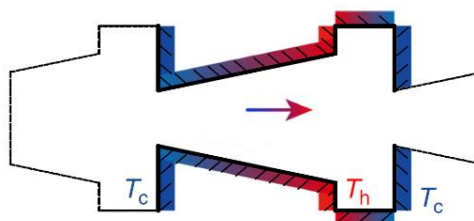
و. کانال سینوسی



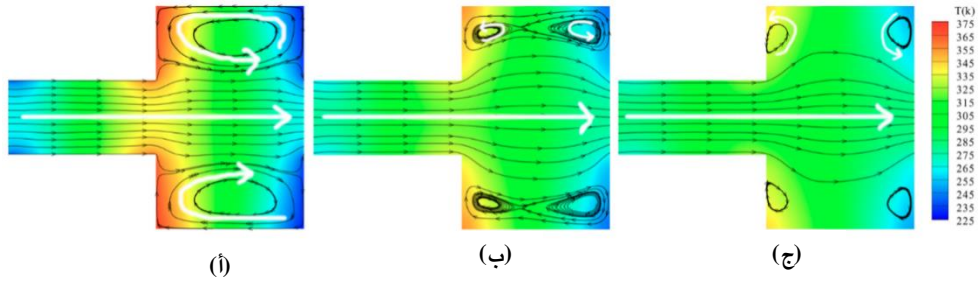
ه. کانال مستقیم با ضریب جذب تناوبی



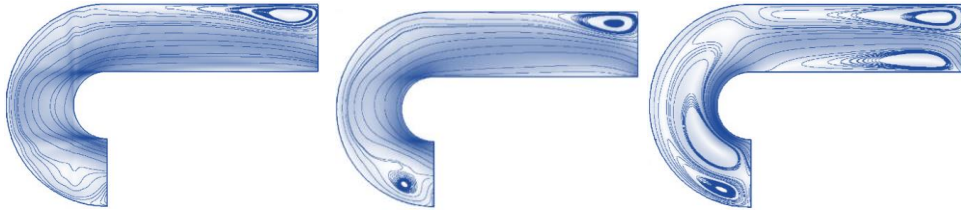
ز. کانال مخروطی



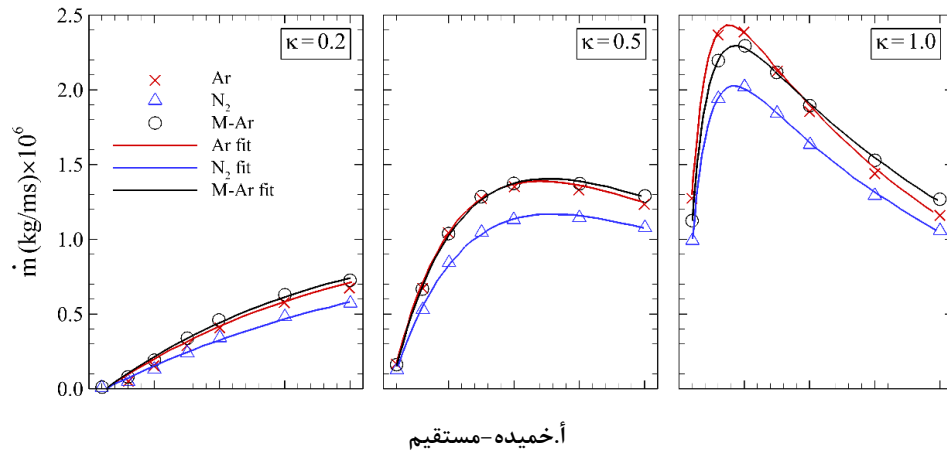
شکل ۴-۶۳ پیکربندی‌های مختلف پیشنهادی برای پمپ‌های نودسنی با جریان لغزش حرارتی (TCF) [۳]



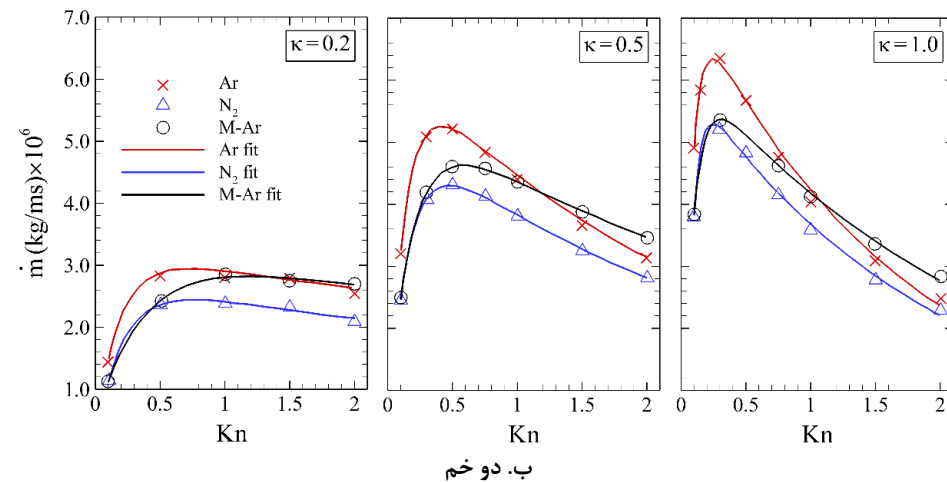
شکل ۴-۶۴ خطوط جریان سرعت و کانتورهای دما برای مخلوط N_2 و O_2 در یک پمپ نودسنی از نوع TCF در رقیق‌شدگی‌های مختلف جریان: ا. $Kn = 0.06$. ب. $Kn = 0.39$. ج. $Kn = 3.87$ [۴۵]



شکل ۴-۶۵ الگوهای جریان در یک پمپ نودسنی نوع TCF با کانال خمیده-مستقیم در اعداد نودسن مختلف: ۱/۰ (سمت چپ)، ۰/۵ (وسط)، و ۰/۱ (سمت راست) [۴۹]

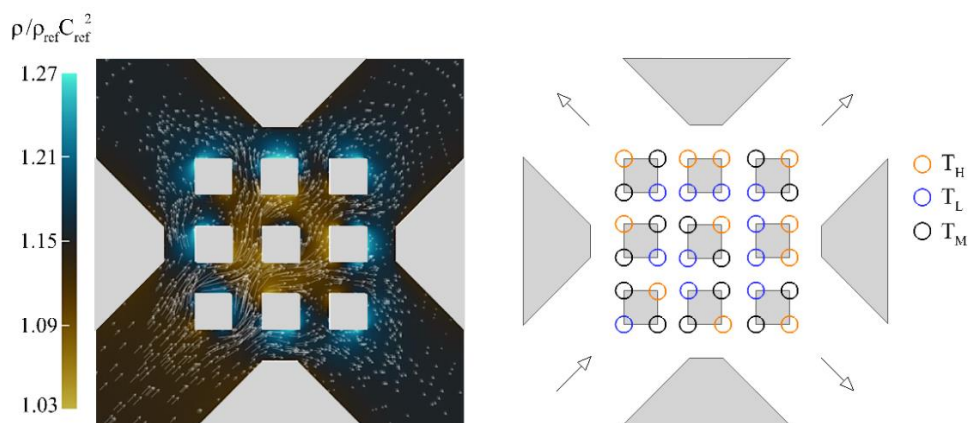


ا. خمیده-مستقیم

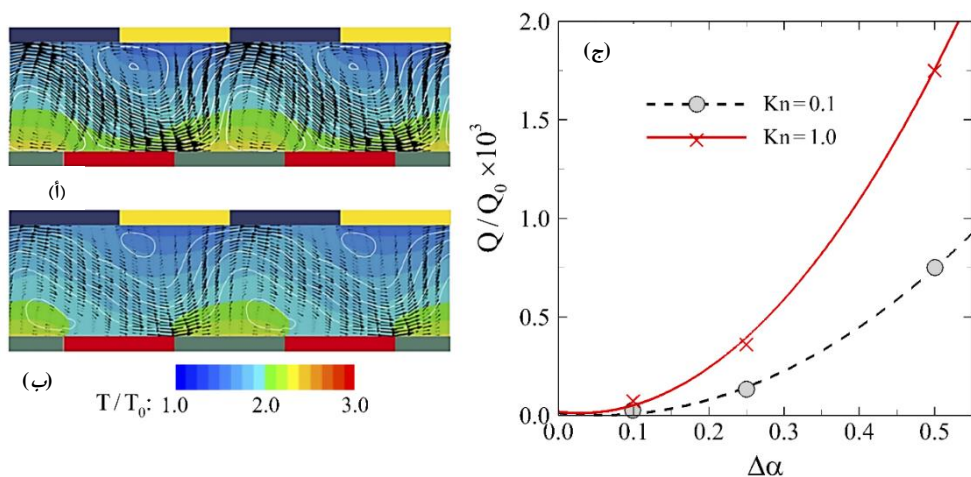


ب. دو خم

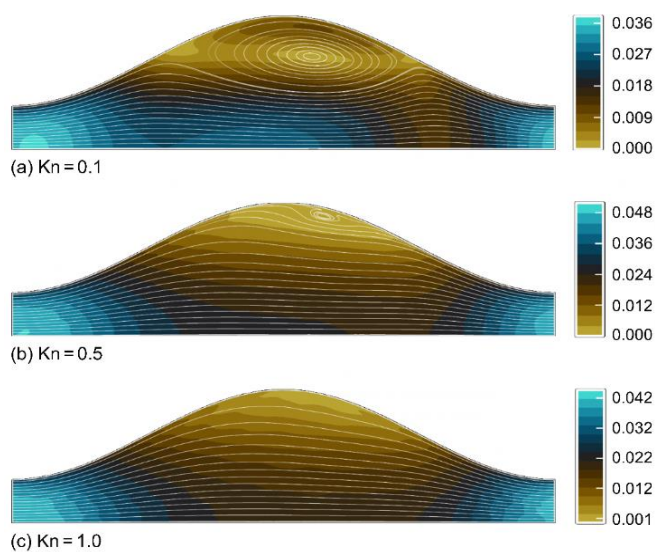
شکل ۴-۶۶ نرخ‌های جرمی بعددار برای هندسه‌های ا. خمیده-مستقیم ب. دو خم [۵۲]



شکل ۴-۶۷. ا. گرادیان فشار و بردارهای جریان ب. پروفایل دما برای یک پمپ نودسنی شبکه‌ای 3x3 از نوع TCF [۵۳]



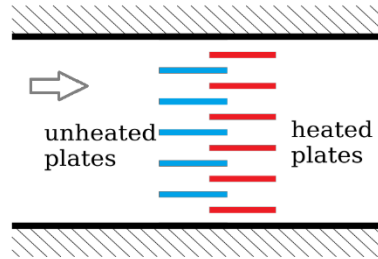
شکل ۴-۶۸. میدان‌های دما و خطوط جریان برای اعداد نودسن ا. ۰٫۵، ب. ۰٫۱، ج. اثر اختلاف ضریب جذب بر نرخ دبی پمپ [۵۴]



شکل ۴-۶۹. کانتورهای سرعت بی‌بعد شده و خطوط جریان برای پمپ نودسنی از نوع سینوسی TCF در رقیق شدگی‌های متفاوت جریان [۵۳]

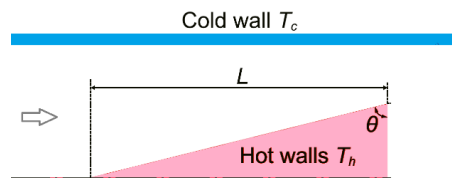
ا. صفحات گرم‌شده و گرم‌نشده [۱۵]

- جهت جریان از چپ به راست است.
- بازده انرژی ۶ برابر بیش از پمپ نودس نی مستطیلی نوع TCF (شکل ۴-۶۳) بهبود یافته است [۱۵].



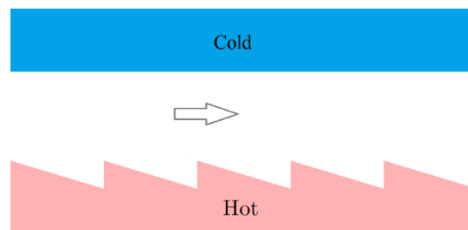
ب. الگوهای گسسته دندانانه ازتهای [۲۴ و ۵۷]

- جهت جریان از چپ به راست است.
- زاویه نوک (tip angle) نقش مهمی در اثر پمپاژ دارد.



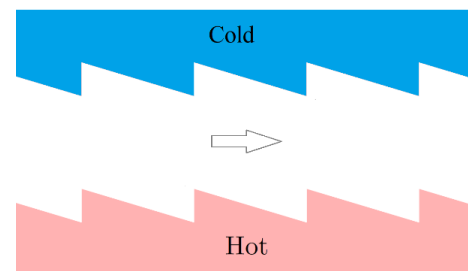
ج. الگوهای پیوسته دندانانه ازتهای [۵۸ و ۶۱]

- جهت جریان از چپ به راست است.
- ساختار از پیچیدگی‌های بیشتری در فرایند ساخت برخوردار است.



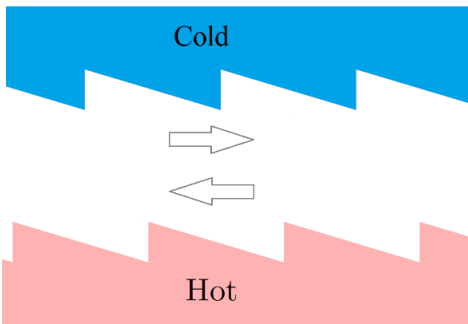
د. الگوهای دوگانه دندانانه ازتهای پیوسته [۵۸ و ۶۰]

- جهت جریان از چپ به راست است.
- نرخ جریان جرمی حرارتی نسبت به حالت (ج) افزایش یافته است.



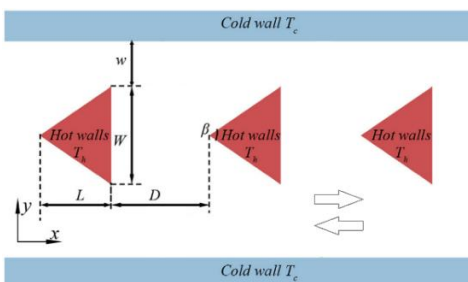
ه. الگوهای دوگانه دندانانه ازتهای پیوسته و ناهم‌تراز [۶۰، ۶۲، ۶۴]

- جهت جریان در اعداد نودسن بالا از چپ به راست است.
- جهت جریان در اعداد نودسن پایین از راست به چپ است.
- نسبت به حالت (د)، نرخ جریان حرارتی القاشده بهبود یافته است.
- امکان کنترل جهت جریان فراهم می‌شود.



و. مانع مثلثی [۶۵]

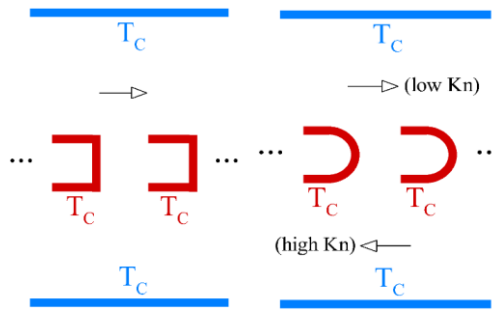
- در اعداد نودسن بالا، جهت جریان از چپ به راست است.
- در اعداد نودسن پایین، جهت جریان از راست به چپ است.



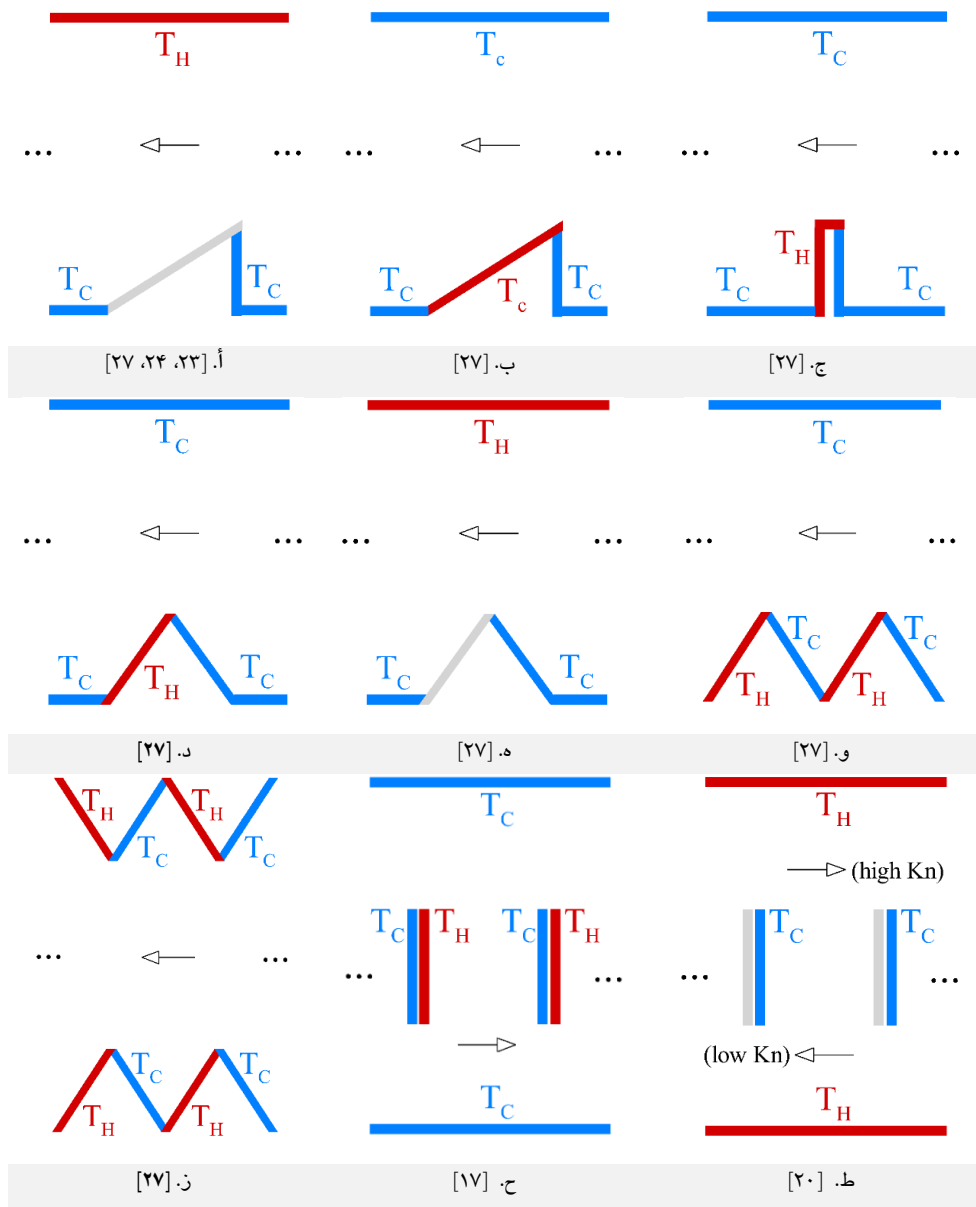
شکل ۴-۷۱ پیکربندی‌های مختلف پمپ‌های نودس‌نی با جریان لبه‌ای حرارتی TEF [۳]

ز. موانع U-شکل [۶۶]

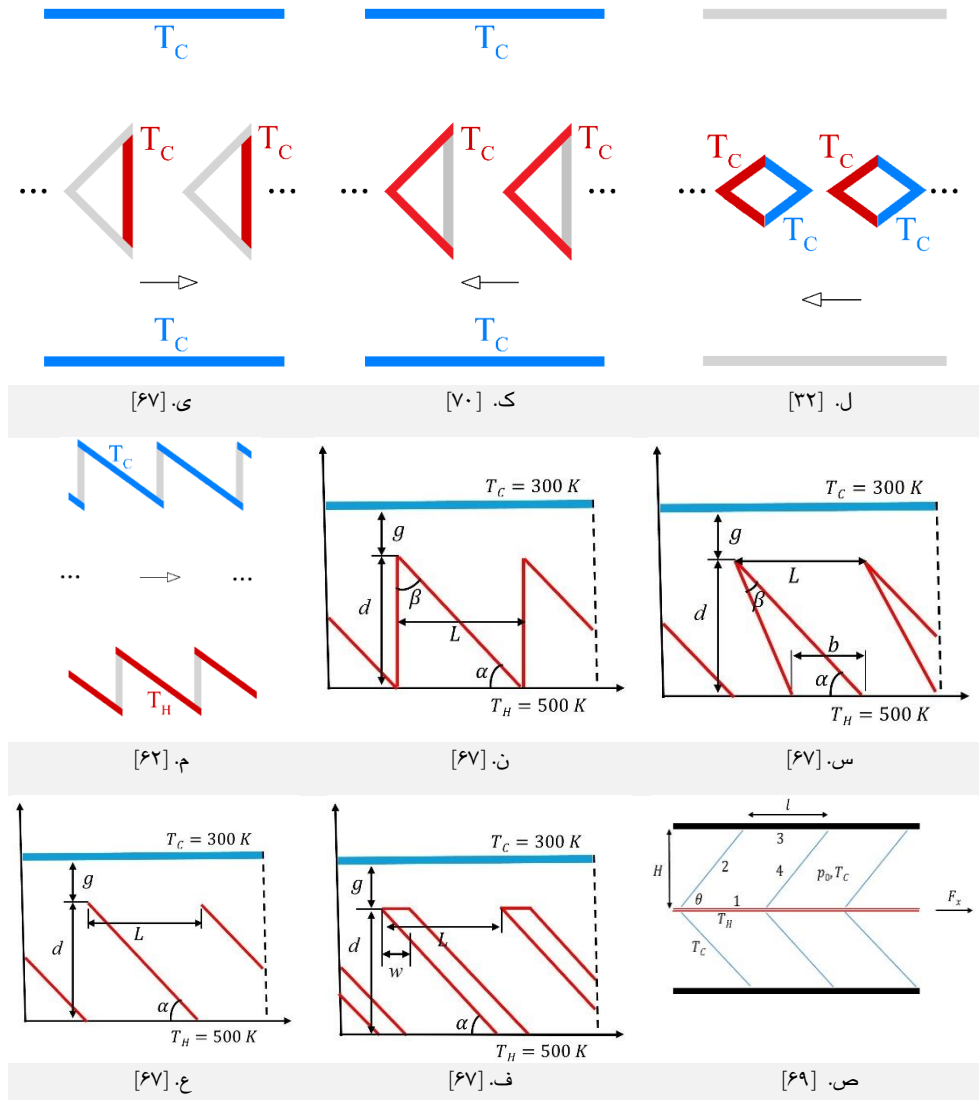
- در نوع مربعی، جهت جریان برای همه اعداد نودسن از چپ به راست است.
- در نوع خمیده، نرخ جریان جرمی در اعداد نودسن بالا ($Kn > 1$) معکوس می‌شود که این امر ناشی از نوعی جریان لبه‌ای حرارتی (یا جریان لبه‌ای آهسته) القاشده در امتداد سطح بیرونی بخش خمیده است.
- در کل، نرخ جریان جرمی در نوع خمیده در همان عدد نودسن بزرگ‌تر است.



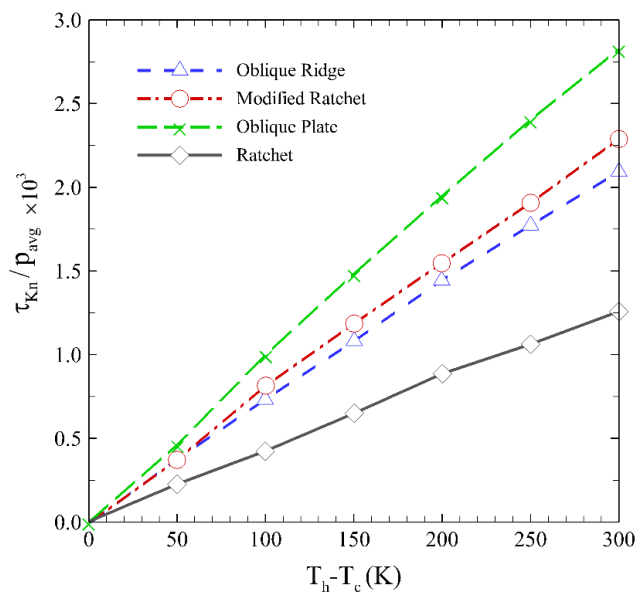
ادامه شکل ۴-۷۱ پیکربندی‌های مختلف پمپ‌های نودسنی با جریان لبه‌ای حرارتی TEF [۳]



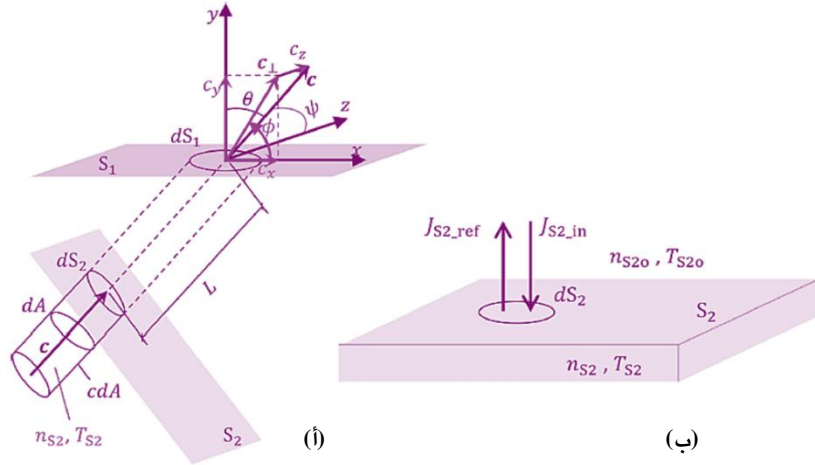
شکل ۴-۷۲ پیکربندی‌های مختلف پمپ‌های نودسنی با جریان رادیومتریک (RF) [۳]



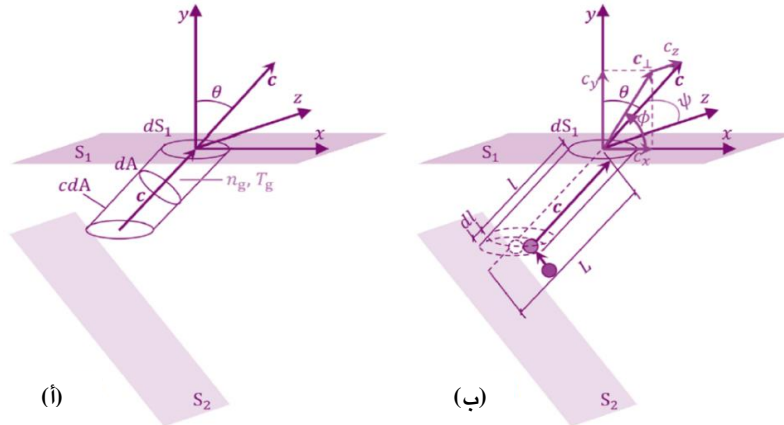
ادامه شکل ۴-۷۲ پیکربندی‌های مختلف پمپ‌های نودسنی با جریان رادیومتریک (RF) [۳]



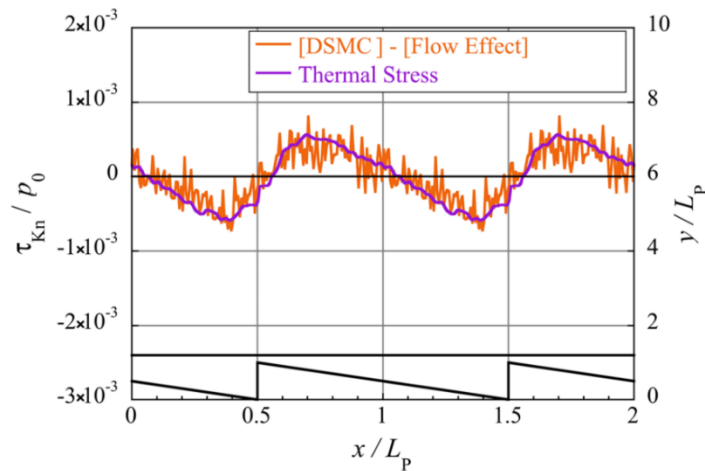
شکل ۴-۷۳ مقایسه تنش‌های مماسی نودسن خالص برای ریزساختارهای سطحی مختلف، در اختلاف‌دماهای متفاوت، در شرایط $Kn=1$ و $2=400 \text{ K} / (T_h + T_c)$ [۶۷]



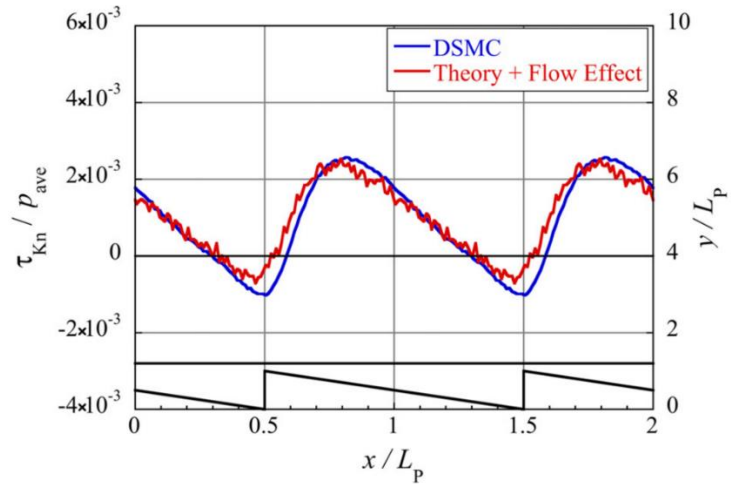
شکل ۴-۷۴ نمای شمایی ا. استوانه‌ای که توسط تمام خطوط مستقیمی که موازی با سرعت c بوده و از منحنی بسته مرزی dS_1 روی S_1 عبور می‌کنند تشکیل شده است، و ب. شار مولکول‌های گاز که به dS_2 روی S_2 برخورد کرده و از آن خارج می‌شوند [۶۸]



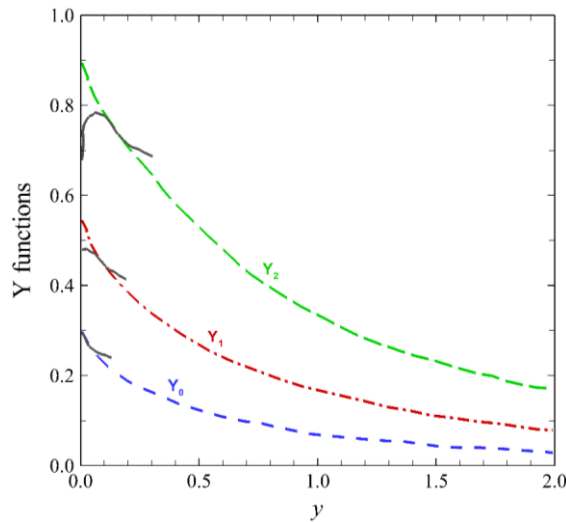
شکل ۴-۷۵ نمای شمایی ا. استوانه‌ای که شامل تمام مولکول‌های کلاس c است، مولکول‌هایی که در بازه زمانی واحد مستقیماً به dS_1 برخورد می‌کنند مگر آنکه برخوردهای بین مولکولی را تجربه کرده باشند؛ و ب. ناحیه‌ای که در آن مولکول‌های کلاس c ، که مستقیماً به dS_1 برخورد می‌کنند، آخرین برخورد بین مولکولی خود را تجربه کرده‌اند [۶۸]



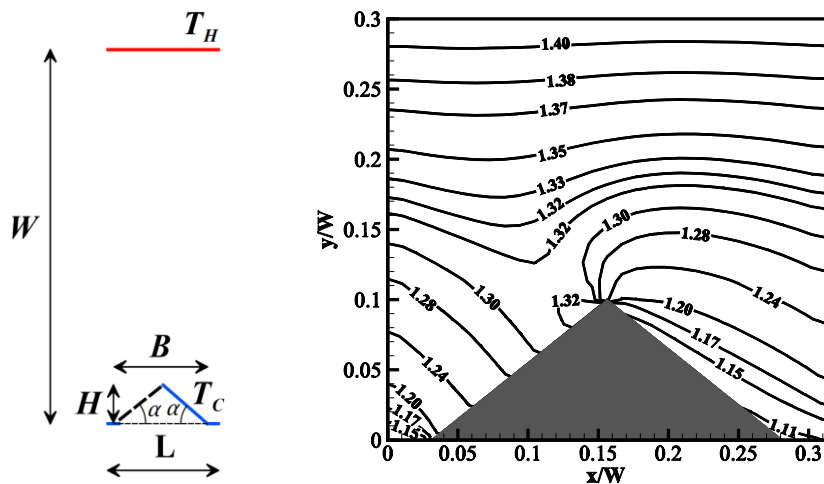
شکل ۴-۷۶ توزیع تنش حرارتی و همچنین توزیع تنش مماسی نودسن که با کسر اثر جریان از نتایج DSMC در $Kn=0.1$ به دست آمده است. در اینجا، p_{ref} به عنوان p_0 برای تنش حرارتی استفاده شده، در حالی که فشار میانگین مکانی به عنوان p_0 برای شبیه‌سازی DSMC و اثر جریان به کار رفته است [۶۸]



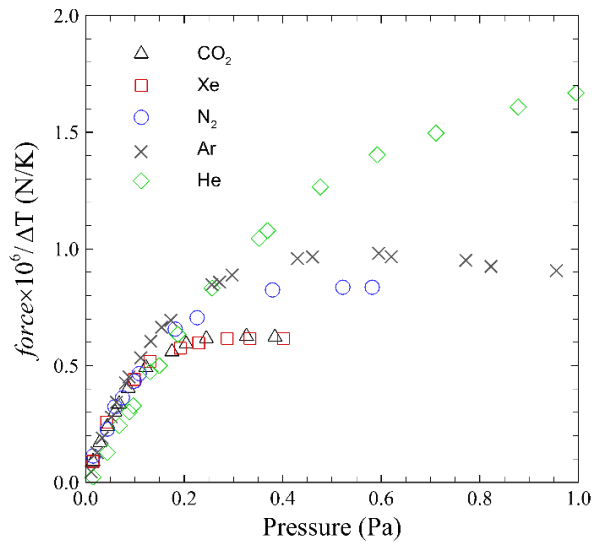
شکل ۴-۷۷ توزیع تنش‌های مماسی نودسن به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی DSMC و همچنین تنش‌ی که با برهم‌نهی نتیجه نظری و سهم اثر جریان به‌دست آمده است، در عدد $Kn=1$ [۶۸]



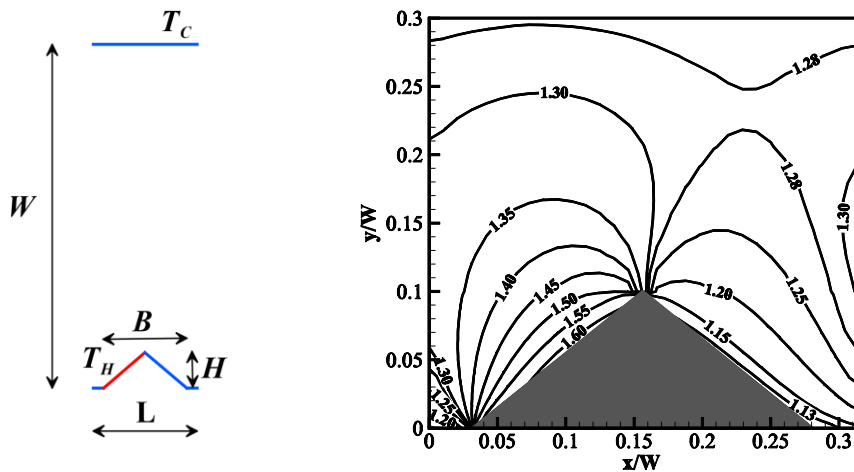
شکل ۴-۷۸ توابع Y [۶]



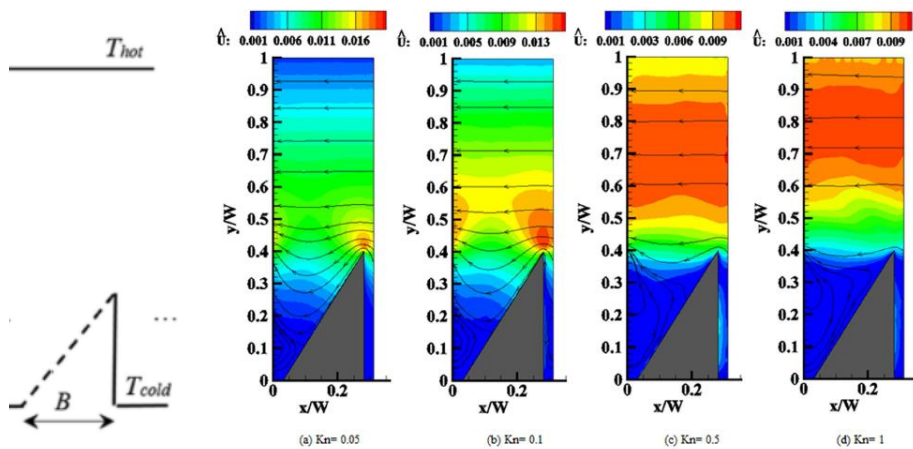
شکل ۴-۷۹ هندسه موردنظر تمرین شماره ۲ [۲۲]



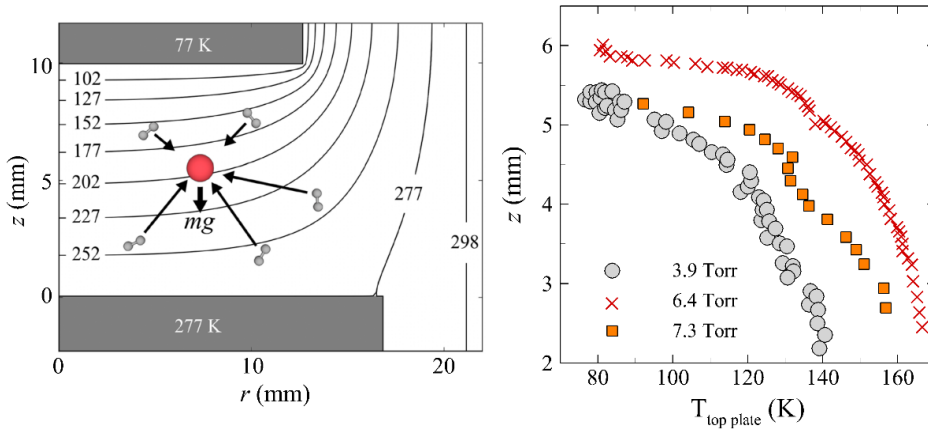
شکل ۴-۸۰ مقادیر اندازه‌گیری شده نیرو برای گونه‌های مختلف گازی در رادیومتر کروک [۱۸]



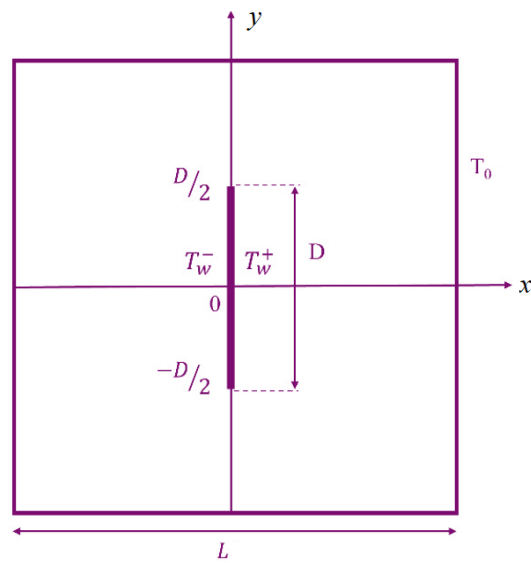
شکل ۴-۸۱ هندسه تمرین ۴ [۲۳]



شکل ۴-۸۲ کانتورهای سرعت و هندسه پمپ رادیومتریک [۲۳]

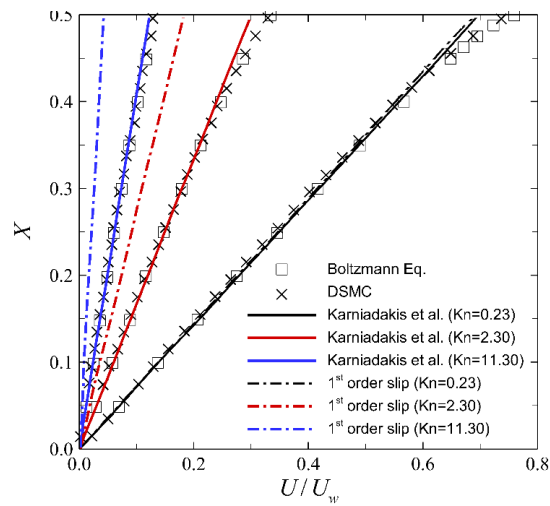


شکل ۴-۸۳ ذره تحت اثر نیروی ترموفورسیس و رسم نیروها برحسب اختلاف دمای صفحات بالا و پایین [۷۳]

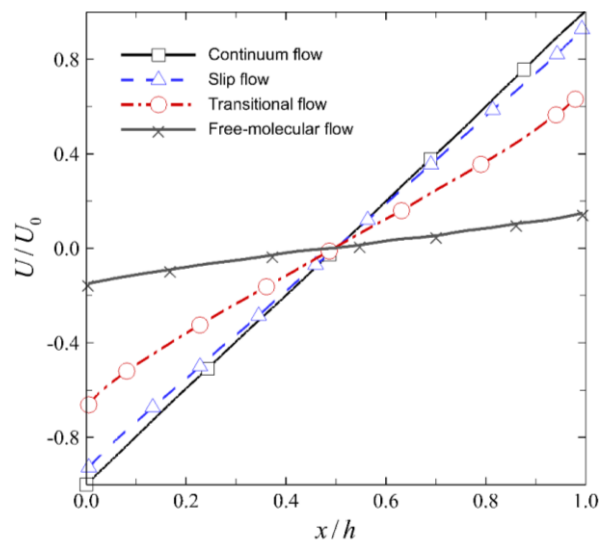


شکل ۴-۸۴ صفحه تخت با شرایط دمایی متفاوت [۱۶]

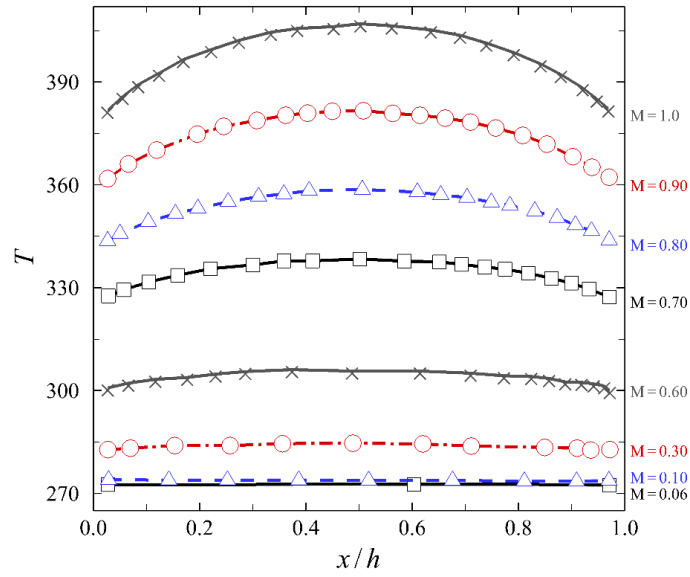
جریان کوئت و جریان فوريه



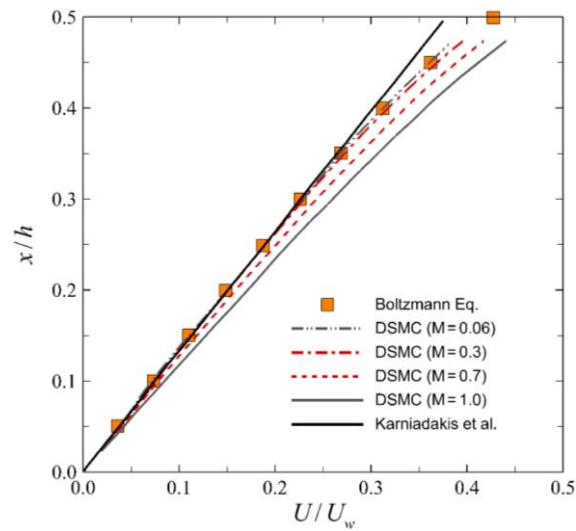
شکل ۳-۵ نمودار سرعت در نیمه بالایی کانال جریان کوئت در اعداد نودسن مختلف، مقایسه مدل کارنیاداکیس و همکاران با معادله لغزش مرتبه اول، نتایج DSMC و حل معادله بولتزمن [۱]



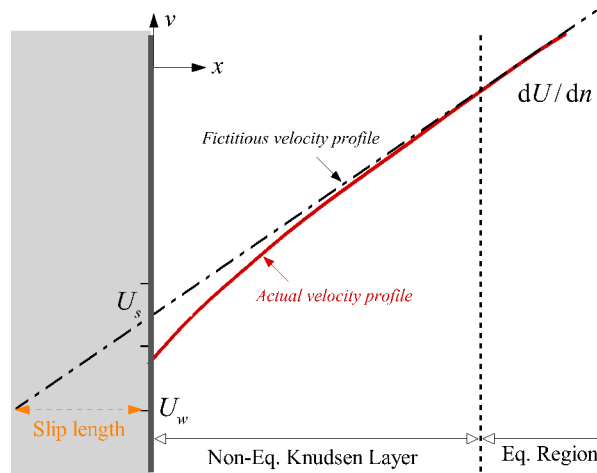
شکل ۴-۵ نمودار سرعت در جریان کوئت در سه رژیم پیوسته، لغزشی و گذرا [۲]



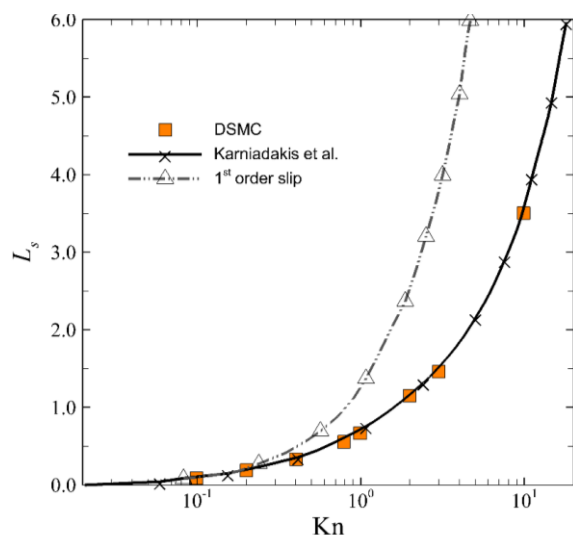
شکل ۵-۵ توزیع دما برحسب مکان در اعداد ماخ مختلف [۱]



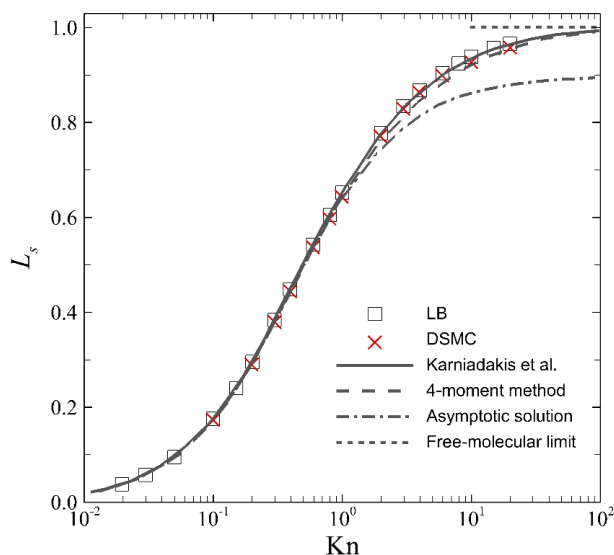
شکل ۵-۶ نمودار سرعت در نیمه بالایی کانال در اعداد ماخ مختلف دیواره، مقایسه نتایج تحلیلی با حل معادله بولتزمن [۱]



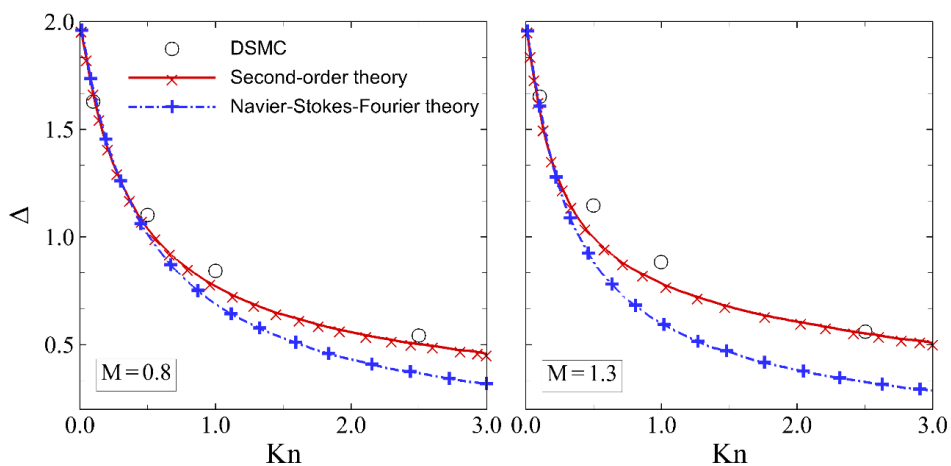
شکل ۵-۷ نمایش طول لغزش



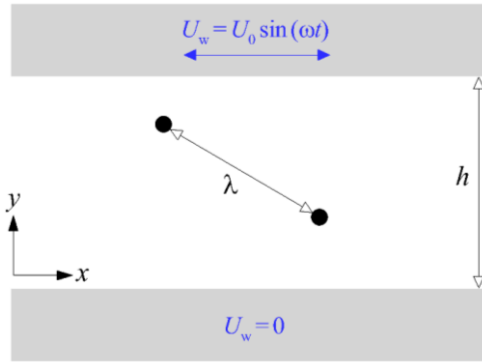
شکل ۵-۸ طول لغزش برحسب عدد نودسن، [۸].



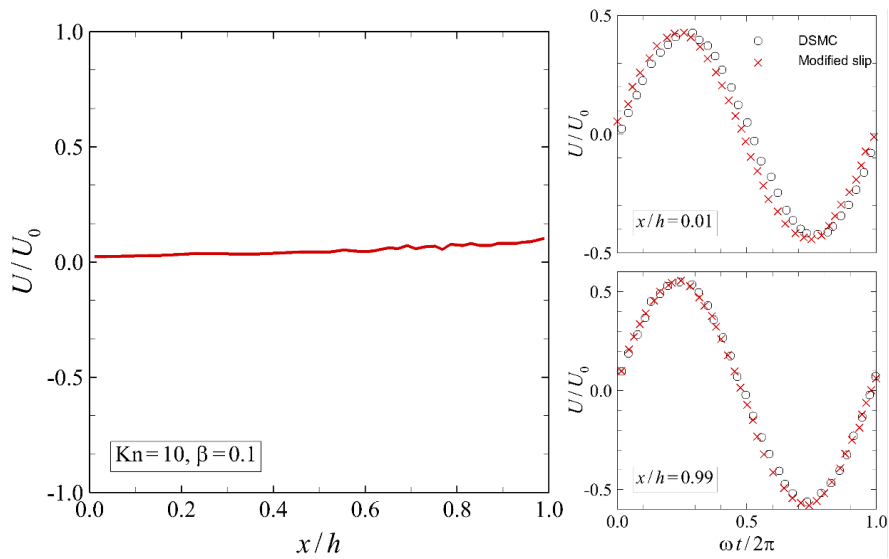
شکل ۹-۵ مقایسه تنش برشی از مدل باهاکودمی و بسکوک با مدل سونه، نتایج بولتزمن خطی شده، روش ۴- ممان، نتایج رژیم مولکولی آزاد و نتایج DSMC [۹]



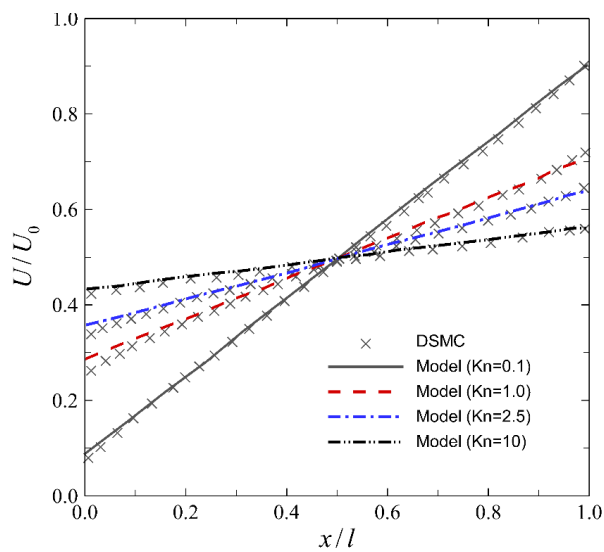
شکل ۱۰-۵ شیب سرعت L بر حسب عدد نودسن در جریان گاز کوئت صفحه‌ای ($M=0.8, 1.3$, $\sigma_{V_c}=0.8$, $\sigma_{T_c}=1.2$) مدل ماسکول، نتایج DSMC حاضر با استفاده از کد کوئت برد به دست آمده است. [۱۱]



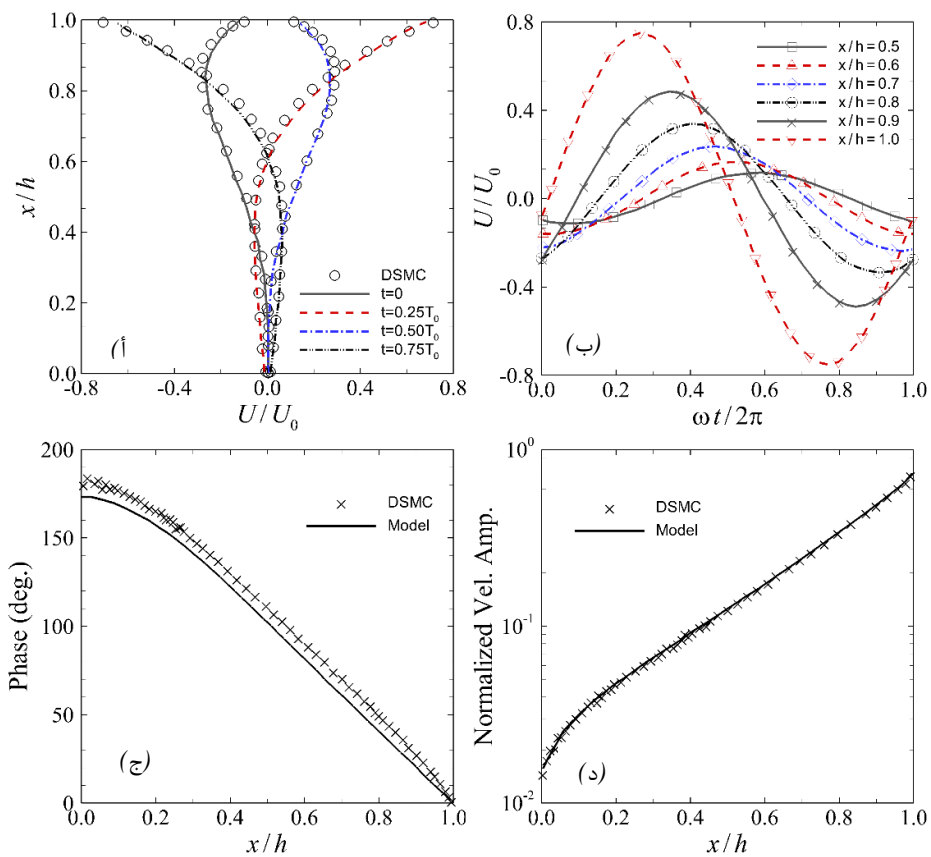
شکل ۵-۱۱ شمایی جریان کوئت نوسانی



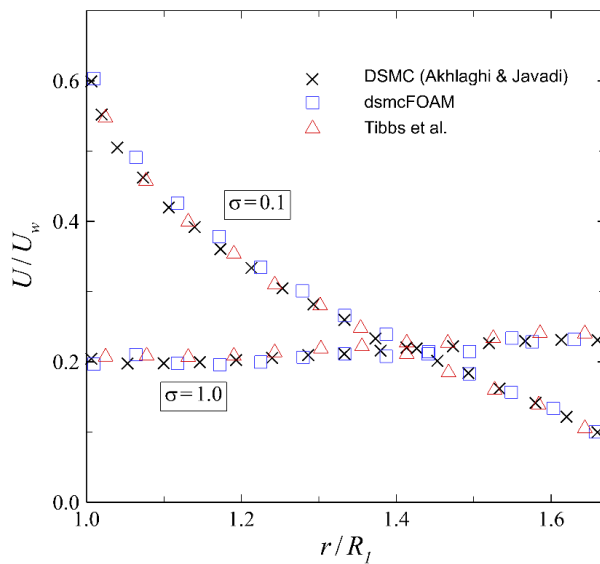
شکل ۵-۱۲ نمودار سرعت در یک مکان و یک زمان ثابت [۱]



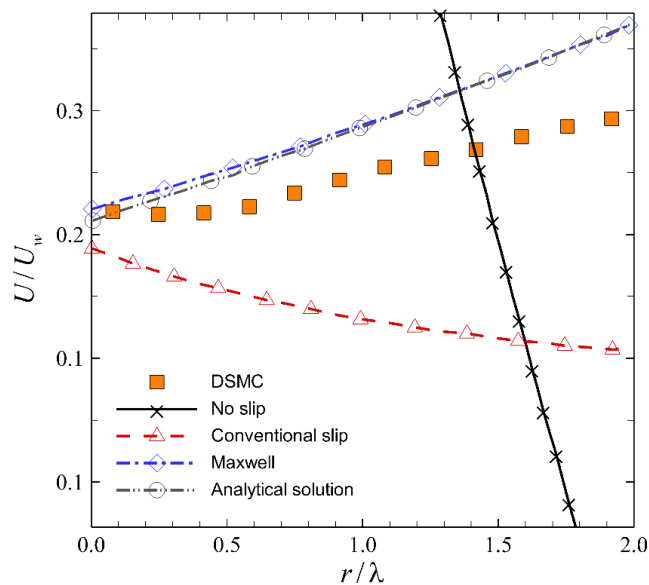
شکل ۵-۱۳ نمودار سرعت برحسب مکان در اعداد نودسن مختلف [۱]



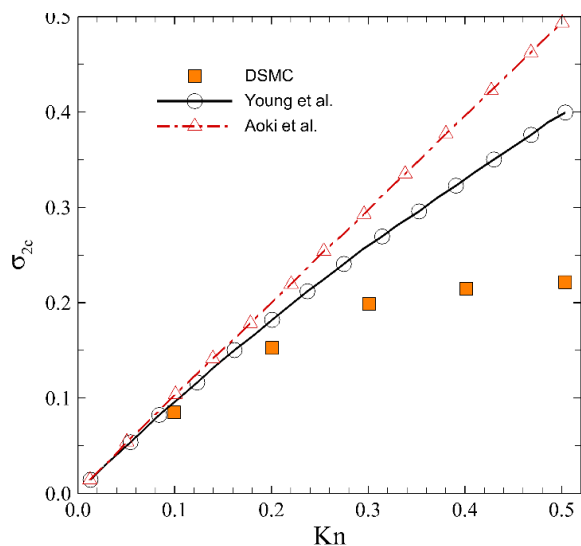
شکل ۵-۱۴ جزئیات دینامیک جریان در $Kn=0.1$ و $\beta=5$ ، ا. پاسخ دینامیکی محیط، (ب) تاریخچه سرعت در نقاط مختلف، (ج) تغییرات فاز در سراسر محیط، و (د) نمودار لگاریتمی دامنه سرعت [۱]



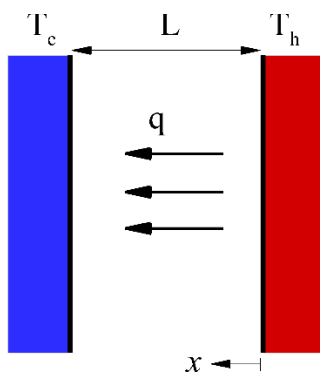
شکل ۵-۱۶ توزیع سرعت در مسئله کوئت استوانه‌ای [۱۳]



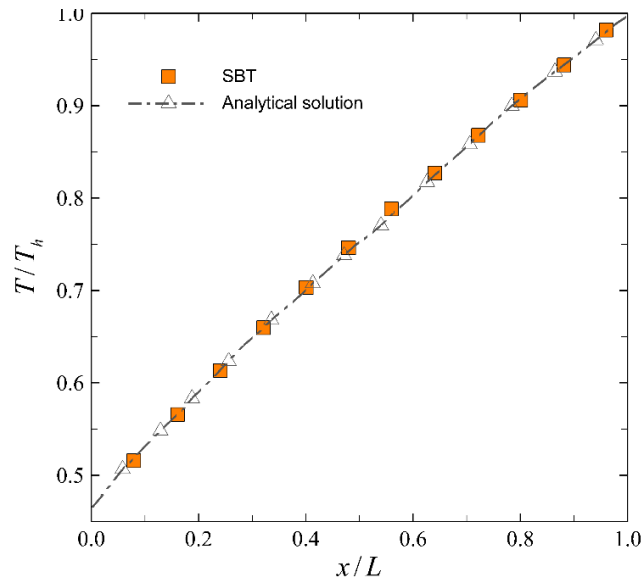
شکل ۱۷-۵ توزیع سرعت در مسئله کوئت استوانه‌ای از شرایط مرزی مختلف و روش DSMC [۱۲]



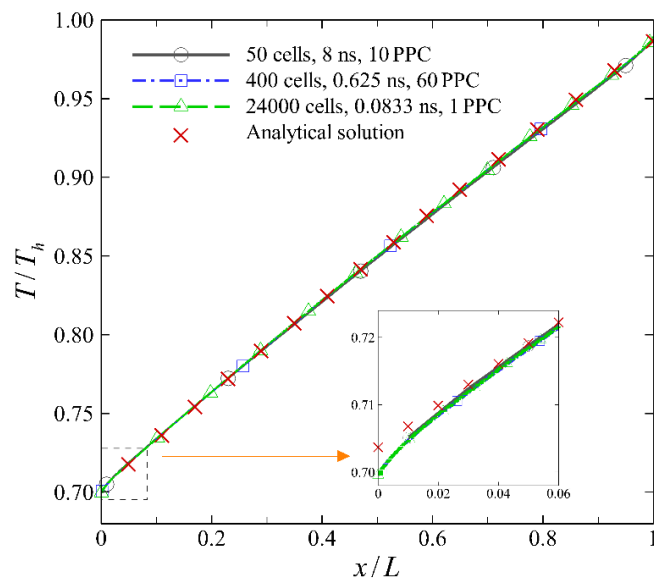
شکل ۱۸-۵ ضریب تبادل ممتنم بحرانی در اعداد نودسن کمتر از ۰/۵ [۱۵]



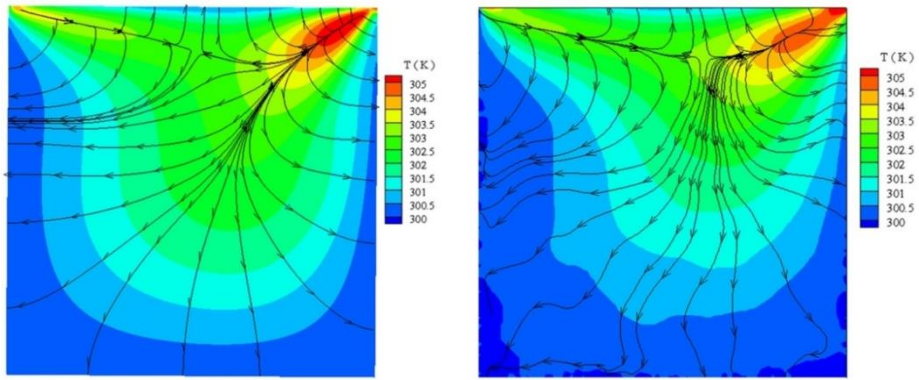
شکل ۱۹-۵ هندسه و شرط مرزی در جریان فوریه



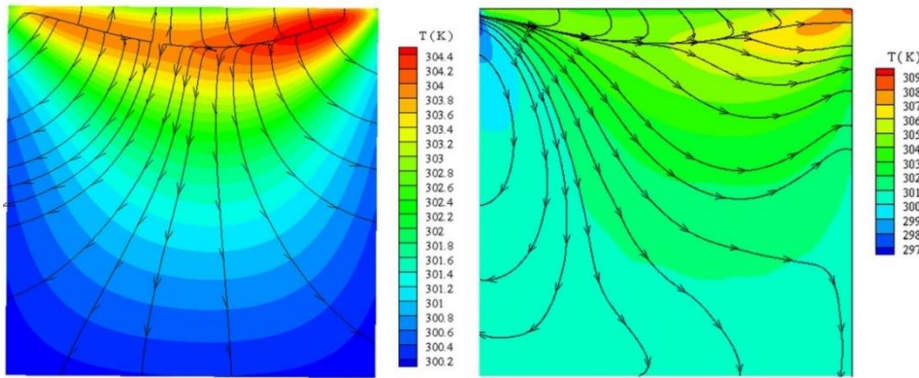
شکل ۲۰-۵ مقایسه بین حل روش مولکولی DSMC برای توزیع دما دیواره در $Kn=0.001$, $\Delta T=200$ K با حل تحلیلی فوریه [۷۷]



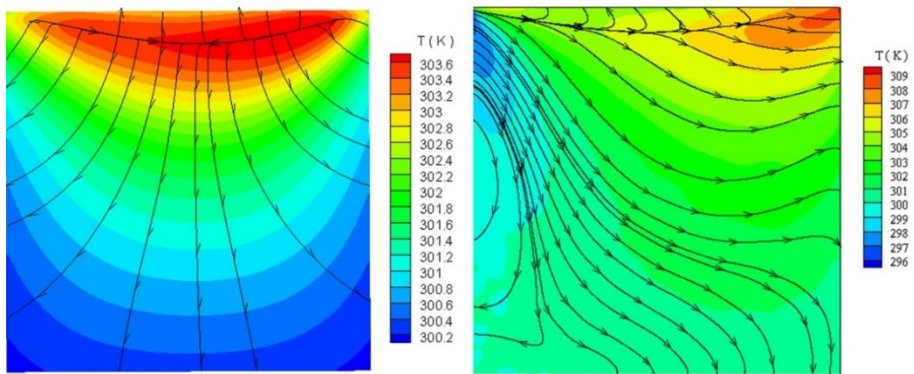
شکل ۲۱-۵ مقایسه بین حل روش مولکولی DSMC برای توزیع دما دیواره در $Kn=0.024$, $\Delta T=200$ K با حل تحلیلی فوریه [۷۷]



ا. $Kn=0.005$

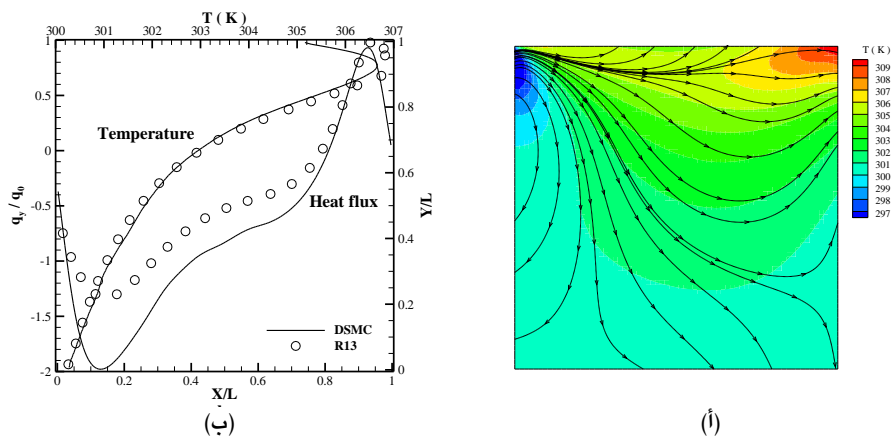


ب. $Kn=0.05$

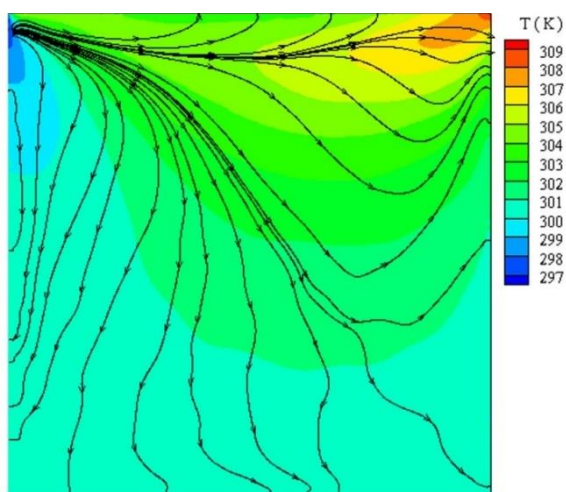


ج. $Kn=0.1$

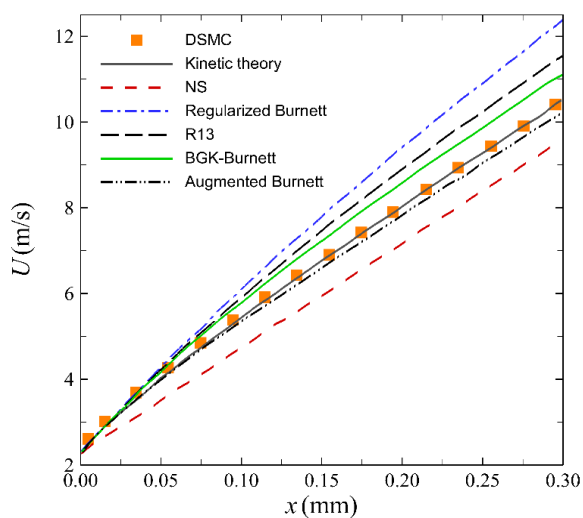
شکل ۵-۲۶ خطوط شار حرارتی رسانشی ترسیم‌شده بر روی کانکتور دما؛ ستون سمت چپ: NS، ستون سمت راست: DSMC [۲۶]



شکل ۵-۲۷. خطوط شار حرارتی به دست آمده با استفاده از معادلات کامل R13؛ (ب) مقایسه شار حرارتی عمودی و پروفیل دما در راستای $x/L=0.8$ و $y/L=0.8$ بر اساس نتایج DSMC و R13 [۲۶]

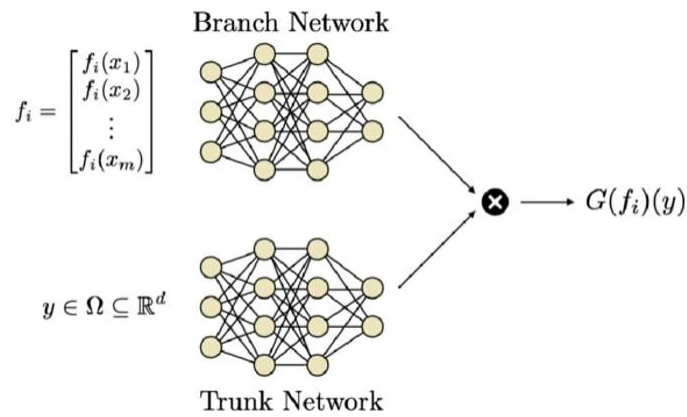


شکل ۵-۲۸. خطوط انتقال حرارت به دست آمده در $Kn=0.05$ بر اساس رابطه شار حرارتی در نظریه مجانبی معادله بولتزمن سونه [۴].

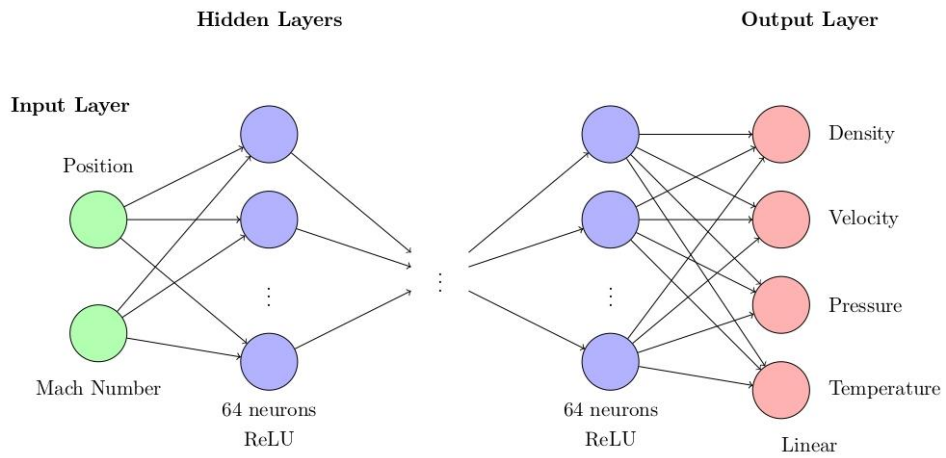


شکل ۵-۲۹. توزیع سرعت در مسئله کرامر از روش‌های مختلف [۳۷]

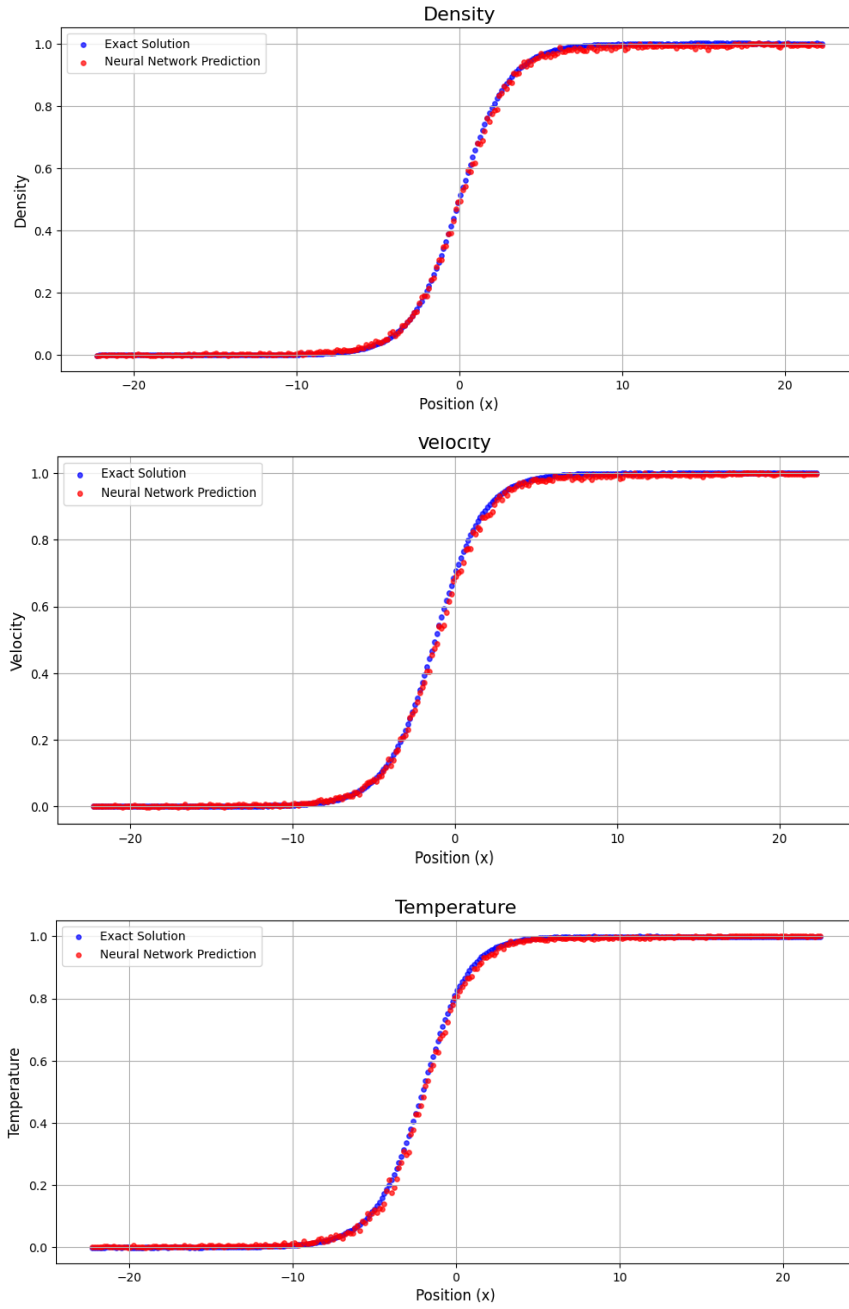
کاربرد یادگیری ماشین در تحلیل جریان‌های میکرونانو



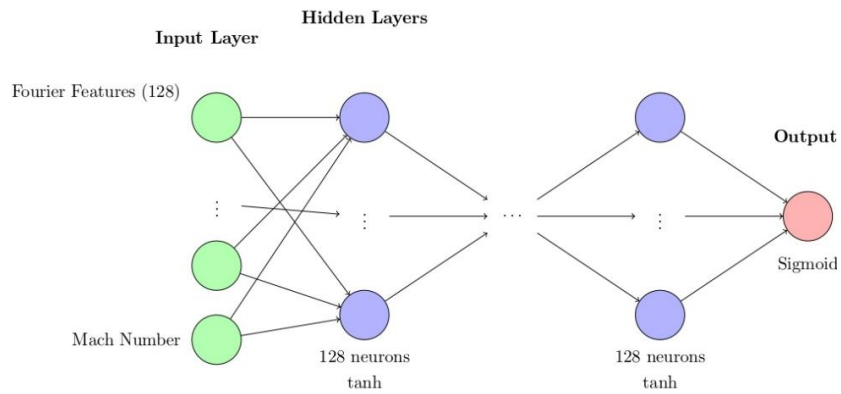
شکل ۶-۱ نمای شمایی شبکه عصبی DeepONet



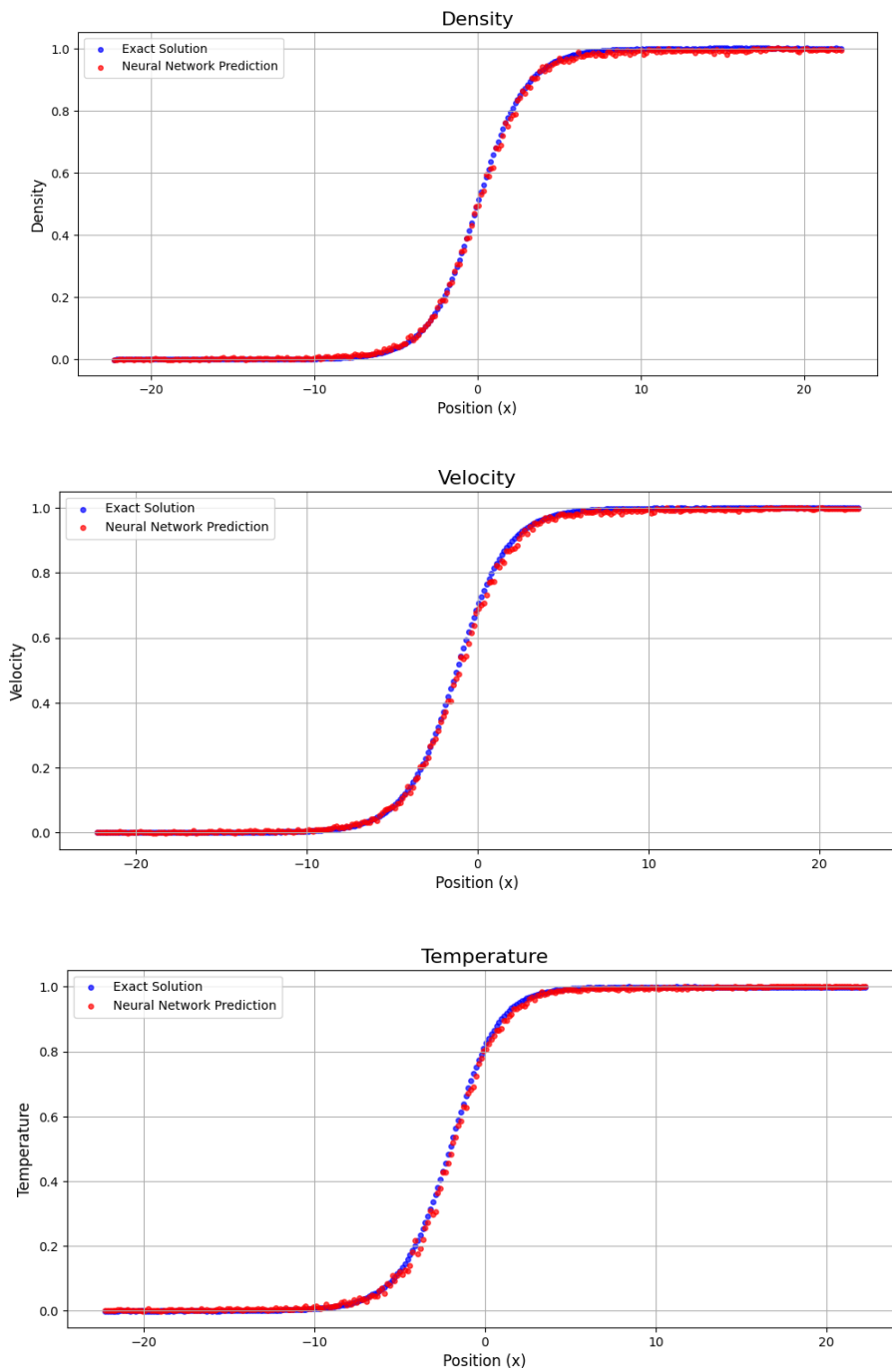
شکل ۶-۲ نمای شمایی معماری شبکه عصبی عمیق پیش‌خور



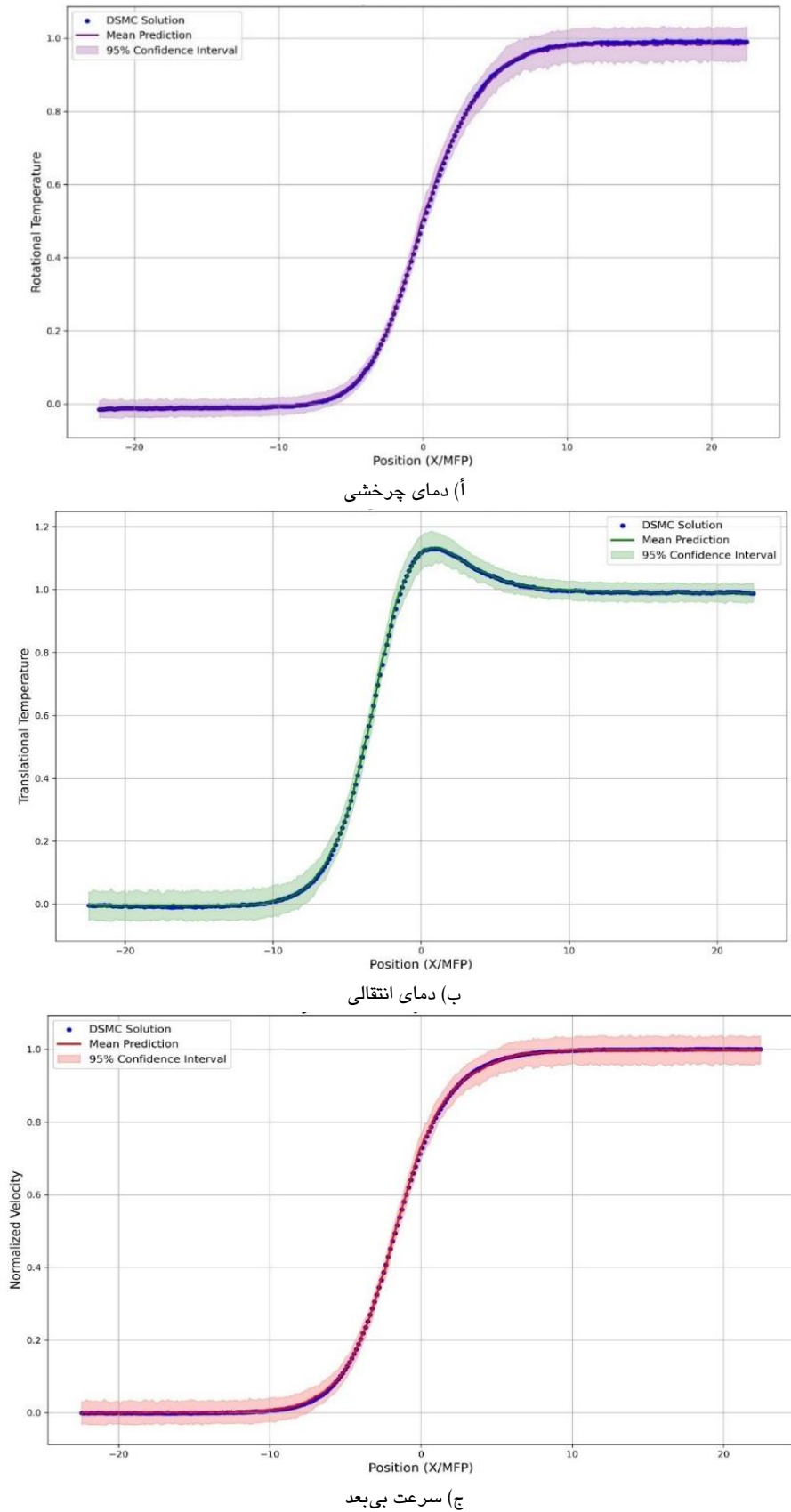
شکل ۳-۶ پیش‌بینی شبکه‌ی عصبی عمیق (DNN) برای چگالی، سرعت و دما در موج ضربه‌ای با عدد ماخ ۱/۷



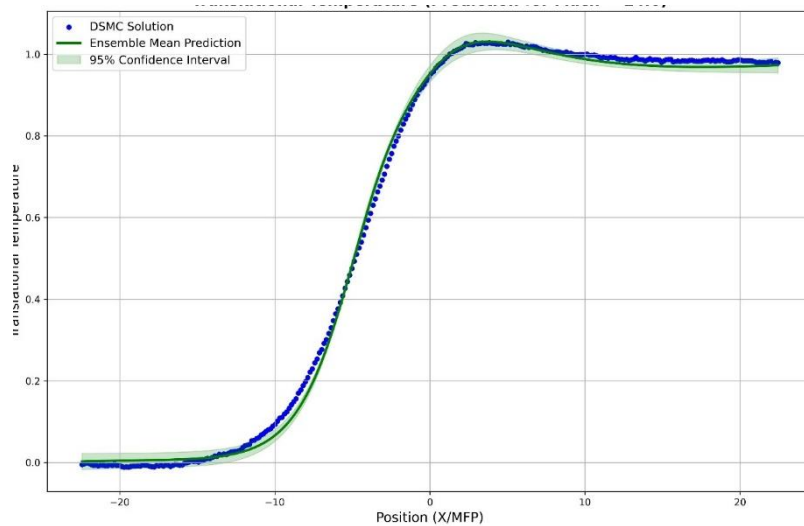
شکل ۴-۶ ساختاری شبکه‌ی عصبی به‌کاررفته بر پایه نگاشت فوریه برای برون‌یابی موج ضربه‌ای.



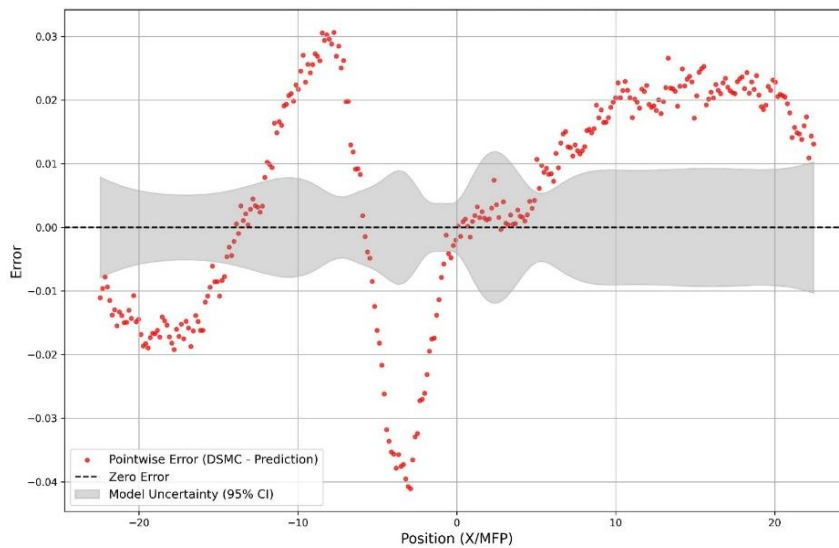
شکل ۶-۵ پیش‌بینی شبکه عصبی عمیق (DNN) برای چگالی، سرعت و دما در موج ضربه‌ای با عدد ماخ ۲



شکل ۶-۶ پیش‌بینی DeepONet از T_{tr} , T_{rot} و سرعت بی‌بعد برای موج ضربه‌ای با عدد ماخ ۱.۷.

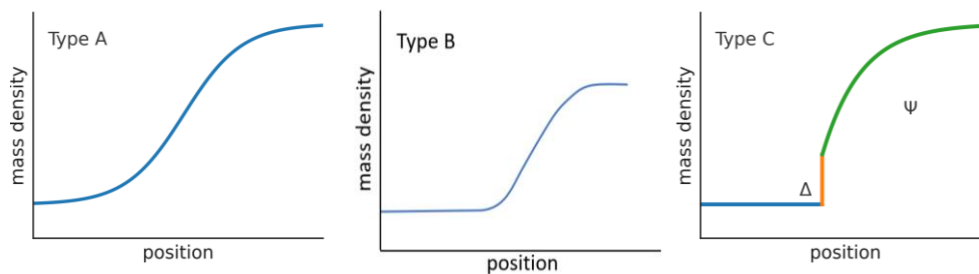


أ) سرعت انتقالی

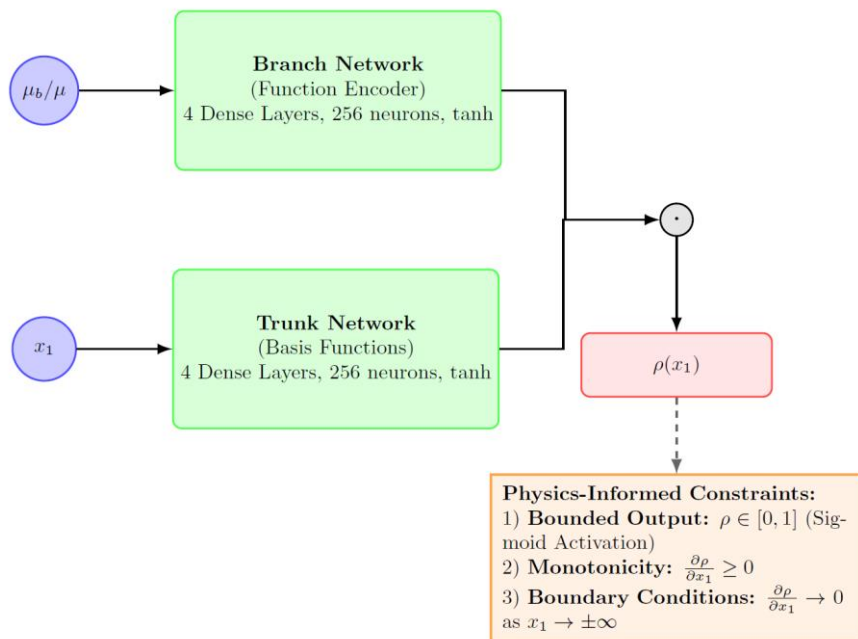


ب) خطای پیش‌بینی T_{tr} در موقعیت‌های بی‌بعد شده.

شکل ۶-۷ برون‌یابی DeepONet برای دمای انتقالی موج ضربه‌ای در عدد ماخ ۰.۴۱.



شکل ۶-۸ سه نوع ساختار موج ضربه‌ای در یک گاز رقیق چنداتی. برای موج‌های ضربه‌ای بسیار ضعیف (أ)، پروفیل تقریباً متقارن (ب)، پروفیل نامتقارن (ج)، ساختار دولایه‌ای

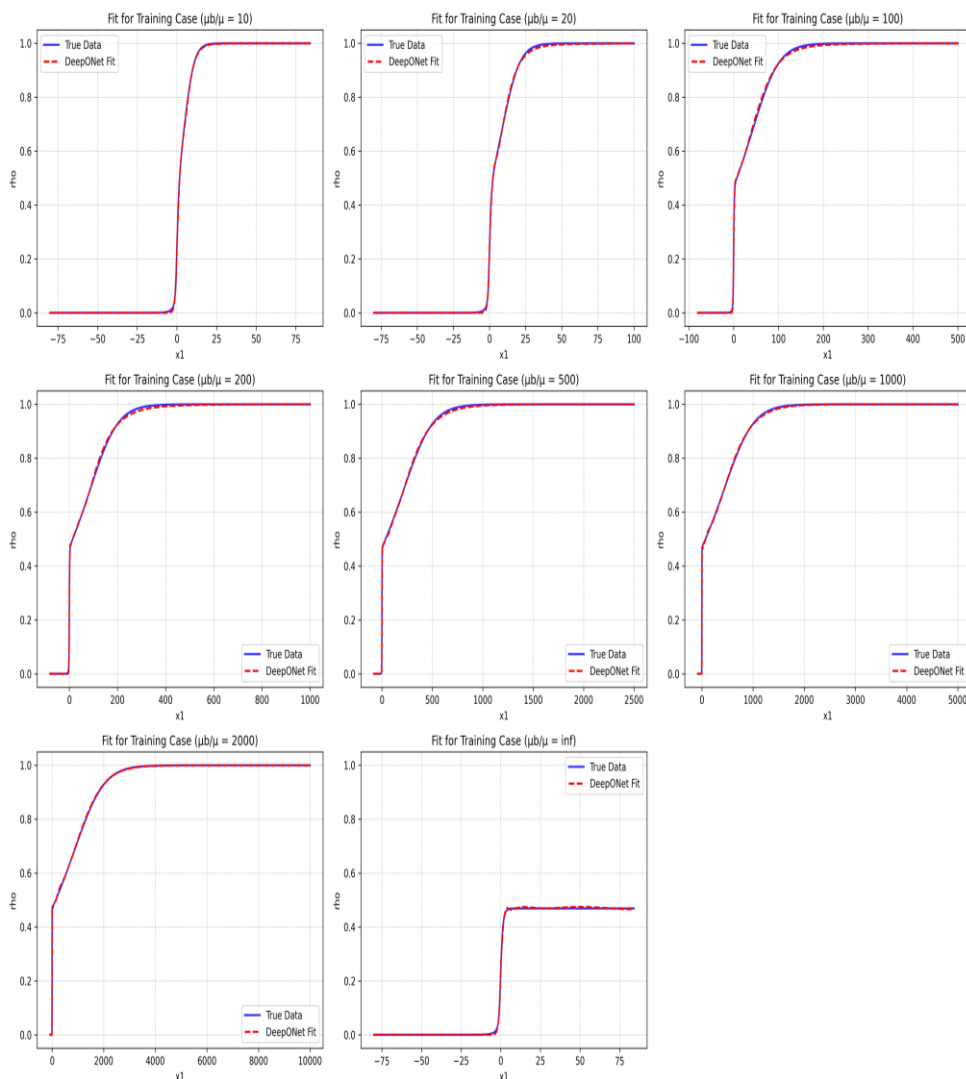


شکل ۶-۹ شمایی از DeepONet مبتنی بر فیزیک برای پیش‌بینی چگالی در موج ضربه‌ای گاز چند اتمی

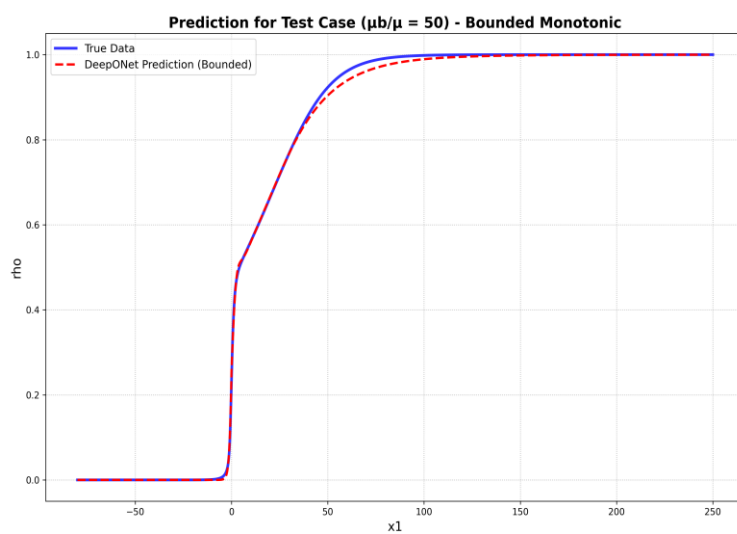


شکل ۶-۱۰ روند خطای آموزش و اعتبارسنجی در طول دوره‌ها.

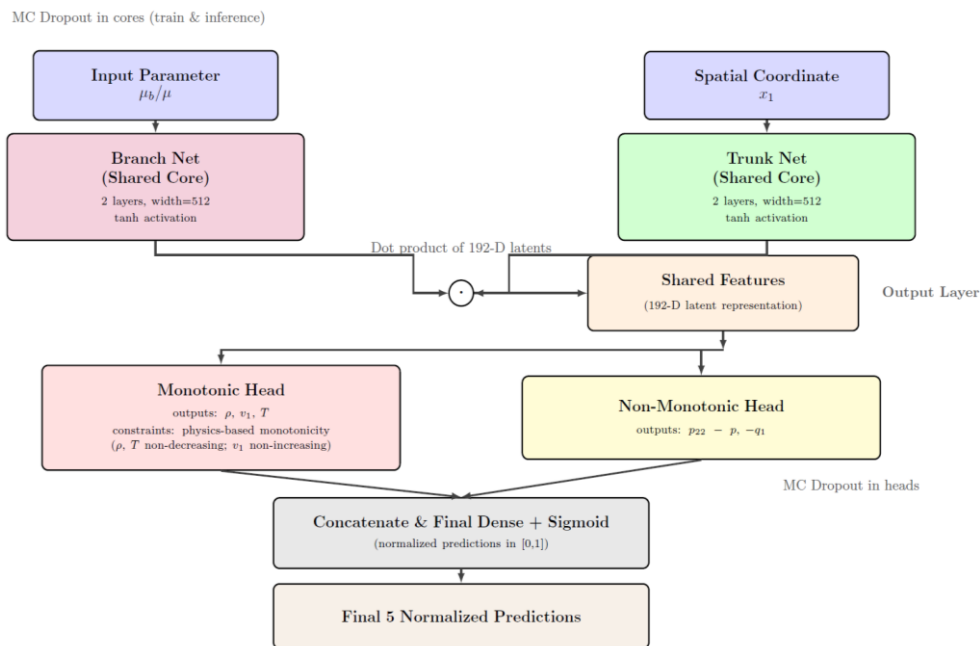
Model Fit on Training Data (Bounded Monotonic)



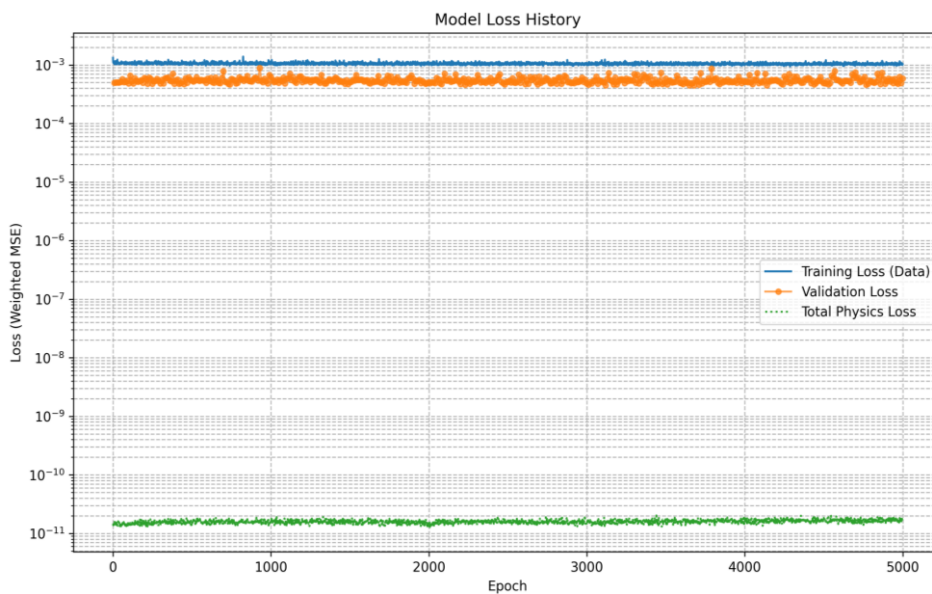
شکل ۶-۱۱ برآزش مدل در طیفی از حالات آموزشی با نسبت‌های لزجت مختلف



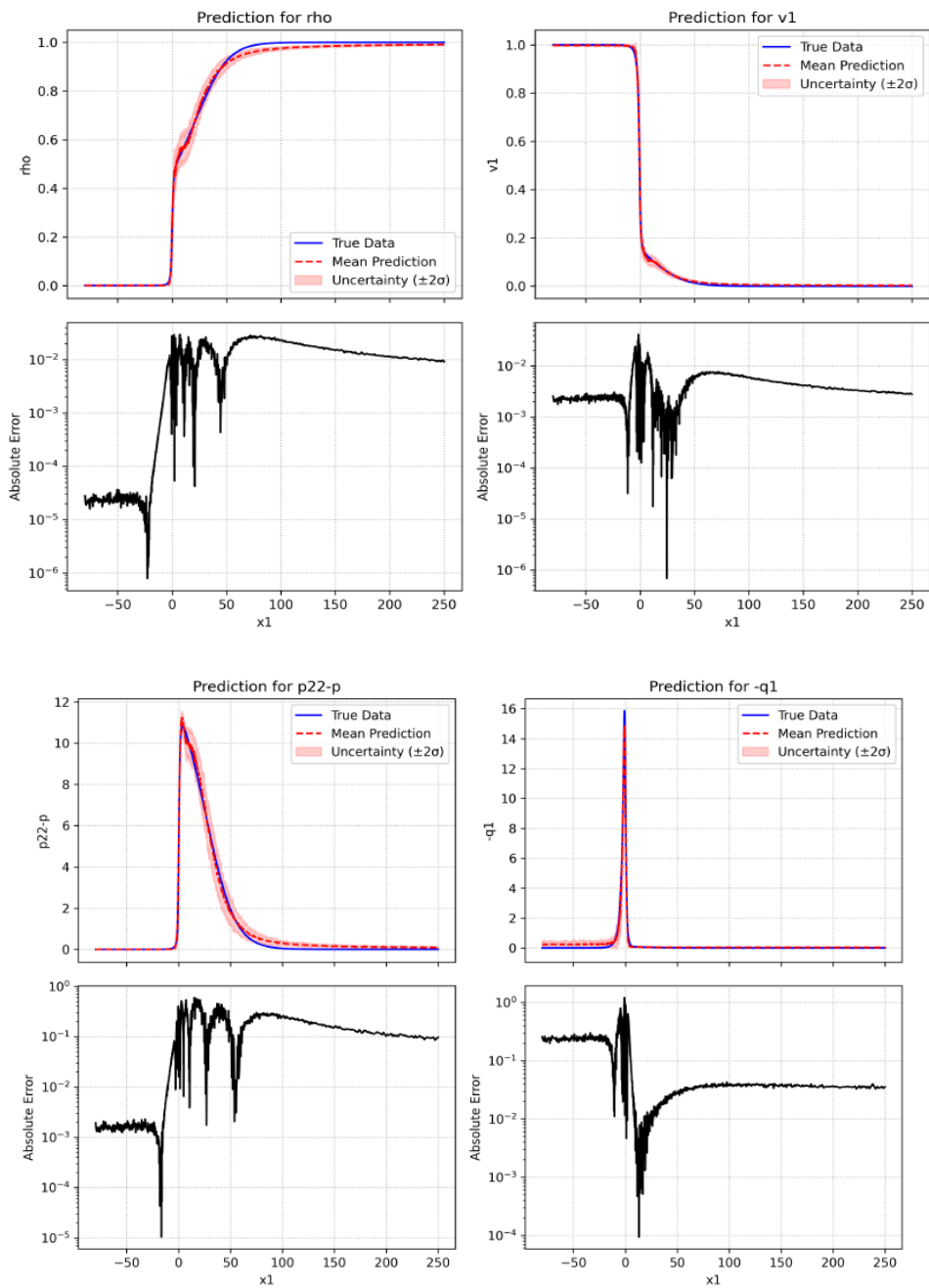
شکل ۶-۱۲ مقایسه پیش‌بینی DeepONet (خط قرمز خط‌چین) با داده‌های شبیه‌سازی واقعی (خط آبی پیوسته) برای حالت آموزش داده نشده $\mu_b/\mu=50$



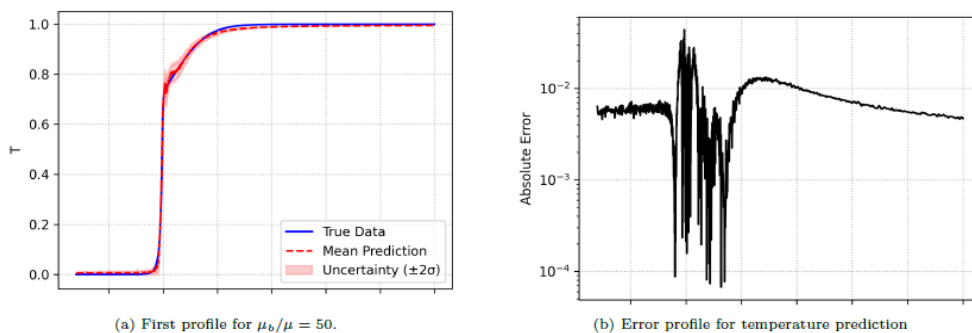
شکل ۶-۱۳ ساختار DeepONet چندخروجی مبتنی بر فیزیک



شکل ۶-۱۴ روند خطای آموزش و اعتبارسنجی در طول دوره‌ها



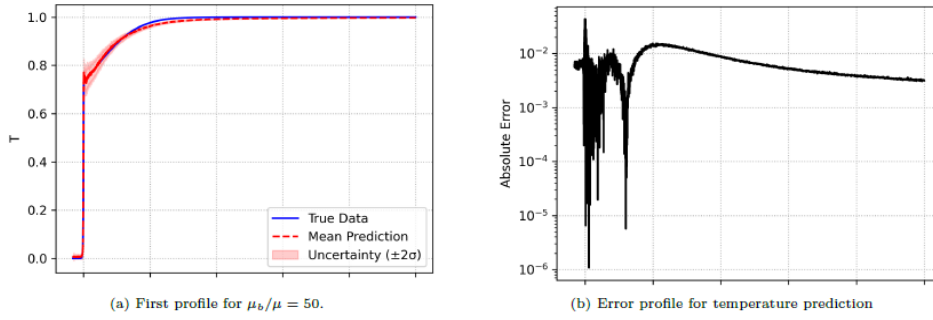
شکل ۱۵-۶ مقایسه نمایه‌های ویژگی‌های جریان برای حالت $\mu_b/\mu=50$ و خطای شبکه عصبی



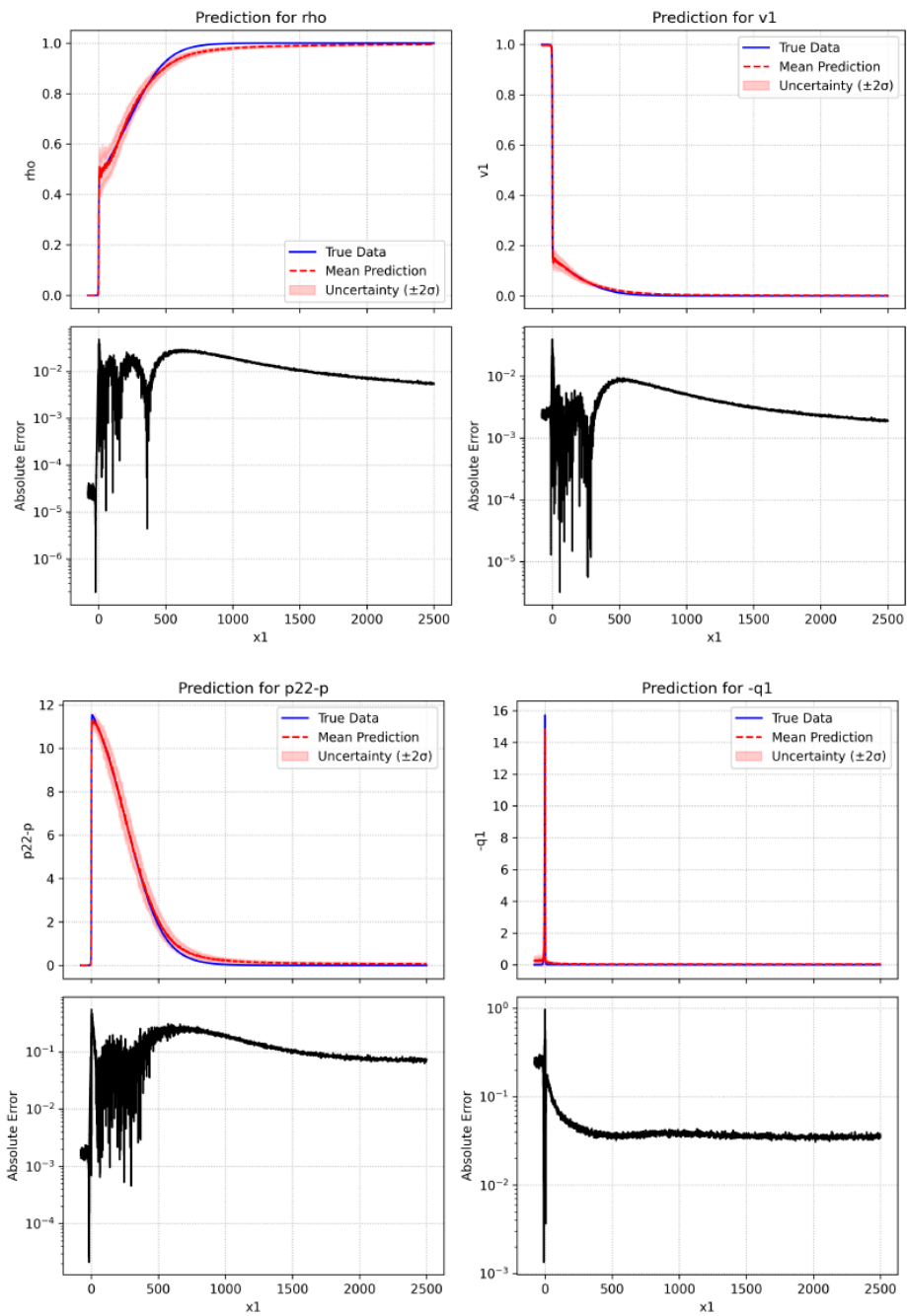
(a) First profile for $\mu_b/\mu = 50$.

(b) Error profile for temperature prediction

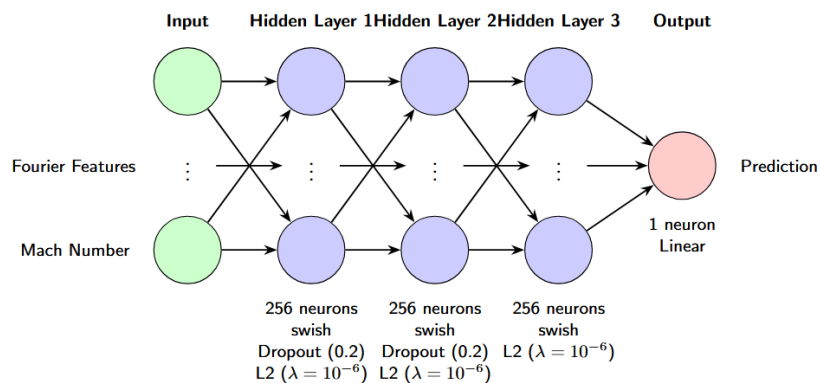
شکل ۱۶-۶ مقایسه دو نمایه دما برای حالت $\mu_b/\mu=50$ و خطای شبکه عصبی



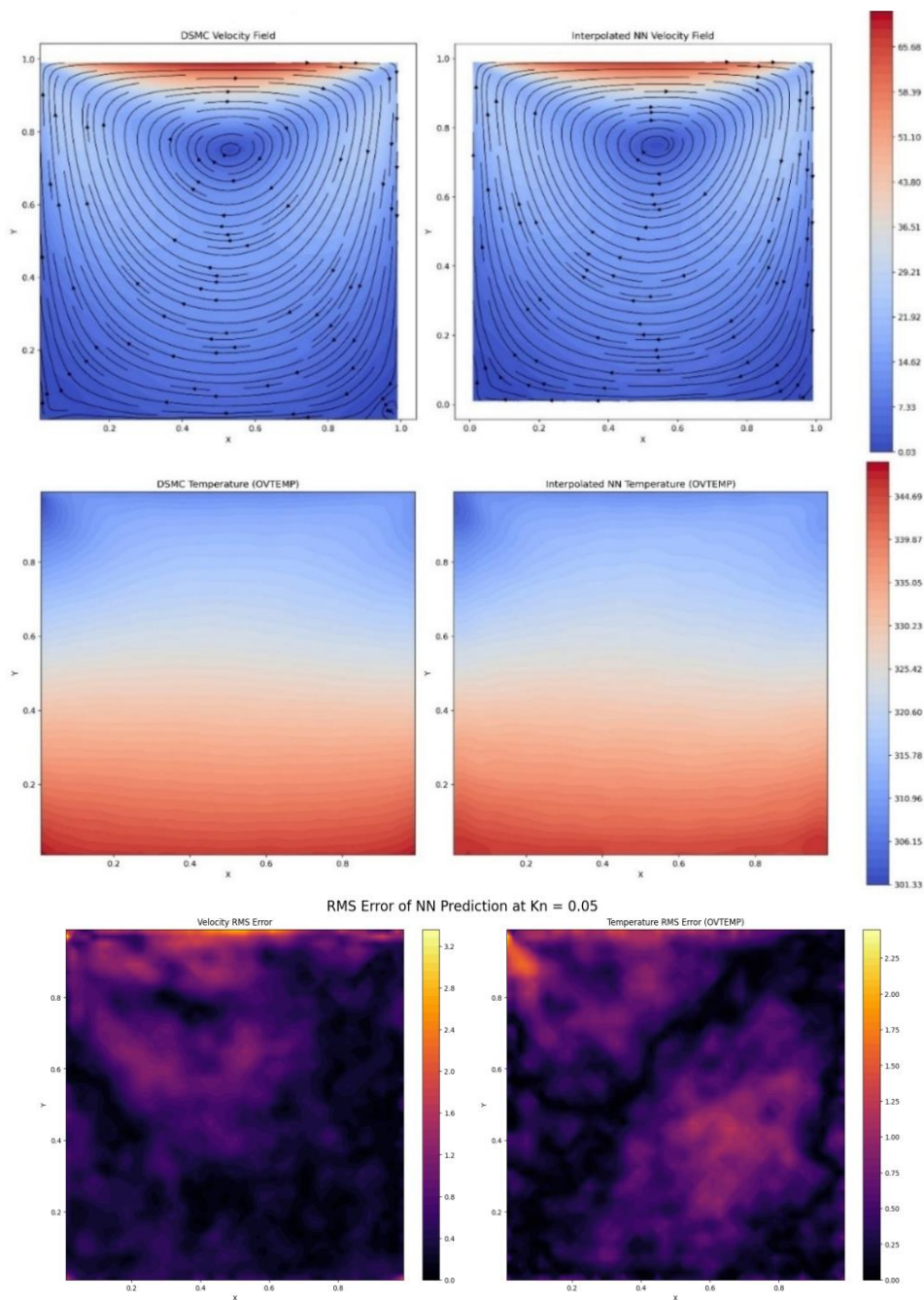
شکل ۶-۱۷ مقایسه دو نمایه دما (حل عددی و شبکه عصبی) برای حالت $\mu_b/\mu=500$.



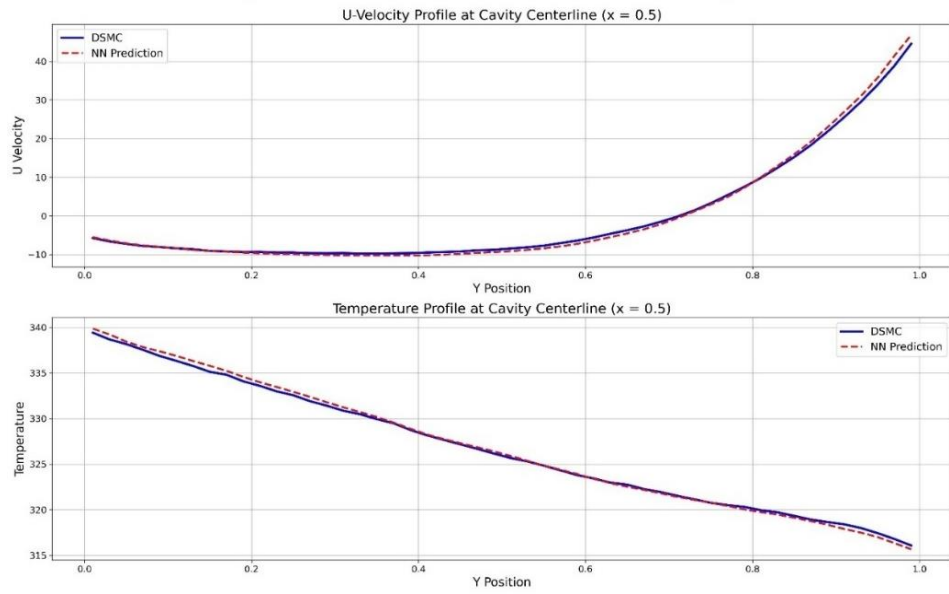
شکل ۶-۱۸ مقایسه ویژگی‌های جریان برای $\mu_b/\mu=500$



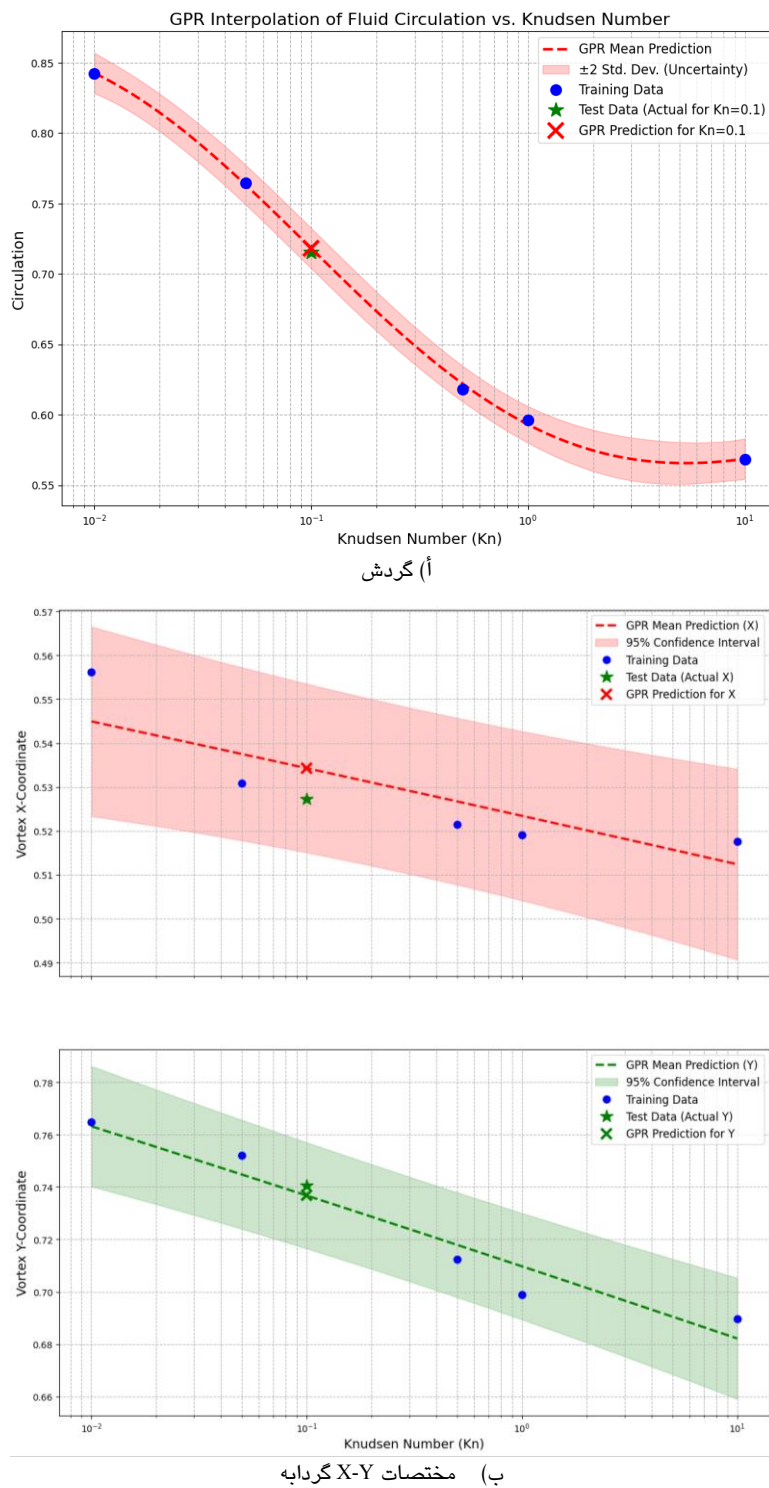
شکل ۶-۲۰ ساختار شبکه عصبی مورد استفاده در مسئله کویتی



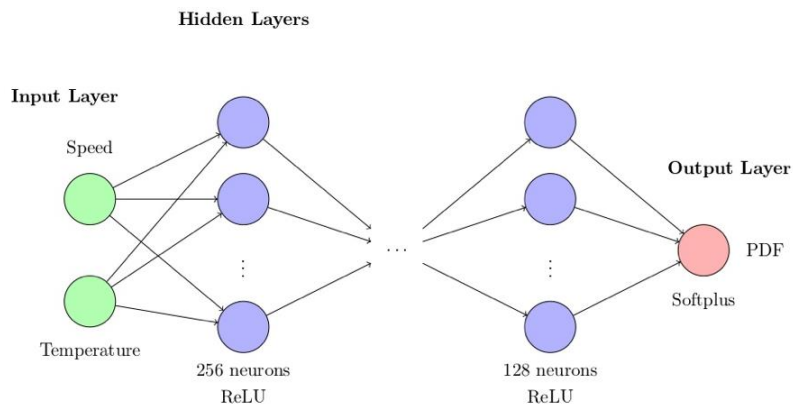
شکل ۶-۲۱ مقایسه پیش‌بینی‌های DSMC و DNN از سرعت جریان، دما و RMS خطا در عدد نودسن $Kn=0.05$



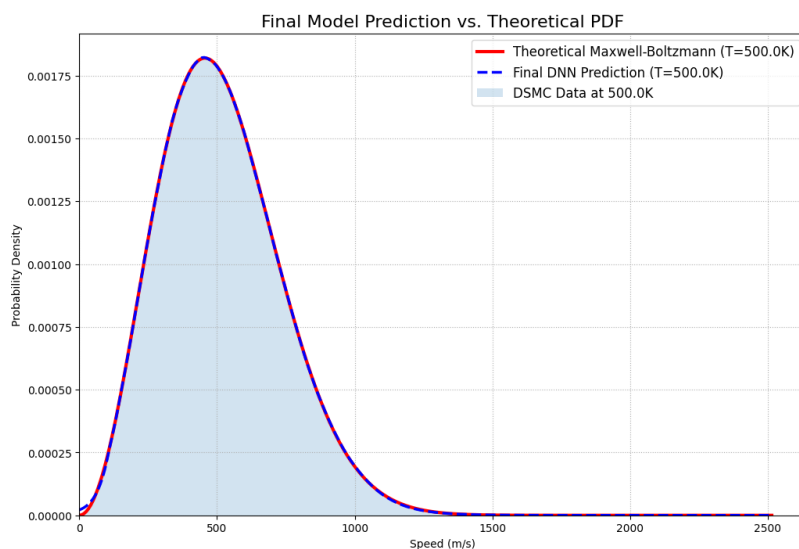
شکل ۶-۲۲ مقایسه پیش‌بینی‌های DSMC و DNN از جریان کویتی در عدد نودسن $Kn=0.5$



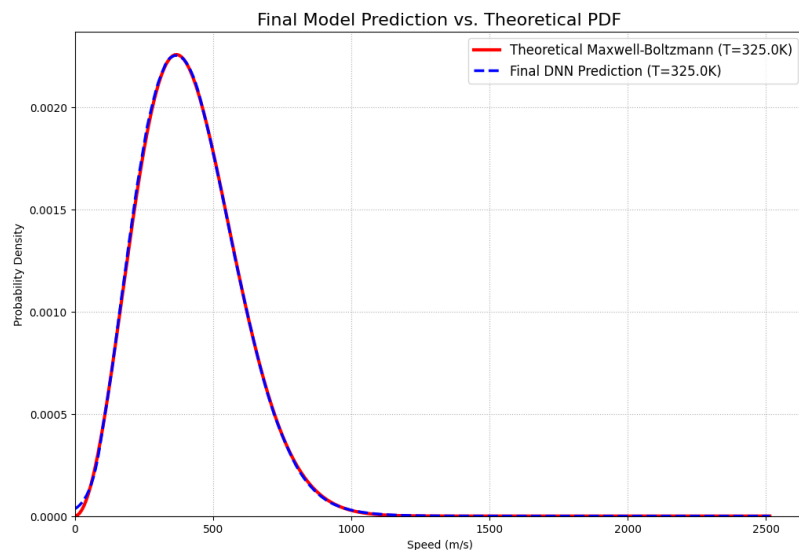
شکل ۶-۲۳ مقایسه داده‌های آموزشی DSMC و پیش‌بینی GPR از گردش جریان و مکان مرکز گردابه در کویتی



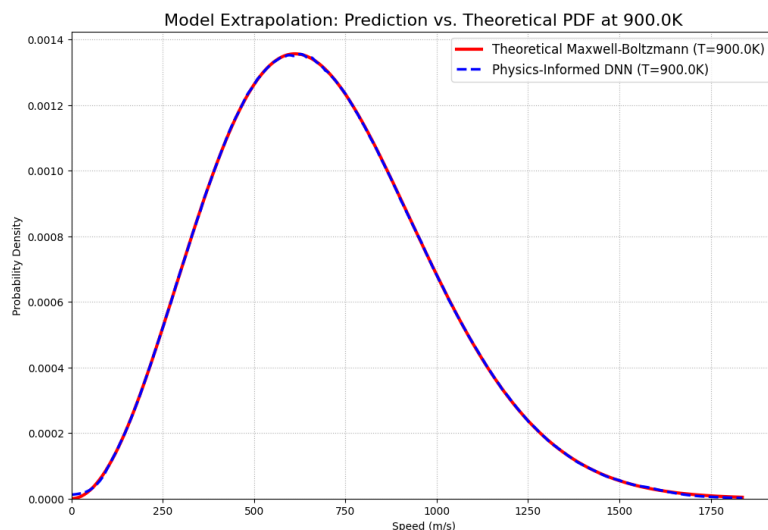
شکل ۶-۲۴ معماری شبکه عصبی با دو ورودی، چهار لایه پنهان، و یک خروجی غیرمنفی برای پیش‌بینی چگالی احتمال



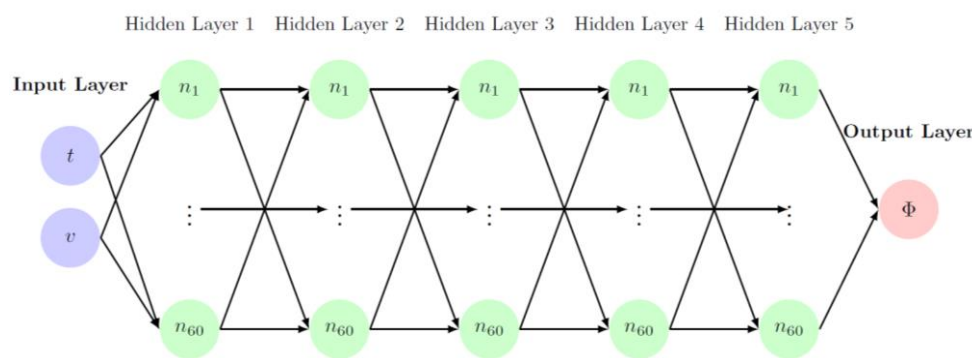
شکل ۶-۲۵ مقایسه نتایج رابطه ماکسول-بولتزمن با شبکه عصبی عمیق (DNN) در دمای ۵۰۰ کلوین



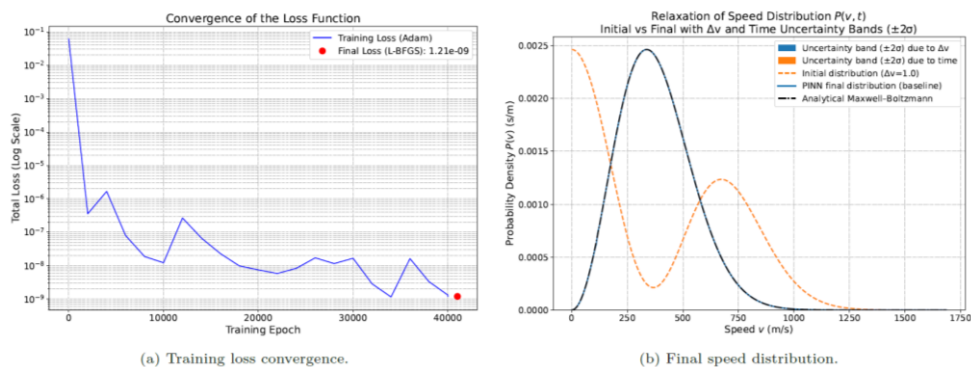
شکل ۶-۲۶ مقایسه نتایج رابطه ماکسول-بولتزمن با پیش‌بینی DNN در دمای ۳۲۵ کلوین خارج از محدوده آموزش



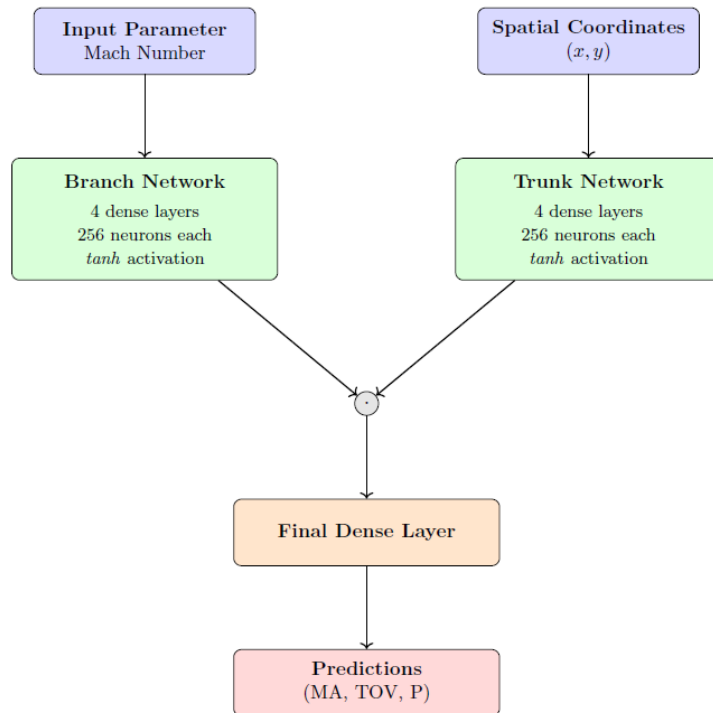
شکل ۶-۲۷ مقایسه رابطه تحلیلی ماکسول-بولتزمن نظری با پیش‌بینی شبکه عصبی عمیق (DNN) در دمای آموزش‌ندیده ۹۰۰ کلوین (برون‌یابی)



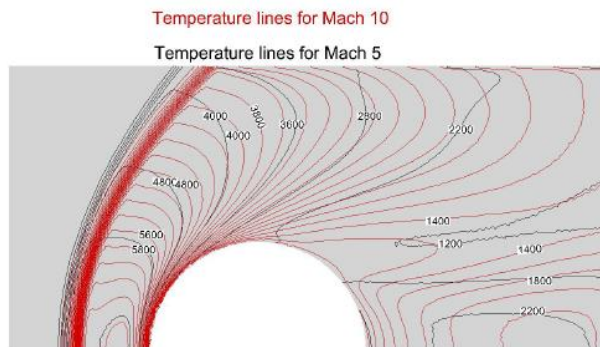
شکل ۶-۲۸ نمای شمایی معماری شبکه عصبی



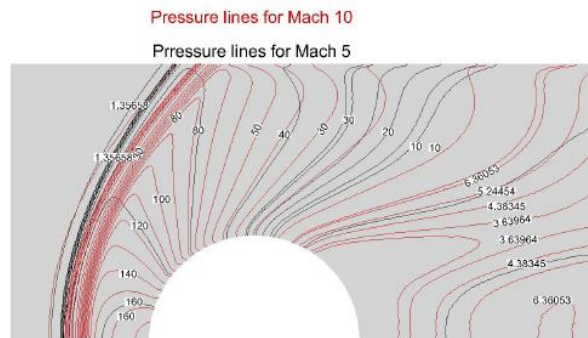
شکل ۶-۲۹ نتایج مربوط به مسئله حل مستقیم (أ) نشان دهنده همگرایی پایدار و (ب) نشان دهنده توزیع نهایی دقیق و منطبق با تعادل نظری.



شکل ۳۰-۶ نمای شمایی ساختار DeepONet برای مسئله استوانه ماوراصوت

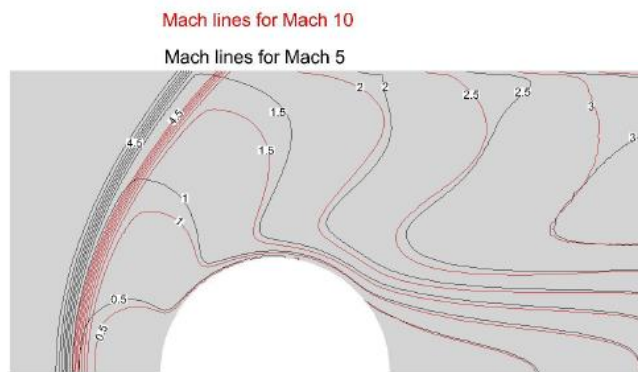


أ) خطوط هم دما



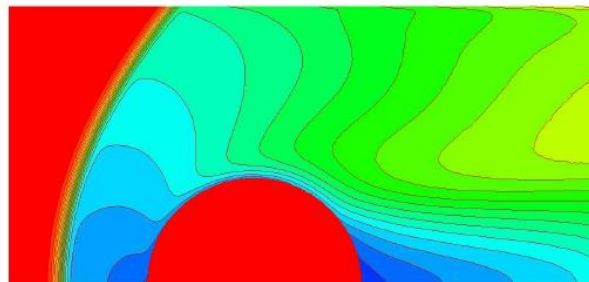
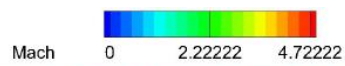
ب) خطوط هم فشار

شکل ۳۱-۶ روند تغییرات عرضی ماخ از ۵ تا ۱۰

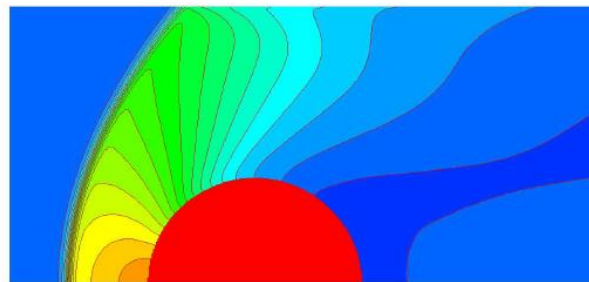
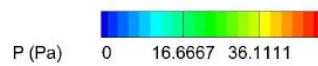


(ب) خطوط با عدد ماخ یکسان

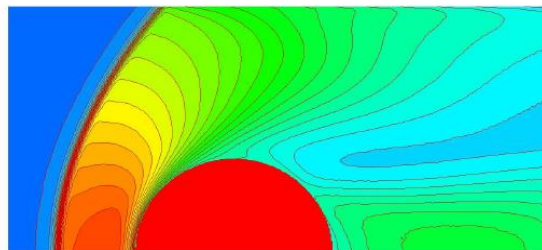
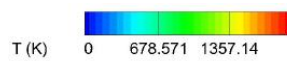
ادامه شکل ۳۱-۶ روند تغییرات عرضی ماخ از ۵ تا ۱۰



(أ) توزیع عدد ماخ

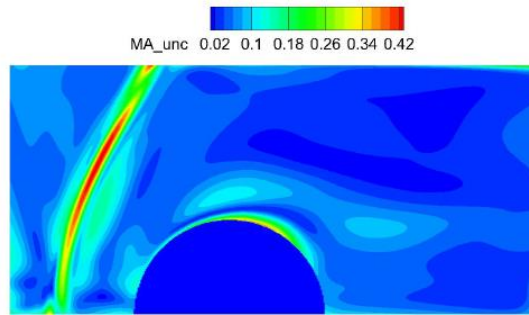


(ب) توزیع فشار

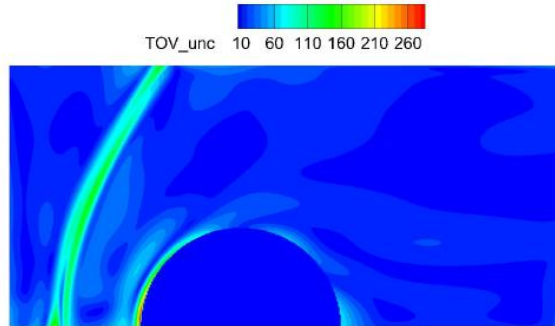


(ج) توزیع دما

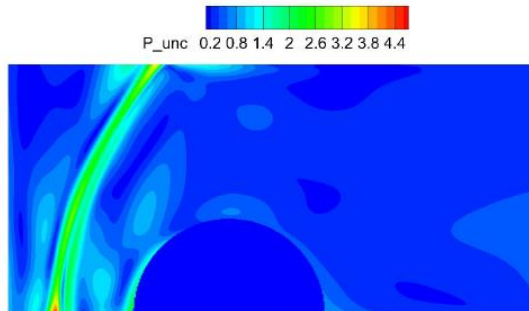
شکل ۳۲-۶ میدان‌های جریان پیش‌بینی‌شده برای جریان ماوراصوت اطراف استوانه در عدد ماخ ۵.۵



(أ) عدم قطعیت برای پیش‌بینی عدد ماخ

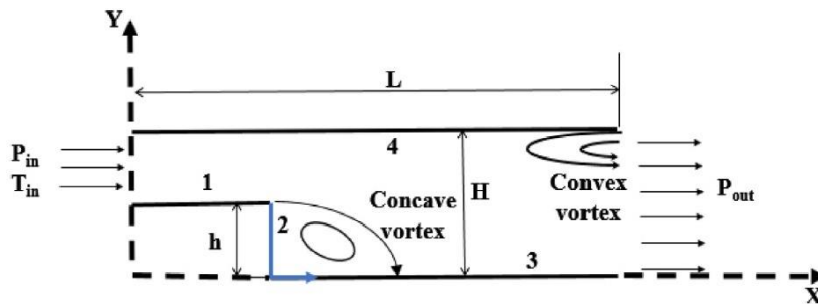


(ب) عدم قطعیت برای پیش‌بینی دما

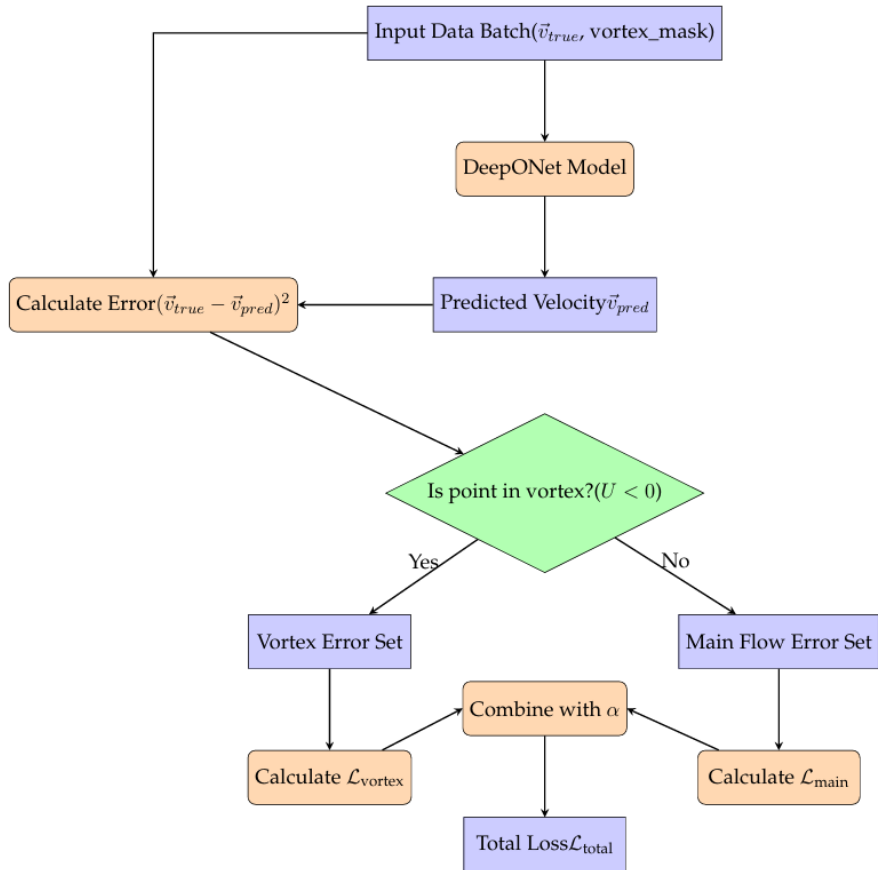


(ج) عدم قطعیت برای پیش‌بینی فشار

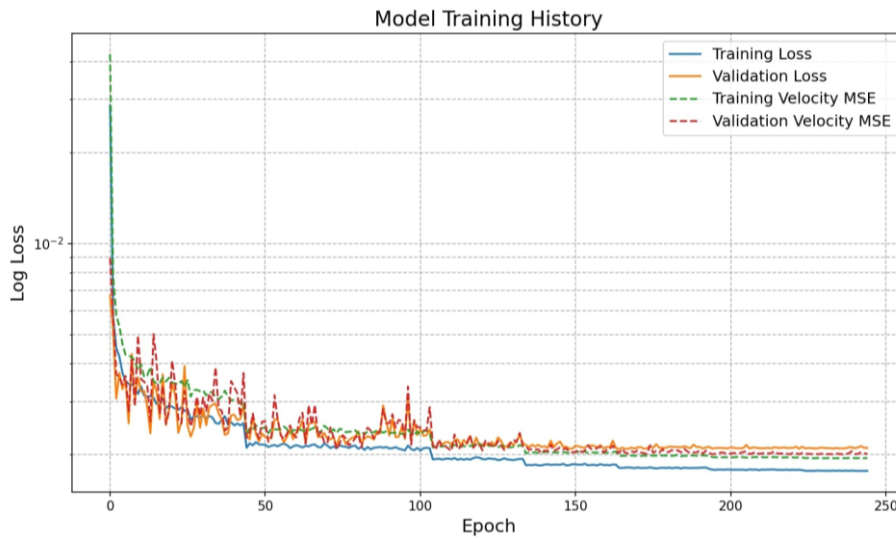
شکل ۳۳-۶ توزیع عدم قطعیت (انحراف معیار) برای حالت برون‌یابی در ماخ ۱۰.



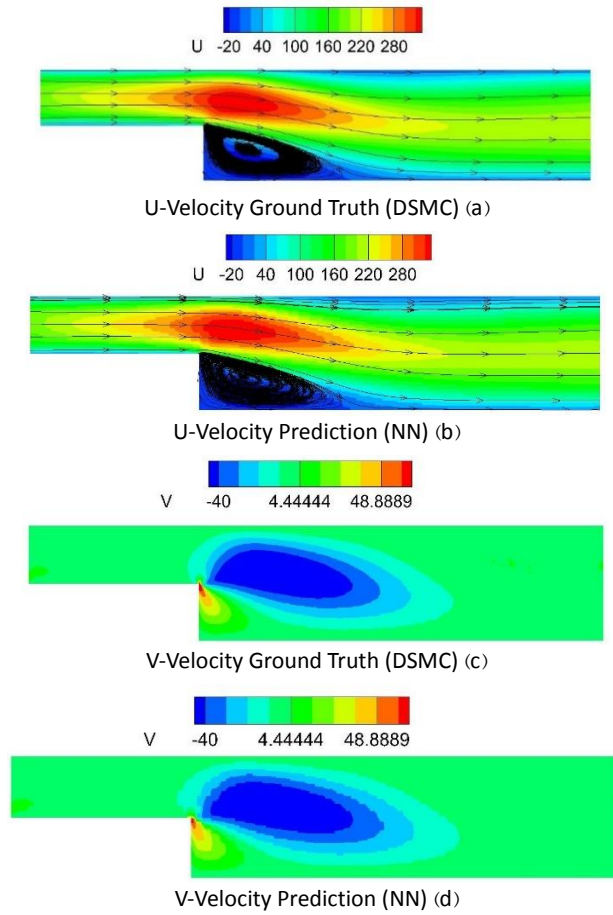
شکل ۳۴-۶ شمایی هندسه شبیه‌سازی شده



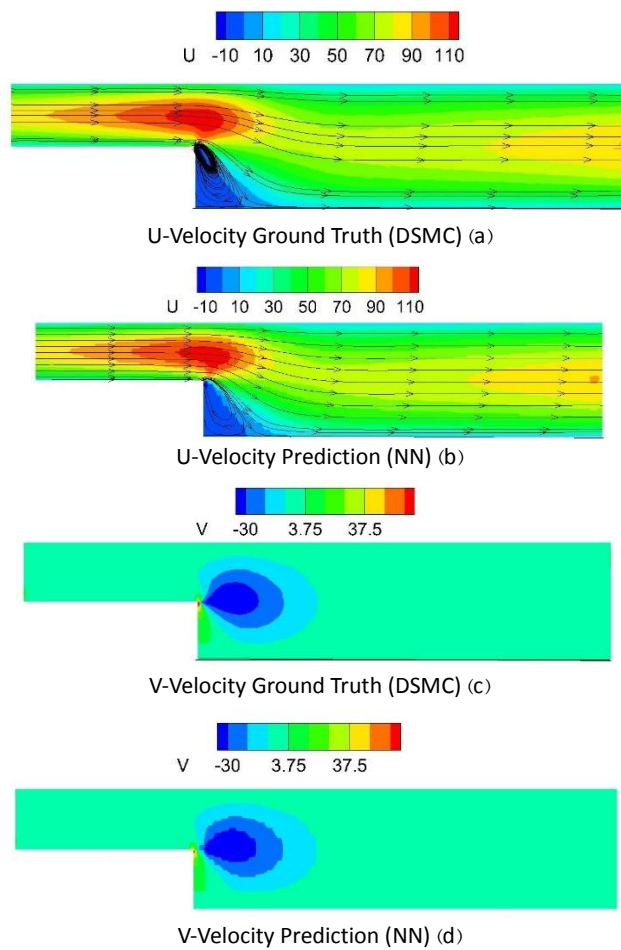
شکل ۳۵-۶ فلوجارت چارچوب DeepONet کانولوشنی همراه با تابع زیان ناحیه‌ای هدایت‌شده با فیزیک



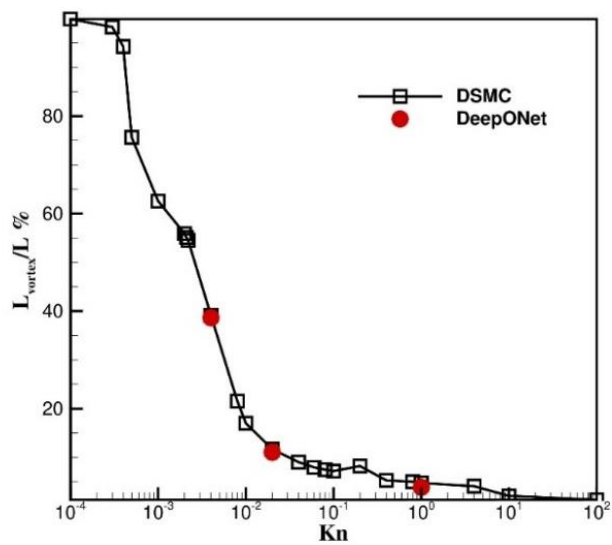
شکل ۳۶-۶ تابع زیان و میانگین مربعات خطا (MSE)



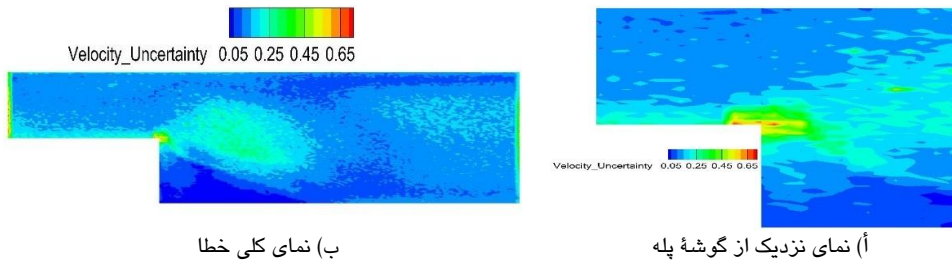
شکل ۶-۳۷ مقایسه کیفی کانتورهای سرعت در راستای U و V بین شبیه‌سازی مرجع DSMC و پیش‌بینی DeepONet برای $Kn=0.004$



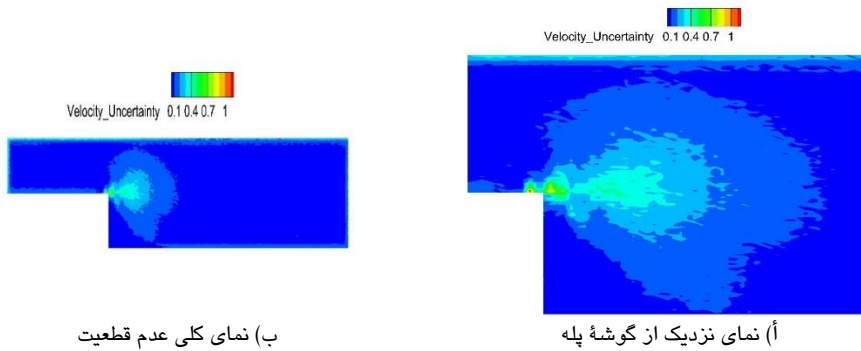
شکل ۶-۳۸ مقایسه کیفی کانتورهای سرعت در راستای U و V بین شبیه‌سازی مرجع DSMC و پیش‌بینی DeepONet برای $Kn=0.02$.



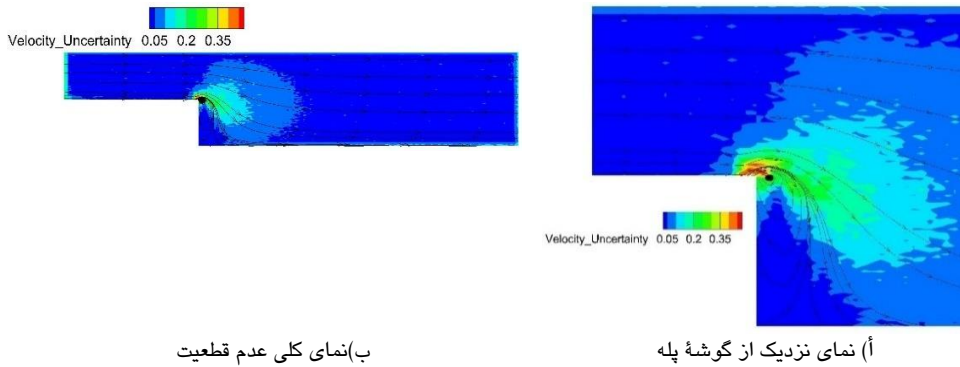
شکل ۶-۳۹ مقایسه کمی طول گردابه اصلی به عنوان تابعی از عدد نودسن



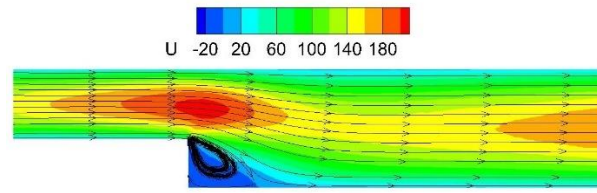
شکل ۴۰-۶ نمایش عدم قطعیت پیش‌بینی مدل برای سرعت U ، $Kn=0.004$



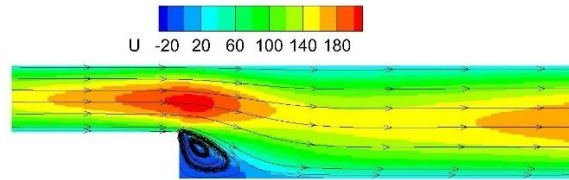
شکل ۴۱-۶ نمایش عدم قطعیت پیش‌بینی مدل برای سرعت U ، $Kn=0.02$



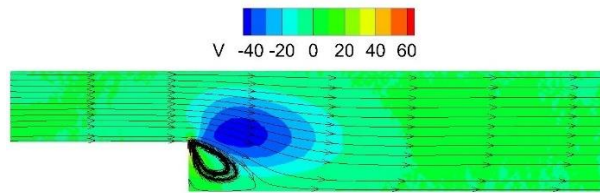
شکل ۴۲-۶ نمایش عدم قطعیت پیش‌بینی مدل برای سرعت U ، $Kn=1.0$



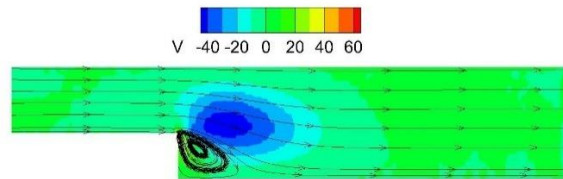
Ground Truth (DSMC), U-Velocity (a)



DeepONet Prediction (NN), U-Velocity (b)

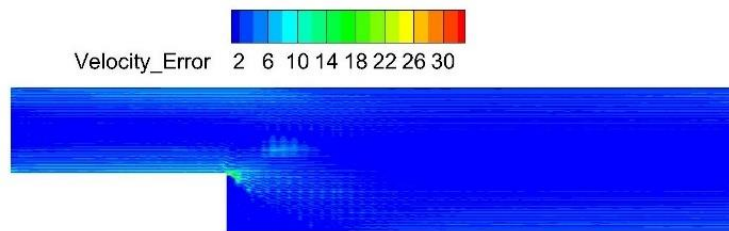


Ground Truth (DSMC), V-Velocity (c)

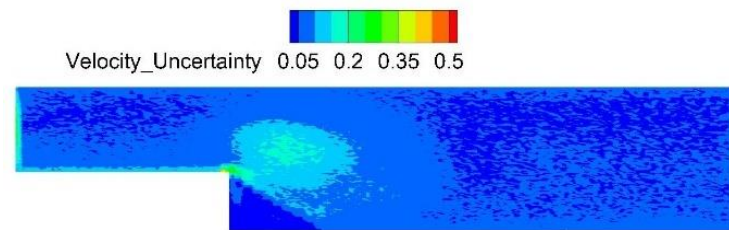


DeepONet Prediction (NN), V-Velocity (d)

شکل ۴۳-۶ مقایسه کیفی کانتورهای سرعت U و سرعت V بین شبیه‌سازی DSMC واقعی و پیش‌بینی DeepONet برای نسبت ارتفاع پله آموزش داده نشده $h/H = 44\%$

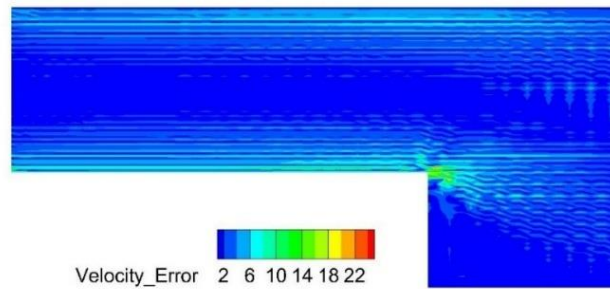


أ) عدم قطعیت سرعت

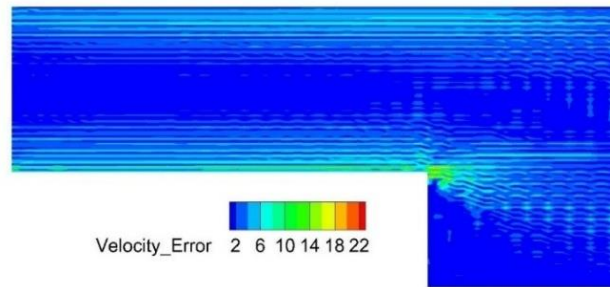


ب) خطا سرعت

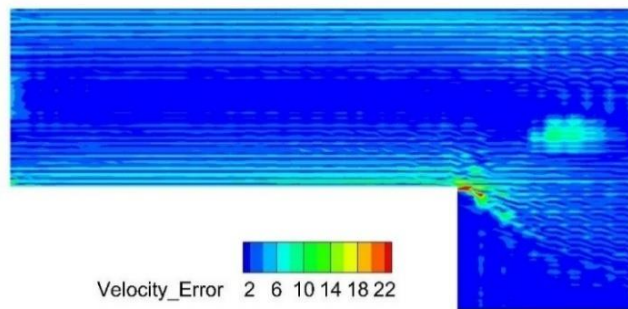
شکل ۴۴-۶ خطا و عدم قطعیت سرعت برای $h/H = 44\%$



أ) توزیع خطا با استفاده از تابع هزینه MSE



ب) توزیع خطا با استفاده از تابع هزینه GMSE



ج) توزیع خطا با استفاده از تابع هزینه Zonal

شکل ۶-۴۵ نمایش مقایسه‌ای خطای پیش‌بینی برای میدان سرعت U در نزدیکی پله، حاصل از مدل‌هایی که با سه تابع هزینه متفاوت آموزش داده شده‌اند.