

آموزش جامع کد پریک

تهیه کننده : سعدی جلیلی

پروژه:

شبیه سازی عددی جریان و انتقال حرارت جریان نانوسیال در جت محدود به روش **peric**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

در این برنامه به شبیه سازی عددی جریان و انتقال حرارت نانوسیال در جت محدود پرداخته شده است. برای شبیه سازی عددی جریان و انتقال حرارت جریان نانوسیال از کدنویسی در قالب زبان برنامه نویسی فرترن^۱ استفاده شده است. در این پژوهش ابتدا کد پایه Peric توسعه داده شده و از کد توسعه داده شده Peric برای شبیه سازی عددی جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب-Cu در هندسه دوبعدی جت محدود استفاده شده است. این برنامه اثر متغیرهای مختلف از جمله نسبت منظر (نسبت عرض کانال به عرض جت)، عدد رینولدز، کسر حجمی نانوذرات و قطر نانوذرات را روی پارامترهای مختلف ترموهیدرولیکی جت محدود از جمله ضریب انتقال حرارت، افت فشار، توزیع دما مورد بررسی قرار می دهد.

کلمات کلیدی : نانوسیال، جت محدود، ناسلت، Peric

¹ Fortran

فهرست

۶	..... ۱-مقدمه
۸	..... ۲-تغییرات اعمال شده در کد پایه Peric
۹	..... ۳- توضیحات کلی برنامه
۱۰	..... ۴- فایل ورودی کد اصلی
۱۳	..... ۵-توضیح کد اصلی
۲۱	..... ۶- شبکه بندی گره ها
۲۳	..... ۱-۶ سابروتین CALCUV
۲۳	..... ۲-۶ سابروتین CALCP
۲۴	..... ۳-۶ سابروتین CALCT
۲۴	..... ۴-۶ سابروتین PRINT
۲۴	..... ۵-۶ سابروتین SIPSOL
۲۵	..... ۶-۶ سابروتین PBUND
۲۵	..... ۷-۶ سابروتین BCUV
۲۶	..... ۸-۶ سابروتین BCT
۲۶	..... ۹-۶ سابروتین OUTBC
۲۷	..... ۱۰-۶ سابروتین MODINP
۲۹	..... ۱۱-۶ سابروتین BCTIME
۲۹	..... ۱۲-۶ سابروتین OUT2
۲۹	..... ۷-بیان نتایج
۴۶	..... پیوست ۱ : نحوه ران گرفتن از برنامه
۴۷	..... مراجع و منابع

لیست علائم و اختصارات

AR	ضریب منظر
d_p (nm)	قطر نانوذرات
d_f (nm)	قطر مولکول آب
K (W/mK)	ضریب هدایت حرارتی
Nu	عدد ناسلت
H (m)	عرض کانال
L (m)	طول کانال
P (Pa)	فشار
Phi	کسر حجمی نانوذرات
Q (W/m ²)	شار حرارتی
Re	عدد رینولدز
T (k)	دما
U (m/s)	سرعت افقی
V(m/s)	سرعت عمودی
x (m)	مولفه طول افقی
Y (m)	مولفه عمودی طول

علائم یونانی

ϕ	کسر حجمی نانوذرات
μ (kg/ms)	ویسکوزیته دینامیکی
ρ (kg/m ³)	چگالی

زیر نویس ها

nf	نانوسیال
f	سیال پایه
w	دیواره
p	نانوذرات

۱- مقدمه:

با توجه به اهمیت جریان جت در بهبود کارایی مبدل های حرارتی و بارز بودن اثر افزودن نانو ذرات در بهبود کارایی این وسایل بررسی همزمان این دو عامل در هندسه کانال می تواند در طراحی مبدل های حرارتی جدیدتر راهگشا باشد. جریان جت نیز جریانی پرکاربرد در بسیاری از سیستم ها همانند تخلیه محیطی، مبدل های حرارتی، سیستم های تزریق جریان، خنک کاری دیواره های محفظه احتراق در توربین های گازی و وسایل پاشش در اتومبیل است.

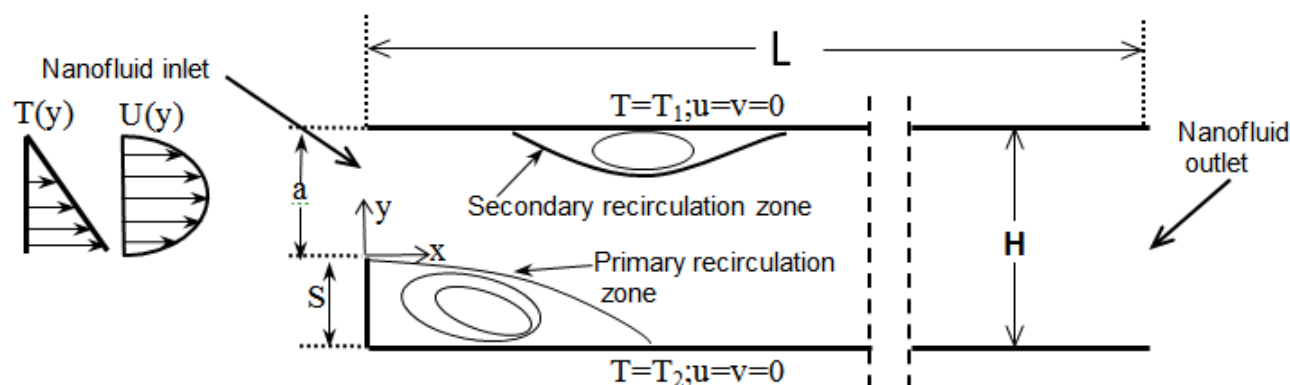
یک جت بسته به فاصله اش از مرزهای محدود شده به دو نوع آزاد و مقید (محدود) تقسیم می شود. وقتی مرزها (موازی با محور ورودی) به اندازه کافی از ناحیه جت دور باشند جت آزاد تعریف می شود. جت محدود زمانی اتفاق می افتد که جت با دیواره های موازی برخورد پیدا کند.

در این پژوهش ابتدا از نانوسیال آب-Cu به عنوان سیال عامل در هندسه دوبعدی جت محدود استفاده شده و اثرات استفاده از نانوسیالات مختلف روی ضریب انتقال حرارت، عدد ناسلت، افت فشار، توزیع دما و فشار بررسی خواهد شد. در این قسمت اثرات کسر حجمی نانوذرات روی پارامترهای مختلف ترموهیدرولیکی مورد بررسی قرار می گیرد.

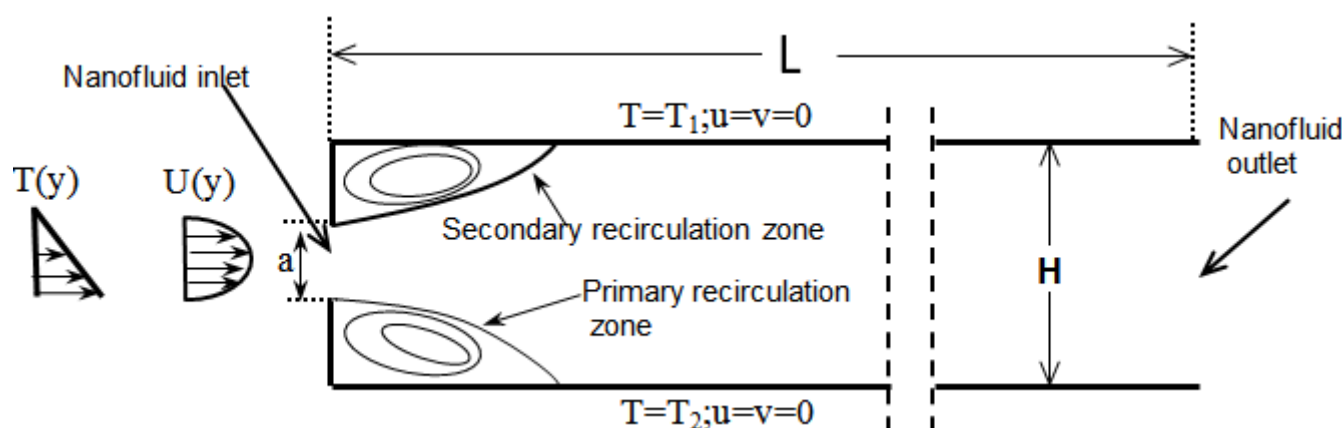
در قسمت بعدی این پژوهش اثر متغیرهای هندسی مختلف نظیر نسبت منظر^۲ و محل ورود جت به کانال روی پارامترهای مختلف ترموهیدرولیکی بررسی می شود. نسبت منظر به صورت (H/a) تعریف می شود. در شکل های (۱) و (۲) هندسه مسئله های مورد بررسی در این پژوهش نشان داده شده است.

سرعت نانوسیال ورودی به صورت تابعی از ارتفاع ناحیه ورودی (تابع درجه ۲) و دمای نانوسیال ورودی به صورت تابعی از ارتفاع ناحیه ورودی (تابع درجه ۱) تعریف می شود. در این پژوهش نانوسیال آب-Cu مورد شبیه سازی قرار گرفته است.

²Aspect ratio



شکل (۱): هندسه مسئله مورد بررسی



شکل (۲): هندسه مسئله مورد بررسی

کسر حجمی نانوذرات بین ۰ تا ۸ درصد، عدد رینولدز بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ و نسبت منظر بین ۱ تا ۴ در نظر گرفته شده است.

برای شبیه سازی عددی جریان و انتقال حرارت جریان نانوسیال از کدنویسی در قالب زبان برنامه نویسی فرترن^۳ استفاده شده است. در این پژوهش ابتدا کد پایه Peric توسعه داده شده و از کد توسعه داده شده Peric برای شبیه سازی عددی جریان و انتقال حرارت نانوسیال آب-Cu در هندسه دوبعدی جت محدود استفاده شده است.

³ Fortran

۲- تغییرات اعمال شده در کد پایه Peric :

کد Peric یک کد جامع می باشد که برای مسائل مختلف با شرایط مورد نظر کاربرد دارد، این شرایط می تواند همچون هندسه کانال یا لوله، جریان آرام یا درهم، تراکم پذیر یا ترکم ناپذیر و نیز شرایط مرزی مختلف همانند دما ثابت، شار ثابت و آدیاباتیک باشد که با روش حل تعین شده با دقت مورد نظر قابل اجراست. برای اعمال هر یک از شرایط مذکور نیازی به تغییرات گسترده در کدنویسی نیست و غالباً تغییرات کمی را می طلبد.

در این پروژه که از کد Peric برای تحلیل مسئله استفاده شده است، تغییرات در سه بخش فایل ورودی کد اصلی کد اصلی به نام `dcpipe.inp`، فایل ورودی کد تولید شبکه به نام `dgpipe` و کد اصلی به نام `pcolchan.f` اعمال شده است. در فایل ورودی کد اصلی پارامترهای ثابت تعیین می شود و در آن خواص سیال همچون چگالی، ویسکوزیته، عدد پرانتل، مقدار تراکم پذیری و متغیرهای ورودی از قبیل سرعت، فشار و دمای ورودی و همچنین شرایط حل مسئله همانند نوع روش حل و دقت حل ثبت می شود، که کل این تغییرات در قالب چند خط اعمال می شود.

در فایل ورودی تولید شبکه (`dgpipe`) ابعاد هندسه کانال و تعداد گره ها در جهت طول و عرض آن تعریف می شود. در کد تولید شبکه محل قرارگیری گره ها و تراکم شبکه تعیین می شود که در این کد نیازی به تغییرات نمی باشد.

عمده تغییرات در کد اصلی (`pcolchan.f`) صورت گرفته است. در این کد شرایط مرزی سرعت در سابروتین `BCUV` و شرایط مرزی دما در سابروتین `BCT` تعریف شده است. در کد پایه Peric دما و سرعت ورودی ثابت است در حالیکه در این مسئله دمای ورودی خطی و سرعت ورودی سهمی شکل می باشد، این تغییرات در سابروتین `MODINP` اعمال می شود، همچنین در این سابروتین چگالی نانوسیال که تابعی از کسر حجمی نانوذرات است تعریف می شود. در این کد فرمولهائی مربوط به محاسبه ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال، دما بالک و عدد ناسلت دیواره های بالایی و پایینی اضافه شده است و سپس دستوراتی جهت نمایش نمودارهای عدد ناسلت دیواره ها در فایل تکپلات داده می شود.

۳- توضیحات کلی برنامه:

برای اجرای برنامه از نرم افزار Microsoft Developer Studio استفاده شده است که شامل دو فایل کد می باشد. ابتدا هندسه و شبکه بندی آن توسط فایل کد grid.f تولید خواهد شد و سپس اطلاعات شبکه در کد اصلی pclochan.f خوانده شده و برنامه اجرا خواهد شد.

هر فایل کد نیاز به فایل ورودی دارد ، فایل ورودی کد تولید شبکه dgpipe می باشد که اطلاعاتی مربوط به ابعاد هندسه و تعدادگره ها در جهت طول و عرض ثبت می شود ، که در حین اجرا و ران گرفتن کد تولید شبکه (grid.f)، نام فایل ورودی و نیز نام فایل خروجی باید تایپ شود بدین صورت پس از اجرای این کد، اطلاعات مربوط به شبکه گره ها در فایل خروجی (grid.inp) ثبت می شود. این فایل خروجی بعنوان فایل ورودی برای کد اصلی (pcolchan.f) می باشد ، همچنین کد اصلی فایل ورودی دیگری به نام dcpipe.inp را داراست که پارامترهای ثابتی همانند چگالی، ویسکوزیته، عدد پرانتل ، مقدار جاذبه، ضریب تراکم پذیری، تعداد ماکزیمم تکرار، مقدار حداکثر خطای همگرایی و مقادیر سرعت، فشار و دمای ورودی و یا هر ثابت موردنظر دیگر در این فایل ثبت می شود، همچنین در این فایل ورودی شرایط و صورت مسئله همچون نوع هندسه (کانال یا لوله) حالت گذرا یا پایا و نیز روش حل معادلات سرعت، فشار و دما مشخص می شود که در قسمتهای بعدی بیشتر شرح داده می شود.

با نوشتن دستوراتی در کد اصلی می توان فایل های خروجی را ایجاد کرد که فایل خروجی OUTC.TXT اطلاعاتی مربوط به مقادیر سرعت، فشار و دما و مقادیر خطای آن در هر گام تکرار ثبت می کند، همچنین در مواقعی که برنامه خطا می دهد، توسط این فایل خروجی می توان پی برد که برنامه در کدام گام تکرار خطا می دهد و در حقیقت خطا از کجا نشات می گیرد.

همچنین فایل هایی با فرمت PLT مربوط به نمودارها و کانتورهای تک پلات می باشد که در آن فایل NU_LOW.PLT مربوط به ناسلت دیواره پایینی و NU_UP.PLT مربوط به ناسلت دیواره بالایی و

فایل OUTPUTC.PLT و 1.lpk مربوط به کانتورهای سرعت، فشار و دمای کل هندسه می باشد که در فایل 1.plk خطوط جریان نیز نشان داده شده است.

۴- فایل ورودی کد اصلی:

همانطور که قبلا اشاره شد این فایل که با نام dcpipe.inp ذخیره شده است برای معرفی پارامترهای ثابت و روش حل معادلات و برخی از شرایط مساله استفاده می شود که در قسمت زیر شرح داده می شود. مطابق شکل زیر هر یک از حروف t و f موجود در خط اول به اختصار از کلمات true و false می باشد که به ترتیب به متغیرهای موجود در خط دوم ارجاع می شود که هر یک از این متغیرها معنا و مفهوم خاص خود را داراست که به شرح زیر می باشد:

f t f f f t f
LREAD, LWRITE, LTEST, LAXIS, LOUTS, LOUTE, LTIME

شکل (۳)

LREAD : اگر t (true) باشد، در صورت قطع برنامه (مثلا قطع برق) در هنگام اجرا و ران گرفتن ، داده های قبلی ذخیره می شود و در صورت ران مجدد، از ادامه داده ها اجرا شروع می شود. بهترست برای مسائل گذرا که نیاز به ران طولانی مدت می باشد این گزینه true باشد.

LWRITE : اگر t (true) باشد، محاسبات در فایل خروجی ذخیره می شود .

LTEST : اگر t (true) باشد، نتایج موردنظر و دلخواه برای بررسی صحت حل برنامه در فایل خروجی چاپ می شود مثل بررسی برقراری قانون بقای جرم.

LAXIS : برای هندسه لوله true و برای هندسه کانال false استفاده می شود.

LOUTS : مربوط به مسائل گذرا می باشد و اگر true باشد، مقادیر اولیه همه متغیرها در مسائل گذرا در خروجی چاپ می شود.

LOUTE : همانند **LOUTS** می باشد با تفاوت اینکه مقادیر همه متغیرهای نهایی را در خروجی چاپ می کند.

LTIME : برای مسائل گذرا true و برای مسائل پایا false در نظر گرفته می شود.

در جدول زیر، هر یک از متغیرهای استفاده شده در فایل ورودی (dcpipe.inp) تعریف شده است.

DENSIT	چگالی سیال پایه (آب)
VISC	ویسکوزیته دینامیکی سیال پایه (آب)
PRM	عدد پراتنل نانوذره (مس)
GRAVX	مقدار جاذبه در جهت افقی
GRAVY	مقدار جاذبه در جهت عمودی
BETA	ضریب تراکم پذیری نانوسیال
TH	دمای دیواره گرم
TC	دمای دیواره سرد
TREF	دمای مرجع
MAXIT	تعداد ماکزیمم حلقه تکرار
IMON , JMON	مؤلفه های مختصات یک گره برای نمایش خروجی تمام متغیرها
IPR , JPR	مؤلفه های مختصات یک گره برای نمایش خروجی متغیر فشار
SORMAX	ماکزیمم خطای همگرایی
SLARGE	خطای واگرایی
ALFA	ضریب انبساط در روش حل LU
UIN	مقدار سرعت افقی در ورودی
VIN	مقدار سرعت عمودی در ورودی
PIN	فشار ورودی
TIN	دمای ورودی

TEST	تعداد گام زمانی (برای مسائل پایا این مقدار برابر یک می باشد)
NPRT	نتایج حاصل از NPRT آمین گام زمانی در فایل خروجی ثبت شود
DT	اندازه هر گام زمانی
GAMT	روش حل مسائل گذرا (روش صریح با عدد یک و روش ضمنی با عدد صفر نشان داده می شود)

مطابق شکل زیر مقادیر همه متغیرها در خط قبل آن به ترتیب ارجاع داده می شود.

```
4000 5 5 2 2 1.e-4 1.e3 0.92
MAXIT, IMON, JMON, IPR, JPR, SORMAX, SLARGE, ALFA
997.1 89E-5 2.25 0. 0. 0 0. 0. 0.0
DENSIT, VISC, PRM, GRAVX, GRAVY, BETA, TH, TC, TREF
```

شکل (۴)

LCAL : توسط این متغیر معادلاتی که در کد اصلی حل می شوند را مشخص می کنیم، هر یک از معادلات سرعت، فشار و دما توسط متغیر " I " تعریف می شود ، بدین ترتیب که I=1 معادله سرعت افقی، I=2 معادله سرعت عمودی، I=3 معادله فشار و I=4 معادله دما می باشد و NPHI برابر تعداد متغیرهای I یعنی ۴ می باشد، مطابق کد شکل (۵) در صورتیکه هر یک از حروف متناظر این معادلات f (False) باشد، معادله موردنظر در کد اصلی حل نمی شود، مثلا اگر حرف سوم f باشد و بقیه t باشد، کد اصلی معادلات سرعت و دما را همزمان حل کرده ولی معادله فشار را حل نمی کند.

```
t t t t (LCAL (I) , I=1, NPHI)
```

شکل (۵)

URF(I) : ضریب آرام سازی برای متغیر I ام

```
0.5 0.5 0.2 0.8 (URF (I) , I=1, NPHI)
```

شکل (۶)

GPS : روش حل معادلات گسسته سازی تعیین می شود، برای مقدار صفر معادله به روش upwind و برای مقدار یک، معادله به روش تفاضل مرکزی حل می شود. مطابق کد شکل زیر تمام معادلات به روش تفاضل مرکزی حل می شود.

1. 1. 1. 1.	(GDS (I) , I=1, NPHI)
-------------	-----------------------

شکل (۷)

۵- توضیح کد اصلی:

در این کد، از تعداد زیادی از سابروتین ها استفاده شده است که عمده این برنامه را تشکیل می دهد و در انتهای برنامه قرار می گیرد. به طور کلی وظیفه این سابروتین ها حل معادلات سرعت، فشار و دما است که خروجی آن محاسبه مقدار سرعت، دما و فشار در هریک از گره ها می باشد، سپس با دستور call این مقادیر در ابتدای برنامه فراخوانی می شود و مقدار خطا محاسبه می شود، اگر مقدار خطا از مقدار حداکثر خطای همگرایی تعیین شده بیشتر شد، این مقدار به سابروتین ها بازگردانده می شود تا محاسبات جدید صورت گیرد. آنقدر این چرخه تکرار می شود تا مقدار تصحیح شده از مقدار حداکثر خطای همگرایی کوچکتر شود، در این هنگام حل همگرا شده و برنامه دستور رسم نمودارها و کانتورها را در خروجی می دهد، البته می توان کلیه محاسبات مربوط به چرخه تکرار را در فایل text ثبت کرد، همچنین قابل ذکر است اگر مقدار خطا از مقدار مشخصی بیشتر باشد، برنامه دستور قطع برنامه و واگرایی می دهد که با این حال محاسبات چرخه تکرار در فایل text ثبت شده و با رجوع به آن می توان پی برد محاسبات تا چه مرحله ای پیش رفته و خطا از کجا نشات گرفته است.

در جدول زیر، هر یک از متغیرهای استفاده شده در کد اصلی (pcolchan.f) تعریف شده است.

IJ	شماره گره
NI	تعداد کل گره در جهت X

NJ	تعداد کل گره در جهت Y
NIM	$NIM = NI - 1$
NJM	$NJM = NJ - 1$
NX	برابر یا بزرگتر از NI $(NX \geq NI)$
NY	برابر یا بزرگتر از NJ $(NY \geq NJ)$
$NIJ \rightarrow NIJ = NI \times NJ$	برابر تعداد کل گره ها
$IU \rightarrow (IU = 1)$	مربوط به متغیر سرعت افقی که با عدد یک نشان داده می شود
$IV \rightarrow (IV = 2)$	مربوط به متغیر سرعت عمودی که با عدد دو نشان داده می شود
$IP \rightarrow (IP = 3)$	مربوط به متغیر فشار که با عدد سه نشان داده می شود
$IEN \rightarrow (IEN = 4)$	مربوط به متغیر دما که با عدد چهار نشان داده می شود
RESOR	مقدار باقیمانده یا خطای متغیرهای سرعت، دما یا فشار
F1(IJ)	مقدار دبی در جهت X در شماره گره IJ ام
F2(IJ)	مقدار دبی در جهت Y در شماره گره IJ ام
DPX	مقدار گرادیان فشار در جهت X
DPY	مقدار گرادیان فشار در جهت Y
X(I)	مولفه افقی مختصات گره
Y(I)	مولفه عمودی مختصات گره
XC(I)	مولفه افقی مختصات وسط وجه المان
YC(I)	مولفه عمودی مختصات وسط وجه المان
U(IJ)	مقدار سرعت افقی در گره شماره IJ
V(IJ)	مقدار سرعت عمودی در گره شماره IJ
P(IJ)	مقدار فشار در گره شماره IJ
T(IJ)	مقدار دما در گره شماره IJ

U0(IJ)	مقدار سرعت افقی در گره شماره IJ در گام زمانی قبل
U00(IJ)	مقدار سرعت افقی در گره شماره IJ در دو گام زمانی قبل
FILIN	متغیری برای معرفی فایل ورودی که با عدد پنج تعریف شده است
FILOUT	متغیری برای معرفی فایل خروجی که با عدد دو تعریف شده است
FILGR	متغیری برای معرفی فایل مش تولید شده که با عدد یک تعریف شده است
NU_LOW	عدد ناسلت در دیواره پایینی
NU_UP	عدد ناسلت در دیواره بالایی
TB	دمای بالک
A	صورت کسر تعریف شده در محاسبه عدد ناسلت
BV	مخرج کسر تعریف شده در محاسبه عدد ناسلت
KP	ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوذره (مس)
KF	ضریب انتقال حرارت هدایتی سیال پایه (آب)
KNF	ضریب انتقال حرارت هدایتی نانوسیال
FI	مقدار کسر حجمی ذره مس در نانوسیال
KB	ثابت بولتزمن
TM (K)	دمای متوسط
DP	قطر نانوذره (مس)
DS	قطر سیال پایه (آب)
DENSIT	چگالی نانوسیال
DENSIT_F	چگالی سیال پایه (آب)
DENSIT_S	چگالی نانوذره (مس)
VISC	ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال
VISC_F	ویسکوزیته دینامیکی سیال پایه (آب)
PE	عدد پکلت
SU(IJ)	مقدار سورس ترم در معادله سرعت افقی در شماره گره IJ
SV(IJ)	مقدار سورس ترم در معادله سرعت عمودی در شماره گره IJ

APU(IJ)	ضریب ماتریس مجهول در معادله سرعت افقی در گره شماره IJ
APV(IJ)	ضریب ماتریس مجهول در معادله سرعت عمودی در گره شماره IJ
IJE	گره مجاور در شرق گره IJ
IJW	گره مجاور در غرب گره IJ
FX(I)	نسبت فاصله گره P از وجه المان به فاصله گره P از گره E که گره E، گره مجاور در شرق گره دلخواه P می باشد.
S	مساحت المان
R	مقدار R برای لوله برابر با Y و برای کانال برابر یک می باشد
DXPE	فاصله وجه های دو المان مجاور
FY(J)	نسبت فاصله گره P از وجه المان به فاصله گره P از گره N که گره N، گره مجاور در جنوب گره دلخواه P می باشد
VOL	مقدار حجم المان
DX	فاصله دو گره مجاور در جهت افقی
DY	فاصله دو گره مجاور در جهت عمودی
AP(IJ)	ضریب ماتریس مجهول در معادله دما برای گره IJ
AE(IJ)	ضریب ماتریس مجهول در معادله دما برای گره شرقی IJ
AW(IJ)	ضریب ماتریس مجهول در معادله دما برای گره غربی IJ
AN(IJ)	ضریب ماتریس مجهول در معادله دما برای گره شمالی IJ
AS(IJ)	ضریب ماتریس مجهول در معادله دما برای گره جنوبی IJ
FMOUT	مقدار دبی خروجی
FLOMAS	مقدار دبی ورودی
FAC	نسبت دبی ورودی به دبی خروجی
$PRR \rightarrow (PRR = \frac{1}{PRM})$	معکوس عدد پرانتل
FLOMOM	مقدار مومنوم ورودی
QWALL	مقدار انتقال حرارت خارج شده از مرز

توضیحات قسمت های ابتدایی کد که شامل سابروتین ها نمی شود به شرح زیر می باشد:

در ابتدای برنامه متغیرهایی که در این کد استفاده می شود را باید تعریف نمود. این عمل از دو طریق انجام می شود. روش اول با استفاده از دستور CAMMON می باشد، بدین صورت که متغیرهایی که از یک طیف هستند در این دستور به اشتراک گذاشته می شوند. روشی دیگر که در کدهای فرتن زیاد استفاده می شود، استفاده از دستوراتی همانند INTEGER برای متغیرهای اعداد صحیح و DOUBLE PRECISION برای متغیرهای اعداد حقیقی با ۱۶ رقم عدد معنی دار می باشد، که در این برنامه از هر دو روش استفاده شده است.

```

PARAMETER (NX=666,NY=666,NXY=NX*NY,NPHI=4)
COMMON /ICONT/ NI,NJ,NIM,NJM,NIJ,NITP,LI(NX),IMON,
* JMON,IJMON,MAXIT,IU,IV,IP,IEN,IPR,JPR,NSW(NPHI),
* ITIM,ITST,NPRT
COMMON /LOGIC/ LWRITE,LREAD,LTEST,LAXIS,LOUTS,LOUTE,
* LCAL(NPHI),LTIME
COMMON /RCONT/ SOR(NPHI),RESOR(NPHI),URF(NPHI),GAMT,
* BETA,GRAVX,GRAVY,GDS(NPHI),SORMAX,SLARGE,ALFA,
* GREAT,SMALL,ULID,OM,TPER
COMMON /VAR/ DENSIT,VISC,PRM,PRR,FLOMAS,FLOMOM,TREF,
* U(NXY),V(NXY),P(NXY),PP(NXY),T(NXY),F1(NXY),
* F2(NXY),DPX(NXY),DPY(NXY)
COMMON /GEO/ X(NX),Y(NY),XC(NX),YC(NY),FX(NX),FY(NY),R(NY)
COMMON /VAROLD/ TIME,DT,DTR,UO(NXY),VO(NXY),TO(NXY),
* UOO(NXY),VOO(NXY),TOO(NXY)
LOGICAL LWRITE,LREAD,LTEST,LAXIS,LOUTS,LOUTE,LCAL,LTIME
CHARACTER*20 FILRES,FILIN,FILOUT,FILGR,FILTER
-----
DOUBLE PRECISION:: A(302*62),B(302*62),TB(302),NU_LOW(302)
DOUBLE PRECISION:: NU_UP(302),KNF,KF,KS,FI,H

```

شکل (۸)

با استفاده از دستور OPEN هر یک از فایل های ورودی، خروجی و فایل اطلاعات شبکه با یک عدد معین تعریف و نامگذاری می شود به طوریکه در ادامه کد برای باز کردن فایل های موردنظر کافی است اعداد تعریف شده در داخل پرانتز آورده شود، مثلاً فایل ورودی dcpipe.inp با عدد پنج تعریف شده است و با استفاده از دستور Read (5,*) فایل ورودی باز شده و اطلاعات موجود در آن خوانده می شود، همچنین برای فایل ورودی، عدد دو و برای فایل اطلاعات شبکه عدد یک در نظر گرفته شده است بطوریکه با دستور

WRITE(2,*) READ(1,*) فایل grid.inp باز شده و مختصات گره ها خوانده می شود و با دستور (2,*) WRITE(1,*) فایل OUTC.TXT باز شده و نتایج موردنظر در آن ثبت می شود.

```
FILIN='DCPIPEC.inp'
FILOUT='OUTC.TXT'
FILGR='GRID.INP'
FILRES='OUTRESC.TXT'

OPEN (UNIT=5,FILE=FILIN)
OPEN (UNIT=2,FILE=FILOUT)
OPEN (UNIT=1,FILE=FILGR)
OPEN (UNIT=3,FILE=FILRES,FORM='UNFORMATTED')
REWIND 3
REWIND 5
REWIND 2
REWIND 1
```

شکل (۹)

یکی از ویژگی های کد PERIC در این است که بدون نیاز به تغییرات گسترده در کد می توان برای مسائل و شرایط مختلف استفاده کرد، بدین منظور متغیرهایی همچون LTEST, LWRITE, LREAD, LTIME, LOUTE, LOUTS, LAXIS قرار می گیرند و با توجه به تعریف این متغیرها (true یا false) در فایل ورودی، شرایط مسئله مشخص می شو، مثلا متغیر LAXIS برای مسائل لوله t (true) و کانال f (false) تعریف می شود و یا متغیر LTIME برای مسائل گذرا t (true) و برای مسائل پایا f (false) می باشد. قابل ذکر است که متغیرهایی که f (false) تعریف می شوند دستور IF مربوط به آن در برنامه خوانده نمی شود و تنها متغیرهای تعریف شده t (true) دستورات و محاسبات درون حلقه IF اجرا می شود.

در شکل زیر قسمتی از کد آورده شده است که وضعیت همگرایی حل برنامه را کنترل می کند، بدین صورت که مقادیر محاسبه شده در سابروتین ها فراخوانده می شوند و با دستور WRITE مقادیر سرعت، فشار و دما در نقطه مرجع و خطاهای آن (RESOR) در فایل خروجی OUTC.TXT ثبت می شود و ماکزیمم مقدار خطاهای سرعت، فشار و دما با نام SOURCE تعریف می شود، در این هنگام با استفاده از دستور IF یکی از حالت های زیر اتفاق می افتد.

۱- اگر مقدار ماکزیمم خطا (SOURCE) از مقدار خطای واگرایی (تعریف شده در فایل ورودی)

بیشتر بود، حل واگرا شده و برنامه با ارجاع به خط با شماره ۵۱۰ (به رنگ قرمز) پیغام واگرایی

صادر می کند و با دستور STOP برنامه قطع می شود.

۲- اگر مقدار ماکزیمم خطا از مقدار حداکثر خطای همگرایی کمتر بود، حل همگرا شده و برای رسم

نمودار و نمایش کانتورها برنامه به خط با شماره ۲۵۰ ارجاع داده می شود.

۳- اگر هیچ یک از حالات فوق پیش نیامد حل تکرار می شود. حداکثر تعداد تکرار حل، مقدار

MAXIT (تعریف شده در فایل ورودی) می باشد و نتایج آخرین تکرار حل در نمایش کانتورها

مورد استفاده قرار می گیرد.

```
DO ITER=1,MAXIT
  IF(LCAL(IU)) CALL CALCUV
  IF(LCAL(IU)) CALL OUTBC
  IF(LCAL(IP)) CALL CALCP
  IF(LCAL(IEN)) CALL CALCT

  ..CHECK CONVERGENCE OF OUTER ITERATIONS

  WRITE(2,606) ITER,RESOR(IU),RESOR(IV),RESOR(IP),
  * RESOR(IEN),U(IJMON),V(IJMON),P(IJMON),T(IJMON)
  * WRITE(*,606) ITER,RESOR(IU),RESOR(IV),RESOR(IP),
  * RESOR(IEN),U(IJMON),V(IJMON),P(IJMON),T(IJMON)
  SOURCE=MAX(RESOR(IU),RESOR(IV),RESOR(IP),RESOR(IEN))
  IF(SOURCE.GT.SLARGE) GO TO 510
  IF(SOURCE.LT.SORMAX) GO TO 250
END DO
```

شکل (۱۰)

مطابق روابط زیر مقادیر ضریب هدایت نانوسیال (KNF)، دمای بالک (TB) و عدد ناسلت دیواره های

پایینی (NU_LOW) و بالایی (NU_UP) بدست می آید که کد آن در شکل (۱۱) نشان داده شده است.

$$k_{nf} = k_f \times \frac{k_s + 2k_f - 2\phi(k_f - k_s)}{k_s + 2k_f + \phi(k_f - k_s)} \quad (3)$$

$$T_b = \frac{\int_0^H u T dy}{\int_0^H u dy} \simeq \frac{\sum_0^H u T . \Delta y}{\sum_0^H u . \Delta y} \quad (4)$$

$$Nu_{low} = - \frac{1}{(T_w - T_b)} \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{\partial T}{\partial y} \bigg|_{y=0} \simeq - \frac{1}{(T_w - T_b)} \frac{k_{nf}}{k_f} \frac{T_{J=1} - T_{J=0}}{y_{J=1} - y_{J=0}} \quad (5)$$

مطابق رابطه دمای بالک، برای محاسبه صورت (A(IJ)) و مخرج (B(IJ)) رابطه، از حلقه تکرار DO به عنوان جمع (\sum) استفاده می شود. توجه شود که مقادیر اولیه A و B صفر در نظر گرفته می شود.

```

250 CONTINUE
   KNF=KF*(KS+2*KF-2*FI*(KF-KS))/(KS+2*KF+FI*(KF-KS))

   DO I=1,NIM
      IJ=LI(I)+2
      A(IJ)=0.
      B(IJ)=0.
   ENDDO

   DO I=1,NIM
      DO J=2,NJM
         IJ=LI(I)+J
         A(IJ+1)=A(IJ)+U(IJ)*T(IJ)
         B(IJ+1)=B(IJ)+U(IJ)
      ENDDO

      TB(I)=A(IJ+1)/B(IJ+1)

      NU_LOW(I)=-1/(T(LI(I)+1)-TB(I))*(T(LI(I)+2)-T(LI(I)+1))/(0.001/60)*0.002*KNF/KF

      NU_UP(I)=1/(T(LI(I)+NJ)-TB(I))*(T(LI(I)+NJ)-T(LI(I)+NJM))/(0.001/60)*0.002*KNF/KF

   ENDDO

```

شکل (۱۱)

با بکارگیری دستورات OPEN ، WRITE ، DO و REWIND دستوراتی جهت رسم کانتور و نمودارها داده می شود با دستور OPEN فایل های خروجی ایجاد و نامگذاری می شود، اولین دستور WRITE مربوط به نامگذاری محورها و دومین دستور WRITE تعداد ردیف و ستون نتایج در فایل خروجی را مشخص می کند، با دستور REWIND با اجرا و ران مجدد کانتورها و نمودارهای قبلی پاک می شود و خروجی های جدید جایگزین می شود. فایل OUTPUTC.PLT مربوط به کانتورهای سرعت های افقی و

عمودی و فشار و دما می باشد و فایل های NU_LOW و NU_UP به ترتیب مربوط به نمودارهای عدد ناسلت دیواره های پایینی و بالایی می باشد.

```

OPEN(8,FILE='OUTPUTC.PLT')
REWIND (8)
WRITE(8,*) 'VARIABLES=X,Y,U,V,P,T'
WRITE(8,*) 'ZONE I=',NI,'J=',NJ,'F=POINT'
DO J=1,NJ
DO I=1,NI
IJ=LI(I)+J
WRITE(8,*) XC(I),YC(J),U(IJ),V(IJ),P(IJ),T(IJ)
ENDDO
ENDDO

OPEN(20,FILE='NU_LOW.PLT')
REWIND (20)
WRITE(20,*) 'VARIABLES=X/H,NU_LOW'
WRITE(20,*) 'ZONE I=',NI-2,'F=POINT'
DO I=2,NIM
WRITE(20,*) XC(I)/H,NU_LOW(I)
ENDDO

OPEN(21,FILE='NU_UP.PLT')
REWIND (21)
WRITE(21,*) 'VARIABLES=X/H,NU_UP'
WRITE(21,*) 'ZONE I=',NI-2,'F=POINT'
DO I=2,NIM
WRITE(21,*) XC(I)/H,NU_UP(I)
ENDDO

```

شکل (۱۲)

۶- شبکه بندی گره ها:

یکی از قدرتهای کد peric در آن است که می تواند مختصات دوبعدی گره ها را به مختصات یک بعدی تبدیل نماید بطوریکه هر گره فقط با یک شماره گره نمایش داده می شود، این ویژگی باعث می شود سرعت ران بالا رفته و زمان ران به شدت کاهش پیدا کند. در این کد شماره هر گره از روابط زیر بدست می آید که در آن شماره گره، NJ تعداد گره های ماکزیمم در جهت y و LI(I) شماره گره تصویر شده روی محور X و همچنین I و J مولفه های مختصات دوبعدی گره ها می باشد.

$$LI(I) = (I-1) \times NJ$$

$$IJ = LI(I) + J$$

طبق تعریف رابطه فوق، شماره گره ها روی مرزهای کانال از روابط زیر بدست می آید.

$$IJ = LI(I)+1$$

شماره گره های روی دیواره پایینی

$$IJ = LI(I)+NJ$$

شماره گره های روی دیواره بالایی

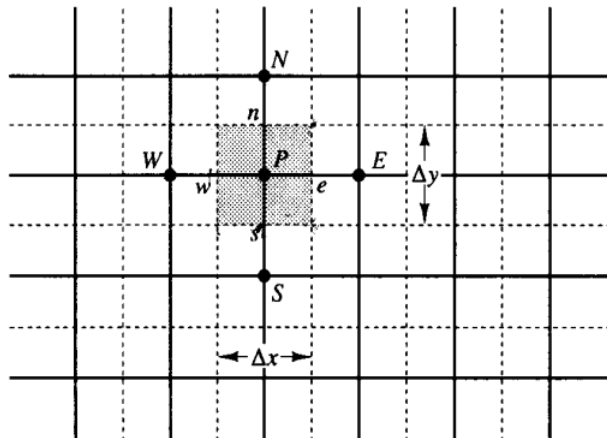
$$IJ = LI(1)+J$$

شماره گره های روی مرز شرقی (ورودی)

$$IJ = LI(NI)+ J$$

شماره گره های روی مرز غربی (خروجی)

در این کد معادلات ناویراستوکس سرعت، فشار و دما پس از گسسته سازی معادلات به ماتریس های ضرایب و ترمهای چشمه تبدیل می شوند که در آن متغیرهای مجهول، مولفه های سرعت، فشار و دما در گره هدف و گره های موجود در مجاورت گره هدف می باشد. مثلاً در شکل زیر قسمتی از شبکه گره ها نشان داده شده است که در آن P گره هدف، E گره شرقی، W گره غربی، N گره شمالی و S گره جنوبی می باشد و همچنین خطوط کمرنگ شامل e ، w ، n ، s وجه های یک المان بعنوان یک حجم کنترل را تشکیل می دهند. قابل ذکرست که تراکم شبکه بندی یکنواخت بوده و ابعاد المانها برابر می باشند، البته به غیر از نواحی مرزی که مرکز وجه المان منطبق با گره روی مرز تعریف می شود.



شکل (۱۳)

اگر شماره گره هدف IJ باشد شماره گره های همسایه از روابط زیر بدست می آید.

$$(IJ)_N = IJ + 1$$

شماره گره شمالی

$$(IJ)_S = IJ - 1$$

شماره گره جنوبی

$$(IJ)_E = IJ + NJ$$

شماره گره شرقی

$$(IJ)_W = IJ - NJ$$

شماره گره غربی

در قسمت زیر به توضیح هر یک از سابروتین ها پرداخته می شود.

۶-۱- سابروتین CALCUV :

در این سابروتین ضرایب ماتریس U (سرعت افقی) و V (سرعت عمودی) محاسبه می شود، به طوریکه معادلات ناویراستوکس سرعت در جهت X و Y پس از گسسته سازی معادلات به ماتریس ضرایب تبدیل می شود که در آن متغیرهای مجهول، مولفه های سرعت در گره هدف و گره های موجود در مجاورت گره هدف می باشد.

هر یک از این متغیرهای مجهول ضرایب مخصوص به خود را داراست، همچنین مقادیر ترم چشمه محاسبه و تعیین می شود. مثلاً اگر ضرب ماتریسی $AX=B$ در نظر گرفته شود ماتریس A ضرایب محاسبه شده و ماتریس B ترم چشمه و ماتریس X مقادیر متغیرهای مجهول مربوط به مولفه های سرعت می باشد که در این سابروتین مقادیر ضرایب ماتریس مجهول و نیز آرایه های ترم چشمه محاسبه و یا تصحیح می شود. توجه شود که مقادیر ضرایب سرعت در نواحی روی مرز به طور پیش فرض صفر در نظر گرفته می شود و در صورت لزوم در سابروتین BCUV این مقادیر تصحیح می شود.

این سابروتین به طور کلی از سه بخش تشکیل شده است، بخش اول به محاسبه ماتریس ضرایب گره های شرقی (AE) و غربی (AW) و ترمهای چشمه SU و SV و بخش دوم به محاسبه ماتریس ضرایب گره های شمالی (AN) و جنوبی (AS) و تصحیح ترم چشمه پرداخته می شود و بخش سوم به اثرات فشار و شناوری ناشی از تغییر چگالی نانوسیال می پردازد و ترم های چشمه تصحیح شده و ضرایب گره های هدف (AP) محاسبه می شود.

۶-۲- سابروتین CALCP : این سابروتین همانند سابروتین CALCUV می باشد با تفاوت اینکه

ماتریس ضرایب و ترم های چشمه از معادله فشار بدست می آید و متغیرهای مجهول، مقادیر فشار در گره

هدف و گره های مجاور آن می باشد. در این سابروتین همچنین به اثرات فشار بر روی دبی جرمی و سرعت پرداخته می شود و مقادیر دبی جرمی و سرعت تصحیح می شود.

۳-۶- سابروتین CALCT : این سابروتین نیز همانند سابروتین های CALCP و CALCUV می باشد که ماتریس ضرایب و ترم های چشمه از معادله دما حاصل می شود و متغیرهای مجهول، مقادیر دما در گره هدف و گره های همسایه آن می باشد. مقادیر ضرایب دما بر روی مرز به طور پیش فرض در این سابروتین صفر در نظر گرفته می شود و در سابروتین BCT این مقادیر تصحیح می شود.

۴-۶- سابروتین PRINT : در این سابروتین متغیرهای مورد نظر در خروجی ثبت می شود، همچنین آرایش نمایش متغیرها در خروجی با دستور FORMAT مشخص می شود.

۵-۶- سابروتین SIPSOL : پس از اینکه در سابروتین های قبلی مقادیر ماتریس ضرایب و ترم های چشمه محاسبه شد، در این سابروتین مقادیر سرعت، فشار و دمای هر یک از گره ها مطابق کد زیر به روش "LU" حل می شود، روش LU روش با حل دقیق بوده و جزء روش های تکراری نمی باشد.

```

.COEFFICIENTS OF UPPER AND LOWER TRIANGULAR MATRICES
DO I=2,NIM
  DO IJ=LI(I)+2,LI(I)+NJM
    LW(IJ)=AW(IJ)/(1.+ALFA*UN(IJ-NJ))
    LS(IJ)=AS(IJ)/(1.+ALFA*UE(IJ-1))
    P1=ALFA*LW(IJ)*UN(IJ-NJ)
    P2=ALFA*LS(IJ)*UE(IJ-1)
    LPR(IJ)=1./(AP(IJ)+P1+P2-LW(IJ)*UE(IJ-NJ)-LS(IJ)*UN(IJ-1))
    UN(IJ)=(AN(IJ)-P1)*LPR(IJ)
    UE(IJ)=(AE(IJ)-P2)*LPR(IJ)
  END DO
END DO

```

شکل (۱۴)

همچنین در این سابروتین مقادیر باقیمانده (RESL) یا خطای هر یک از متغیرها محاسبه می شود. مطابق کد زیر متغیر FI مربوط به جواب تمام متغیرهای مجهول می باشد، بطوریکه $I=1$ مربوط به جواب سرعت افقی، $I=2$ سرعت عمودی، $I=3$ فشار و $I=4$ جواب دما می باشد.


```

.CALCULATE RESIDUAL AND OVERWRITE IT BY INTERMEDIATE VECTOR
DO I=2,NIM
DO IJ=LI(I)+2,LI(I)+NJM
  RES(IJ)=SU(IJ)-AN(IJ)*FI(IJ+1)-AS(IJ)*FI(IJ-1)-
  *      AE(IJ)*FI(IJ+NJ)-AW(IJ)*FI(IJ-NJ)-AP(IJ)*FI(IJ)
  RESL=RESL+ABS(RES(IJ))
  RES(IJ)=(RES(IJ)-LS(IJ)*RES(IJ-1)-LW(IJ)*RES(IJ-NJ))*LPR(IJ)
END DO
END DO

.STORE INITIAL RESIDUAL SUM FOR CHECKING CONV. OF OUTER ITER.
IF(L.EQ.1) RESOR(IFI)=RESL
RSM=RESL/(RESOR(IFI)+1.E-20)

.BACK SUBSTITUTION AND CORRECTION
DO I=NIM,2,-1
DO IJ=LI(I)+NJM,LI(I)+2,-1
  RES(IJ)=RES(IJ)-UN(IJ)*RES(IJ+1)-UE(IJ)*RES(IJ+NJ)
  FI(IJ)=FI(IJ)+RES(IJ)
END DO
END DO

```

شکل (۱۵)

۶-۶- سابروتین **PBUND** : در این سابروتین شرایط مرزی فشار لحاظ می شود که به طور کلی از دو بخش تشکیل شده است. بخش اول به شرایط مرزی دیواره های بالایی و پایینی و بخش دوم به شرایط مرزی ورودی و خروجی پرداخته می شود.

۶-۷- سابروتین **BCUV** : در این سابروتین به شرایط مرزی مولفه های سرعت افقی (U) و عمودی (V) پرداخته می شود و ضرایب ماتریس **APU** و **APV** و ترم های چشمه **SU** و **SV** واقع بر گره های روی مرز محاسبه می شود. این قسمت از چهار حلقه **DO** تشکیل شده است که حلقه اول مربوط به دیواره پایینی، حلقه دوم مربوط به دیواره بالایی، حلقه سوم برای مرز ورودی و حلقه چهار برای مرز خروجی می باشد.

مهمترین تفاوت بین این حلقه ها در این است که برای شرایط مرزی دیواره، مقدار دبی جرمی (F) برابر صفر است، در حالیکه برای مرزهایی که جریان جاری است دبی جرمی لحاظ می شود، همچنین برای دیواره ها شرط عدم لغزش ($U=0$, $V=0$) برقرار است. قابل ذکر است که برای مرز ورودی که نیمی از آن را مانع تشکیل می دهد از شرط دستوری **IF** استفاده شده است، که شرط اول برای نیمه بالایی که جریان جاری

است و شرط بعدی برای نیمه پایینی است که مانع در آن قرار دارد. توجه شود که سرعت ورودی سهمی شکل در سابروتین MODINP محاسبه شده و اطلاعات آن در این سابروتین استفاده می شود.

در شکل زیر کد مربوط به شرایط مرزی ورودی سرعت نشان داده شده است.

```
.WEST BOUNDARY (INLET, PRESCRIBED VELOCITY)
DO J=1,NJ
  IJ=LI(2)+J
  D=0.5*VISC*(Y(J)-Y(J-1))*(R(J)+R(J-1))/(XC(2)-XC(1))
  IF(YC(J)>=YC(NJ)/2) THEN
    AWC=D+F1(IJ-NJ)
    APU(IJ)=APU(IJ)+AWC
    APV(IJ)=APV(IJ)+AWC
    SU(IJ)=SU(IJ)+AWC*U(IJ-NJ)
    SV(IJ)=SV(IJ)+AWC*V(IJ-NJ)
  ELSE
    APU(IJ)=APU(IJ)+D
    APV(IJ)=APV(IJ)+D
    SU(IJ)=SU(IJ)+D*U(IJ-NJ)
    SV(IJ)=SV(IJ)+D*V(IJ-NJ)
  ENDIF
END DO
```

شکل (۱۶)

۸-۶- سابروتین BCT : در این سابروتین به شرایط مرزی دما پرداخته می شود و شباهت زیادی به سابروتین BCUV دارد و ضرایب ماتریس AP و ترم های چشمه SU واقع در گره های روی مرز بدست آورده می شوند. همچنین مقادیر دمای ورودی گره ها که تابع خطی از ارتفاع می باشد، در سابروتین MODINP محاسبه شده و نتایج آن در این سابروتین استفاده می شود.

این سابروتین و همچنین سابروتین BCUV جزء سابروتین های مهم این کد محسوب می شود و برای مسائل و هندسه های مختلف نیاز به تغییر این قسمتها از کد می باشد.

۹-۶- سابروتین OUTBC : در این سابروتین مقادیر سرعت و دبی جرمی خروجی تصحیح می شود. از آنجاکه مقدار دبی جرمی در ورودی و خروجی یکسان است، در این قسمت مطابق کد زیر، نسبت دبی جرمی ورودی بر دبی جرمی خروجی (FAC) در مقادیر سرعت و دبی جرمی خروجی ضرب می شود تا از یک سو حل زودتر همگرا شود و از سوی دیگر قانون بقای جرم ارضاء شود.

```

. EAST BOUNDARY IS OUTLET; CALCULATE MASS FLUXES USING U_P
FMOUT=0.
DO J=2,NJM
  IJ=LI(NIM)+J
  F1(IJ)=0.5*DENSIT*(Y(J)-Y(J-1))*(R(J)+R(J-1))*U(IJ)
  FMOUT=FMOUT+F1(IJ)
END DO

. CALCULATE SCALING FACTOR TO MAKE MASS FLUX EQUAL INCOMING ONE
FAC=FLOMAS/(FMOUT+1.E-30)

. CORRECT VELOCITY AND MASS FLUXES AT OUTLET
DO J=2,NJM
  IJ=LI(NIM)+J
  F1(IJ)=F1(IJ)*FAC
  U(IJ+NJ)=U(IJ)*FAC
END DO

RETURN
END

```

شکل (۱۷)

توجه شود که مقادیر دبی جرمی و رودی در سابروتین MODINP محاسبه شده و در این سابروتین مورد استفاده قرار می گیرد.

۶-۱۰- سابروتین MODINP : در این سابروتین مقادیر متغیرهای تعیین شده در فایل ورودی dcpipe.inp و کد تولید شبکه گره (grid.f) با دستور READ خوانده شده تا اطلاعات آن در این کد استفاده شود.

قابل ذکر است که مطابق کد زیر اطلاعات مربوط به چگالی و ویسکوزیته دینامیکی در فایل ورودی مربوط به سیال پایه (آب) می باشد و مقادیر چگالی و ویسکوزیته نانوسیال که تابعی از چگالی و ویسکوزیته سیال پایه آب می باشد، در این قسمت محاسبه می شود.

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (۱)$$

$$\rho_{nf} = (1-\phi).\rho_f + \phi.\rho_s \quad (۲)$$

```

READ(5,*) DENSIT,VISC,PRM,GRAVX,GRAVY,BETA,TH,TC,TREF
FI=0.1
DENSIT_S=8933

VISC=VISC/(1-FI)**2.5
DENSIT=(1-FI)*DENSIT+FI*DENSIT_S

```

شکل (۱۸)

در بخش بعدی مطابق کد زیر مختصات مرکز وجه المان ها تعریف می شود که دقیقا در وسط دو گره متوالی قرار می گیرد، البته به غیر از نواحی مرزی که مرکز وجه المان منطبق با گره روی مرز تعریف می شود.

```
.X- COORDINATES OF CV-CENTERS
DO I=2,NIM
  XC(I)=0.5*(X(I)+X(I-1))
END DO
XC(1)=X(1)
XC(NI)=X(NIM)

.Y- COORDINATES OF CV-CENTERS
DO J=2,NJM
  YC(J)=0.5*(Y(J)+Y(J-1))
END DO
YC(1)=Y(1)
YC(NJ)=Y(NJM)
```

شکل (۱۹)

همچنین از آنجاکه مقادیر سرعت و دمای ورودی به صورت تابع می باشد و فایل ورودی dcpipe.inp فقط مقادیر ثابت می پذیرد در فایل ورودی مقادیر سرعت و دمای ورودی مقادیر ثابتی قرار داده و در این سابروتین این مقادیر به صورت تابعی از ارتفاع تصحیح می شود. پس از تعیین سرعت ورودی مقادیر دبی جرمی و مومنتوم ورودی محاسبه می شود.

```
IF(LTIME) THEN
  CALL BCTIME
ELSE
  FLOMAS=0.
  FLOMOM=0.
  DO J=1,NJ
    IJ=LI(1)+J
    V(IJ)=VIN
    F2(IJ)=0.

    IF(YC(J)>=YC(NJ)/2) THEN
      P(IJ)=PIN
      U(IJ)=UIN*12*((YC(J)-0.001)/YC(NJ)-2*((YC(J)-0.001)/YC(NJ))**2)
      F1(IJ)=0.5*DENSIT*(Y(J)-Y(J-1))*(R(J)+R(J-1))*U(IJ)
      T(IJ)=TIN*(1-2*(YC(J)-0.001)/YC(NJ))+300
    ELSE
      U(IJ)=0.0
      F1(IJ)=0.
    ENDIF

    FLOMAS=FLOMAS+F1(IJ)
    FLOMOM=FLOMOM+F1(IJ)*U(IJ)
  END DO
ENDIF
```

شکل (۲۰)

در پایان این سابروتین متغیرهای مورد نظر در فایل خروجی ثبت می شود.

۶-۱۱- سابروتین **BCTIME** : در این سابروتین سرعت، دبی جرمی و مومنتوم مرز ورودی برای مسائل گذرا تعیین می شود.

۶-۱۲- سابروتین **OUT2** : در این سابروتین برخی از متغیرها بررسی می شود تا روند حل به سمت حل مستقل از مش همگرا شود و خطای گسسته سازی تخمین زده می شود، همچنین در این قسمت مقدار انتقال حرارت تبادل شده از مرزها محاسبه شده و در خروجی ثبت می شود.

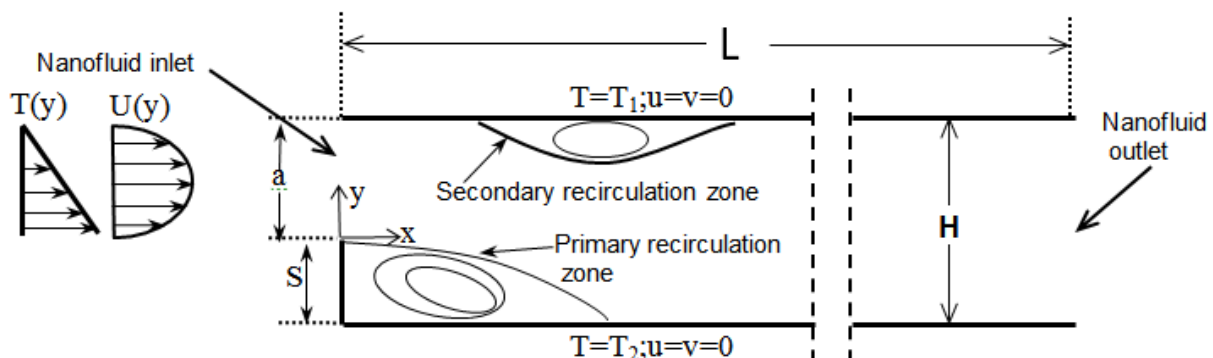
۷- بیان نتایج:

اعتبار سنجی:

در اولین مرحله لازم نتایج حاصل از کد توسعه یافته Peric با نتایج مرجع مورد مقایسه قرار گیرد. برای این کار نتایج کد توسعه یافته Peric (کار کنونی) با نتایج Eiyad [1] مورد مقایسه قرار گرفت. در شکل (۲۱) هندسه مورد بررسی در پژوهش Eiyad [1] نشان داده شده است. در پژوهش انجام شده توسط [1] Eiyad نانوسیال آب-Cu ، $Re=200$ ، $\gamma=2$ (نسبت منظر/نسبت عرض کانال به عرض جت)، $T_1=300K$ ، $T_2=330K$ ، $L/H=30$ می باشد. پروفایل سرعت و دمای ورودی به صورت زیر می باشد:

$$T = (T_2 - T_1)(1 - 2y) + T_c \quad (۶)$$

$$U(y) = 12(y - 2y^2) \times U_m, \quad U_m = \frac{\mu \times Re}{\rho \times H} \quad (۷)$$



شکل (۲۱)

رابطه های تجربی مختلفی برای پیش بینی ضریب انتقال حرارت و ویسکوزیته نانوسیال آب-Cu وجود دارد.

در این قسمت از پژوهش از رابطه های زیر برای پیش بینی خواص نانوسیال استفاده شده است.

برای محاسبه ضریب رسانش گرمایی نانوسیالات از رابطه سانترا و همکاران [2] استفاده شده است.

$\frac{k_{nf}}{k_f} = 1 + \frac{k_p A_p}{k_f A_f} + c k_p Pe \frac{A_p}{k_f A_f} \quad ,$	(۸)
---	-----

$\frac{A_p}{A_f} = \frac{d_f}{d_p} \frac{\phi}{(1-\phi)} \quad , c=25000, \quad Pe = \frac{u_p d_p}{\alpha_f} \quad , \quad u_p = \frac{2kpT}{\pi\mu_f d_p^2}$	(۹)
--	-----

برای محاسبه ویسکوزیته نانوسیالات از رابطه برینکمن و همکاران [3] استفاده شده است.

$\mu_{nf} = \frac{\mu_f}{(1-\phi)^{2.5}}$	(۱۰)
---	------

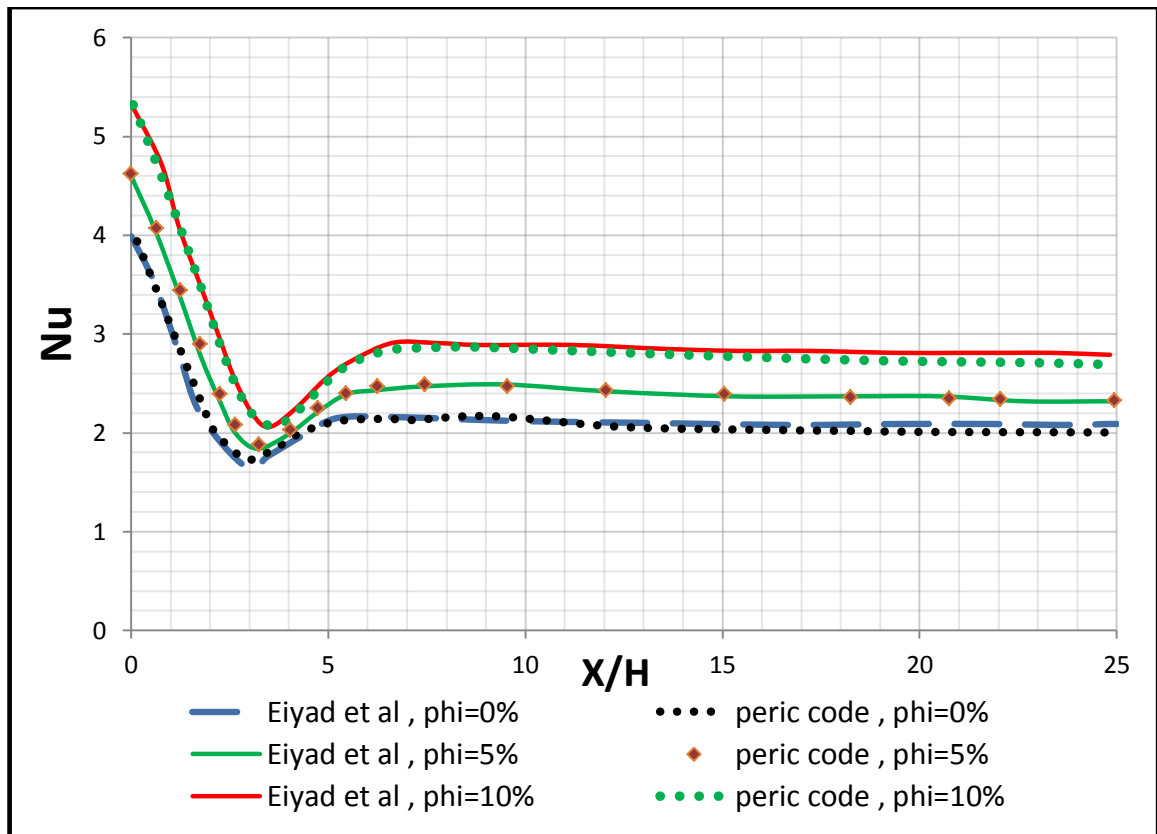
در نمودارهای (۲۲) و (۲۳) نتایج کد Peric توسعه یافته (کار کنونی) با نتایج کار [1] Eiyad با هم

مقایسه شده است. در نمودار (۲۲) عدد ناسلت در دیواره بالایی و در نمودار (۲۳) عدد ناسلت در دیواره

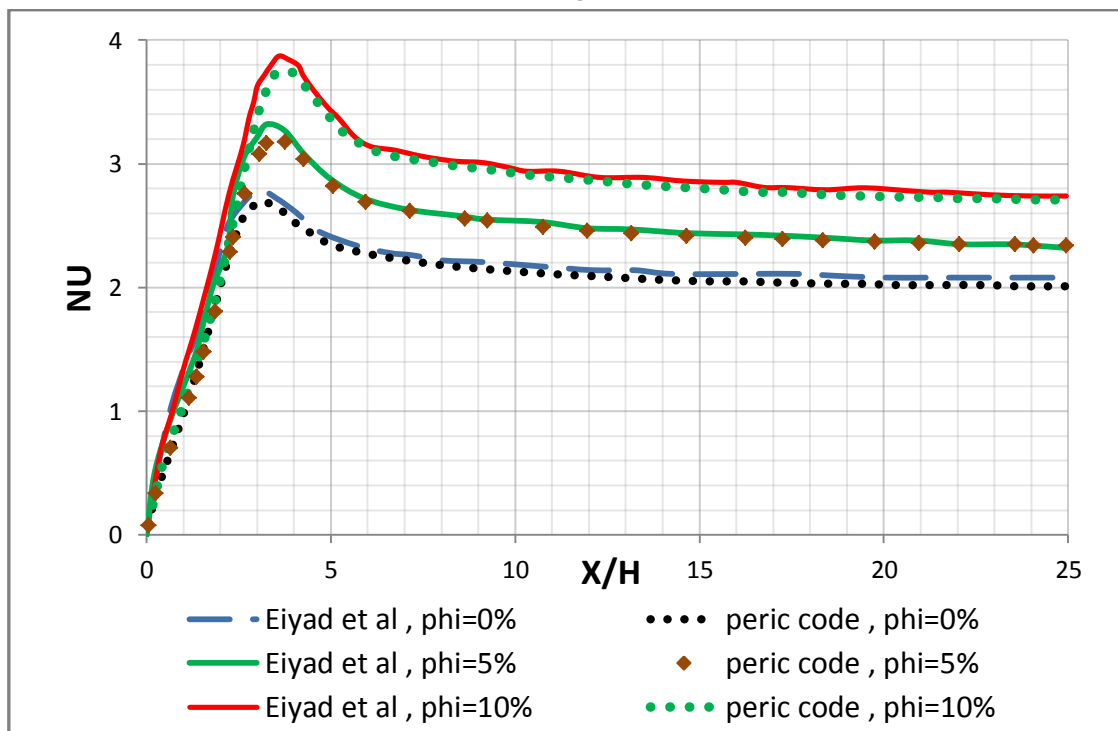
پایینی نشان داده شده است. از نمودارها مشخص است که نتایج کد Peric توسعه یافته (کار کنونی) با

نتایج کار [1] Eiyad با یکدیگر بسیار نزدیک هستند که نشان دهنده روند صحیح کدتویسی و اعتبار کد

توسعه یافته Peric می باشد.



شکل (۲۲)

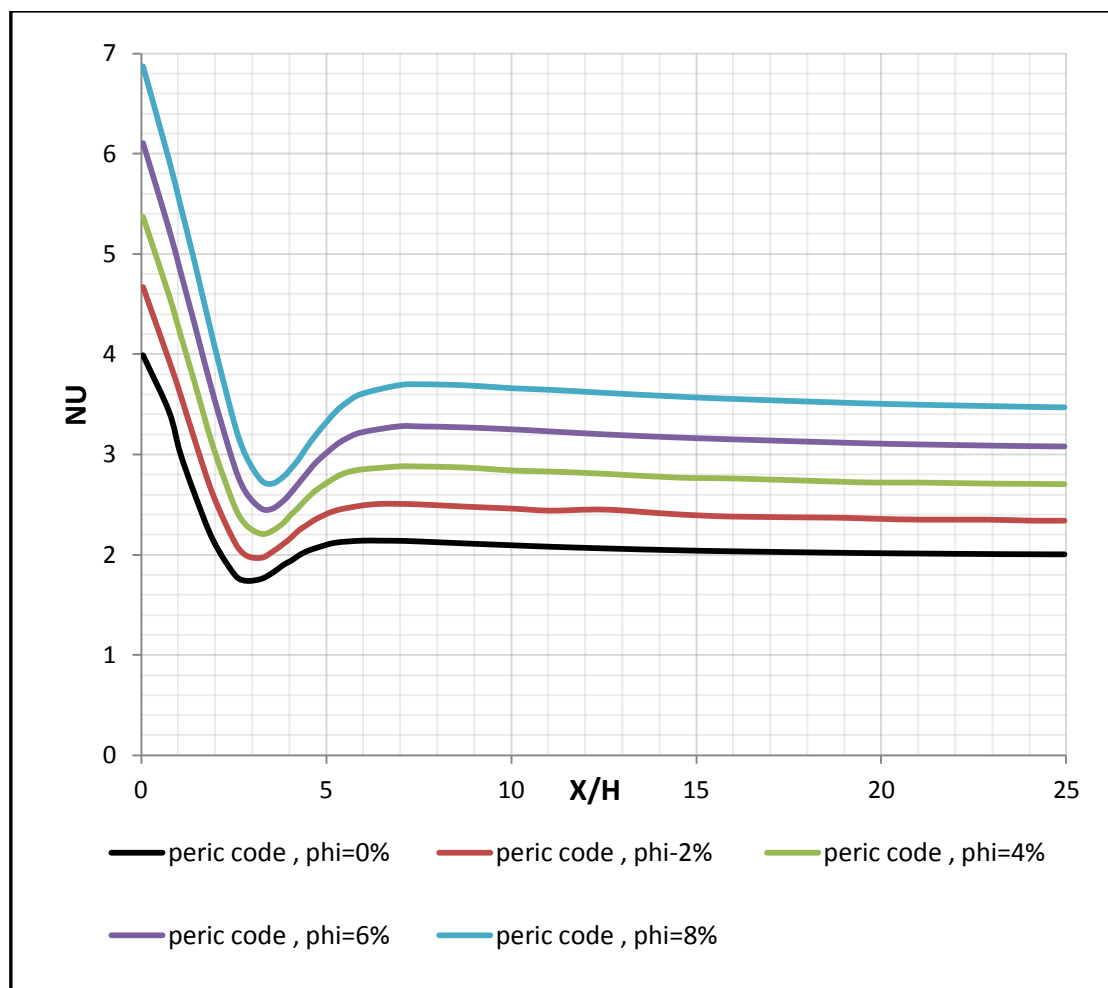


شکل (۲۳)

بررسی اثر کسر حجمی نانوسیال روی پارامترهای ترموهیدرولیکی :

در این قسمت اثر کسر حجمی نانوذرات روی پارامترهای مختلف ترموهیدرولیکی جت محدود مورد بررسی قرار می گیرد. در این مرحله $T_1=300K$ ، $AR=2$ ، $L/H=30$ ، $Re=200$ ، $dp=100\text{ nm}$ ، $T_2=330K$ هندسه جت کانال مطابق شکل (۲۱)، دما و سرعت نانوسیال ورودی مطابق معادله های (۶) و (۷) خواهد بود.

در شکل (۲۴) عدد ناسلت نانوسیال در کسرهای حجمی مختلف در هندسه جت محدود نشان داده شده است.

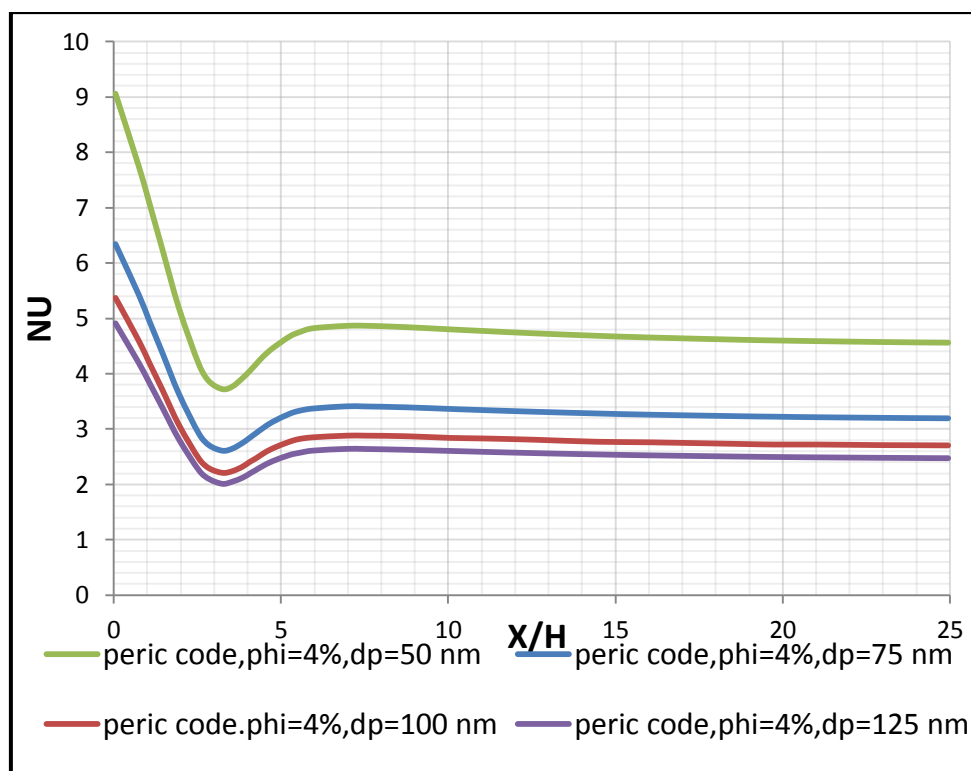


شکل (۲۴)

همان طور که از شکل (۲۴) مشخص است هر چه کسر حجمی نانوذرات بیشتر باشد عدد ناسلت نیز بالاتر است. طبق رابطه (۸) و (۹) از آنجا که ضریب رسانش حرارتی نانوذرات از ضریب رسانش سیال پایه بیشتر است بنابراین افزودن نانوذرات به سیال پایه موجب افزایش ضریب انتقال حرارت نانوسیال شده و در نتیجه خواص حرارتی نانوسیال بهبود می یابد بنابراین هر چه کسر حجمی نانوذرات افزایش یابد عدد ناسلت نیز افزایش می یابد.

بررسی اثر قطر نانوذرات روی پارامترهای ترموهیدرولیکی :

در این قسمت اثر قطر نانوذرات روی پارامترهای مختلف ترموهیدرولیکی جت محدود مورد بررسی قرار می گیرد. در این مرحله $\Phi=4\%$ ، $Re=200$ ، $L/H=30$ ، $AR=2$ ، $T_1=300K$ ، $T_2=330K$ ، هندسه جت کانال مطابق شکل (۲۱)، دما و سرعت نانوسیال ورودی مطابق معادله های (۶) و (۷) خواهد بود. در شکل (۲۵) عدد ناسلت نانوسیال در قطرهای مختلف نانوذرات در هندسه جت محدود نشان داده شده است.



شکل (۲۵)

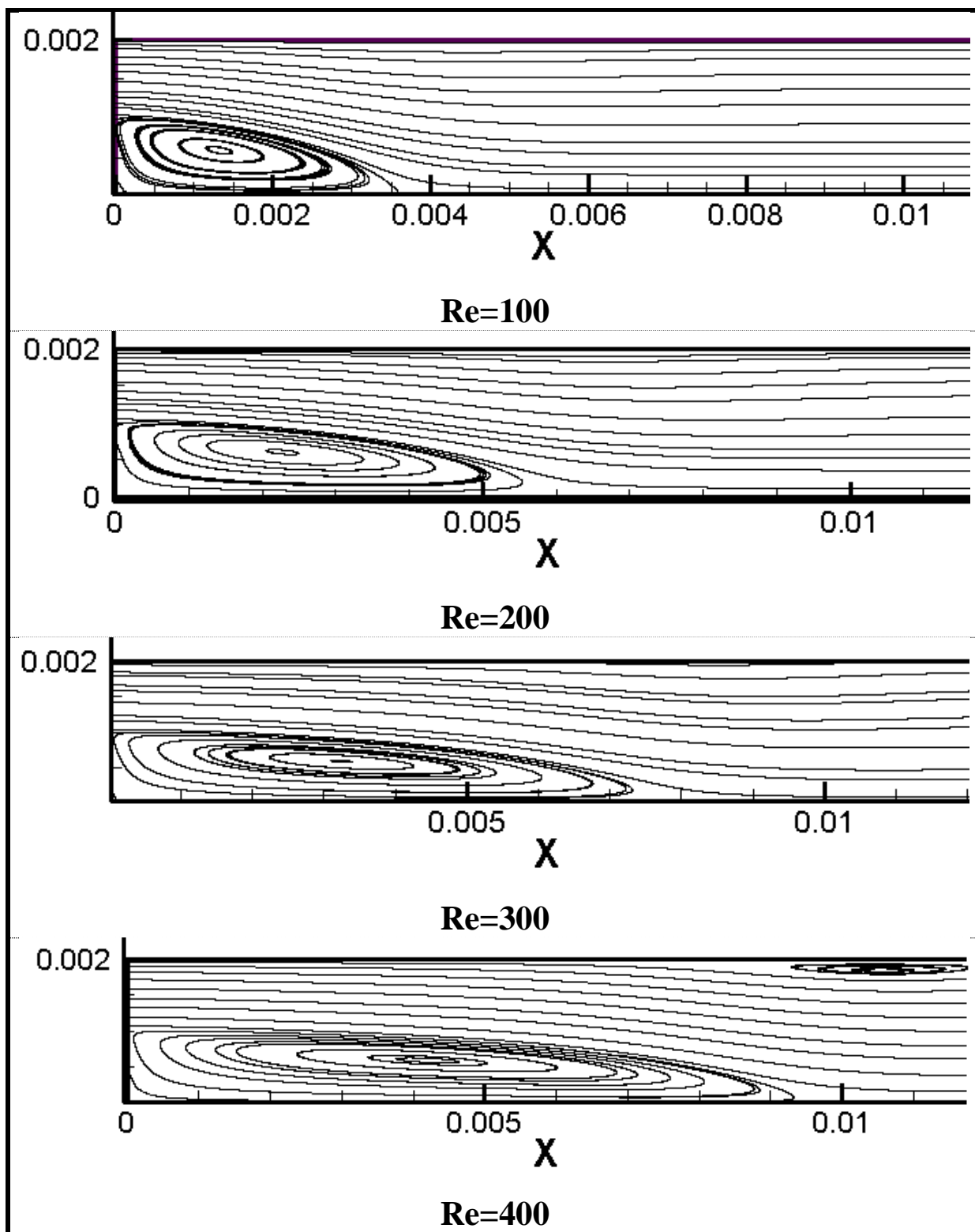
نتایج نشان می‌دهد با کاهش قطر نانوذرات ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. از رابطه های (۸) و (۹) مشخص است که نانوسیال با نانوذرات کوچکتر نسبت به نانوذرات بزرگتر ضریب هدایت گرمایی بالاتری دارند و ضریب هدایت گرمایی بزرگتر منجر به عدد ناسلت بزرگتر می‌شود بنابراین هر چه قطر نانوذرات کوچکتر باشد عدد ناسلت در هندسه جت محدود بزرگتر می‌شود.

بررسی اثر عدد رینولدز روی پارامترهای ترموهیدرولیکی :

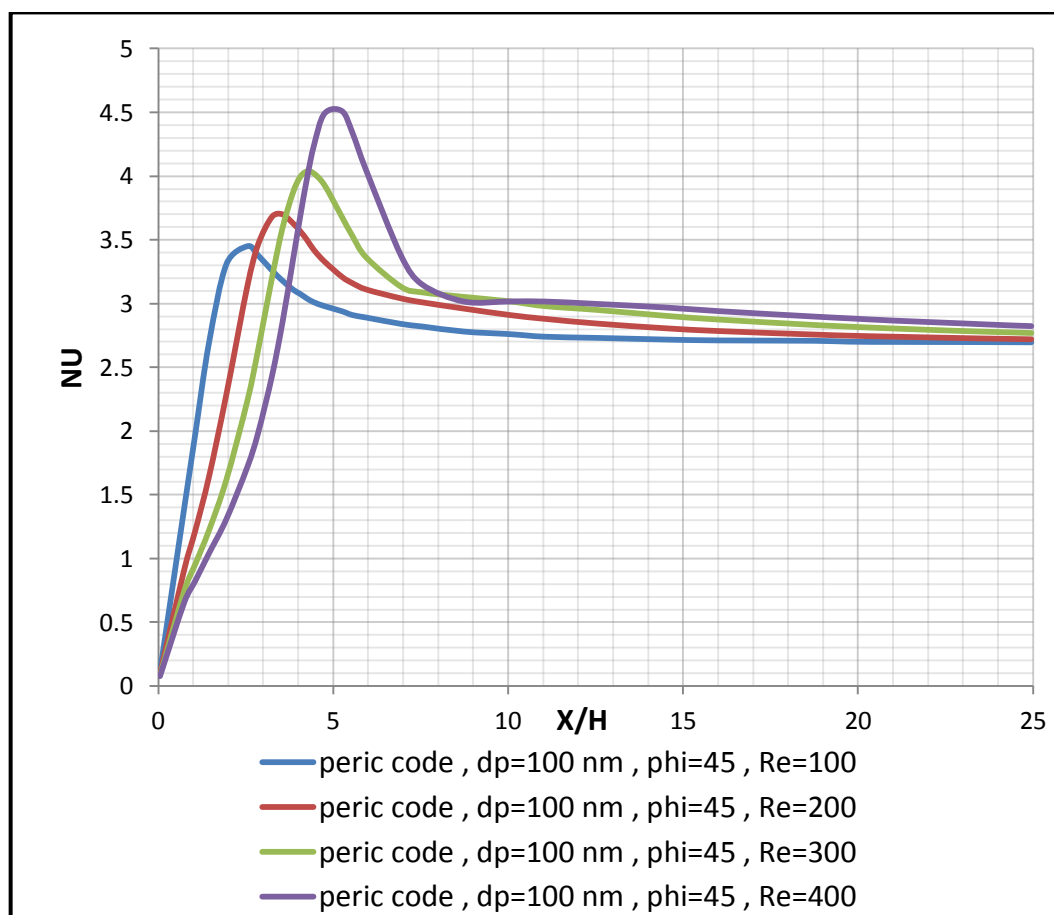
در این قسمت اثر عدد رینولدز روی پارامترهای مختلف ترموهیدرولیکی جت محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این مرحله $\Phi=4\%$, $d_p=100\text{ nm}$, $L/H=30$, $AR=2$, $T_1=300\text{K}$, $T_2=330\text{K}$ ، هندسه جت کانال مطابق شکل (۲۱) ، دما و سرعت نانوسیال ورودی مطابق معادله های (۶) و (۷) خواهد بود.

در شکل (۲۶) خطوط جریان برای اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. با افزایش رینولدز نفوذ جت در داخل کانال بیشتر شده و با ناحیه‌های برگشت جریان بزرگتری مواجه می‌شویم و بنابراین طول ناحیه‌ی توسعه‌یافتگی در داخل کانال افزایش می‌یابد.

در شکل (۲۷) عدد ناسلت نانوسیال در اعداد رینولدز مختلف در هندسه جت محدود نشان داده شده است. نتایج بدست آمده از نمودار (۲۷) نشان می‌دهد هر چه عدد رینولدز بزرگتر باشد طول ناحیه توسعه یافتگی در داخل کانال بیشتر خواهد بود.



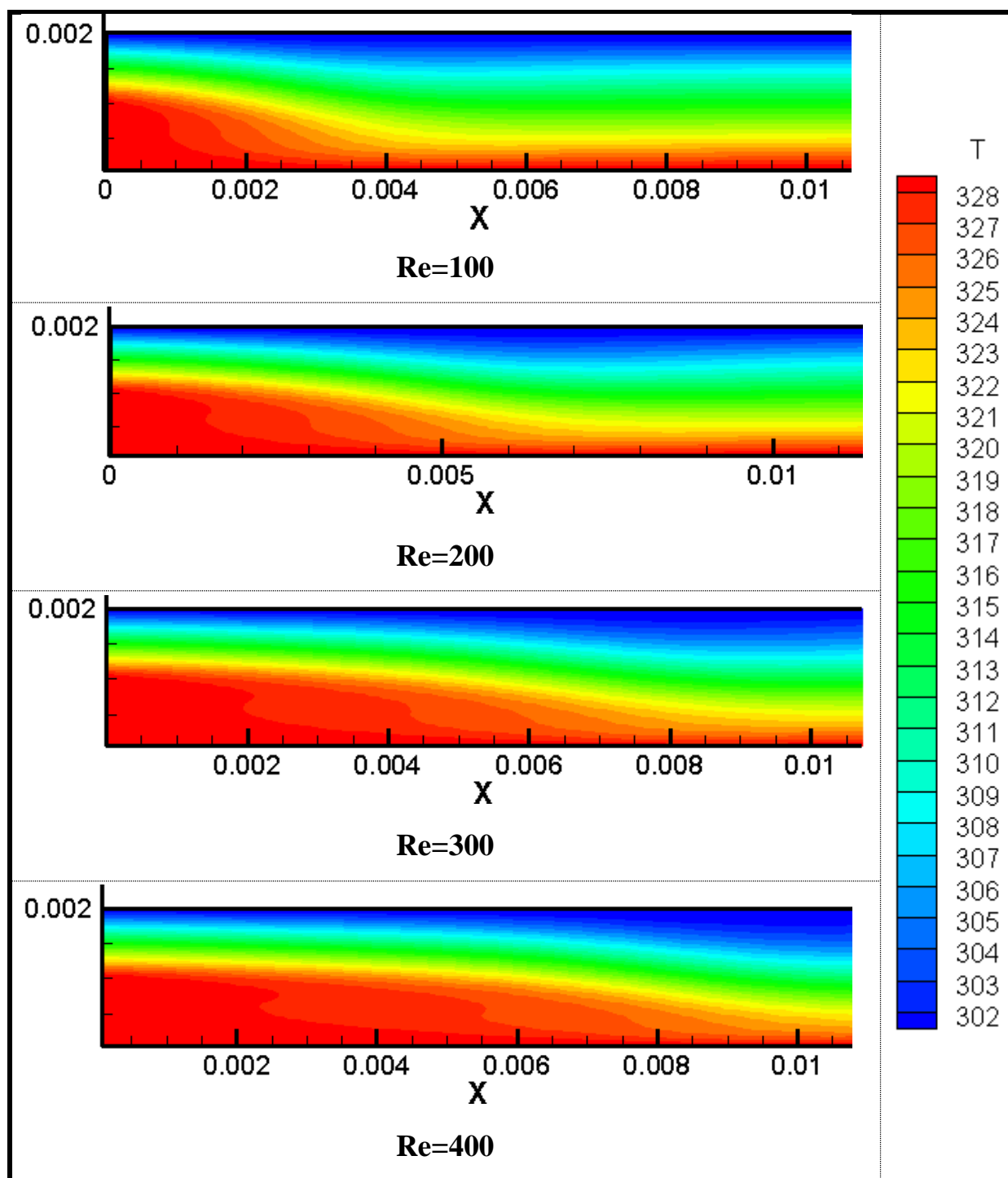
شکل (۲۶) : خطوط جریان نانوسیال در شرایط $d_p=100 \text{ nm}$ ، $L/H=30$ ، $AR=2$ و در اعداد رینولدز مختلف



شکل (۲۷) : نمودار عدد ناسلت نانوسیال در شرایط $d_p=100\text{ nm}$ ، $L/H=30$ ، $AR=2$ و در اعداد رینولدز مختلف

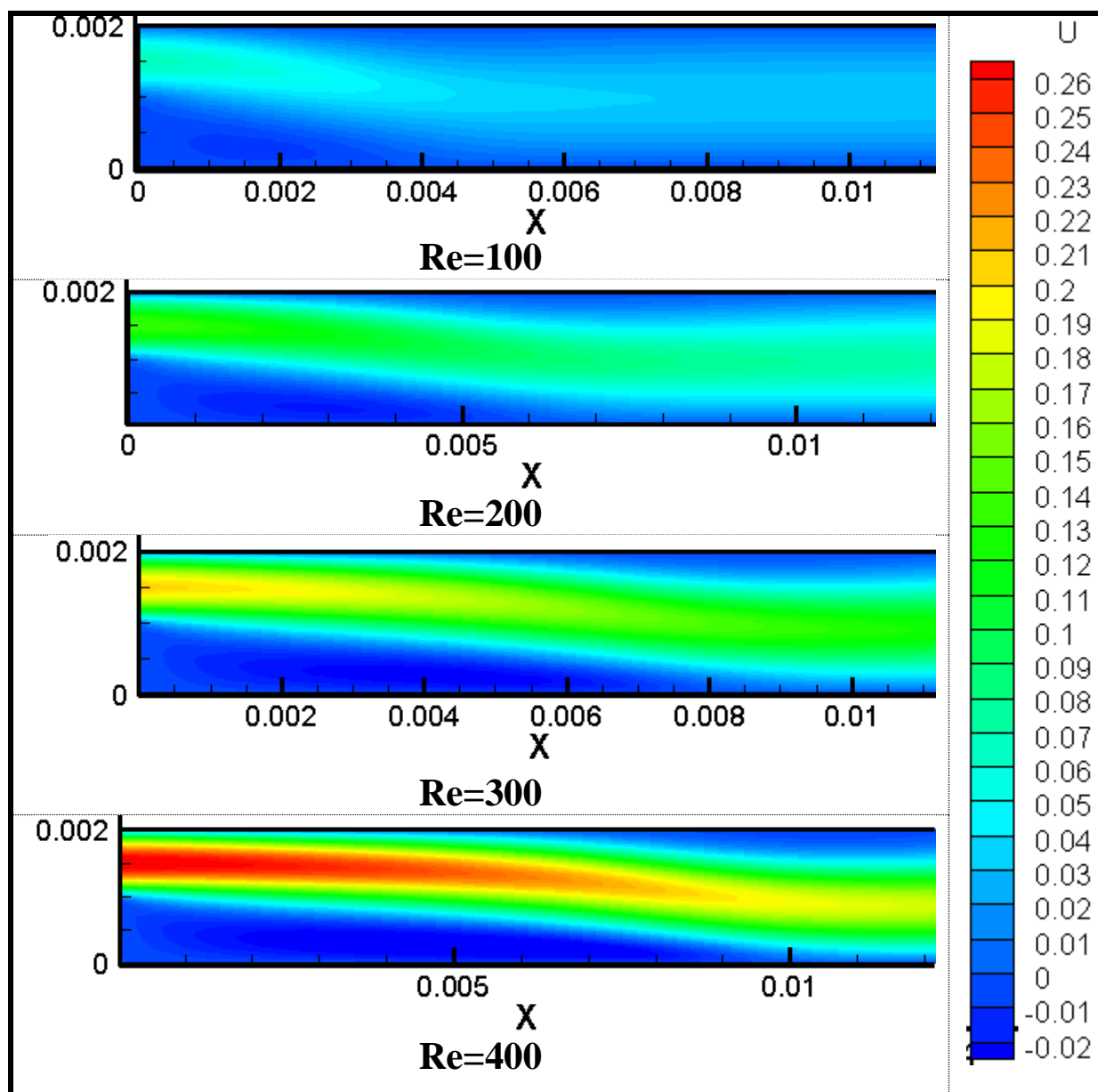
در شکل (۲۸) کانتور دمای نانوسیال آب-Cu در اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است .

افزایش عدد رینولدز به معنای افزایش سرعت و دبی سیال ورودی به کانال می باشد. با افزایش دبی سیال عبوری از کانال دمای سیال خروجی از کانال کاهش می یابد. همان طور که از شکل (۲۸) مشخص است با افزایش عدد رینولدز پهنای قسمت آبی رنگ (قسمت دما پایین) در کنار دیواره بالایی کانال افزایش و پهنای قسمت قرمز رنگ (قسمت دما بالا) در کنار دیواره پایینی کانال کاهش می یابد که نشان دهنده این موضوع می باشد که با افزایش عدد رینولدز دمای سیال خروجی از کانال کاهش می یابد.



شکل (۲۸) : کانتور دمای نانوسیال در شرایط $AR=2$ ، $L/H=30$ ، $d_p=100$ nm و در اعداد رینولدز مختلف

در شکل (۲۹) کانتور سرعت افقی نانوسیال آب-Cu در اعداد رینولدز مختلف نشان داده شده است. هر چه عدد رینولدز بزرگتر باشد سرعت جریان ورودی به کانال از طریق جت بیشتر می باشد و هر چه سرعت جریان ورودی به کانال بیشتر باشد نفوذ جریان جت به کانال افزایش می یابد که این افزایش نفوذ جریان جت به کانال با افزایش عدد رینولدز در شکل (۲۹) به وضوح نشان داده شده است.

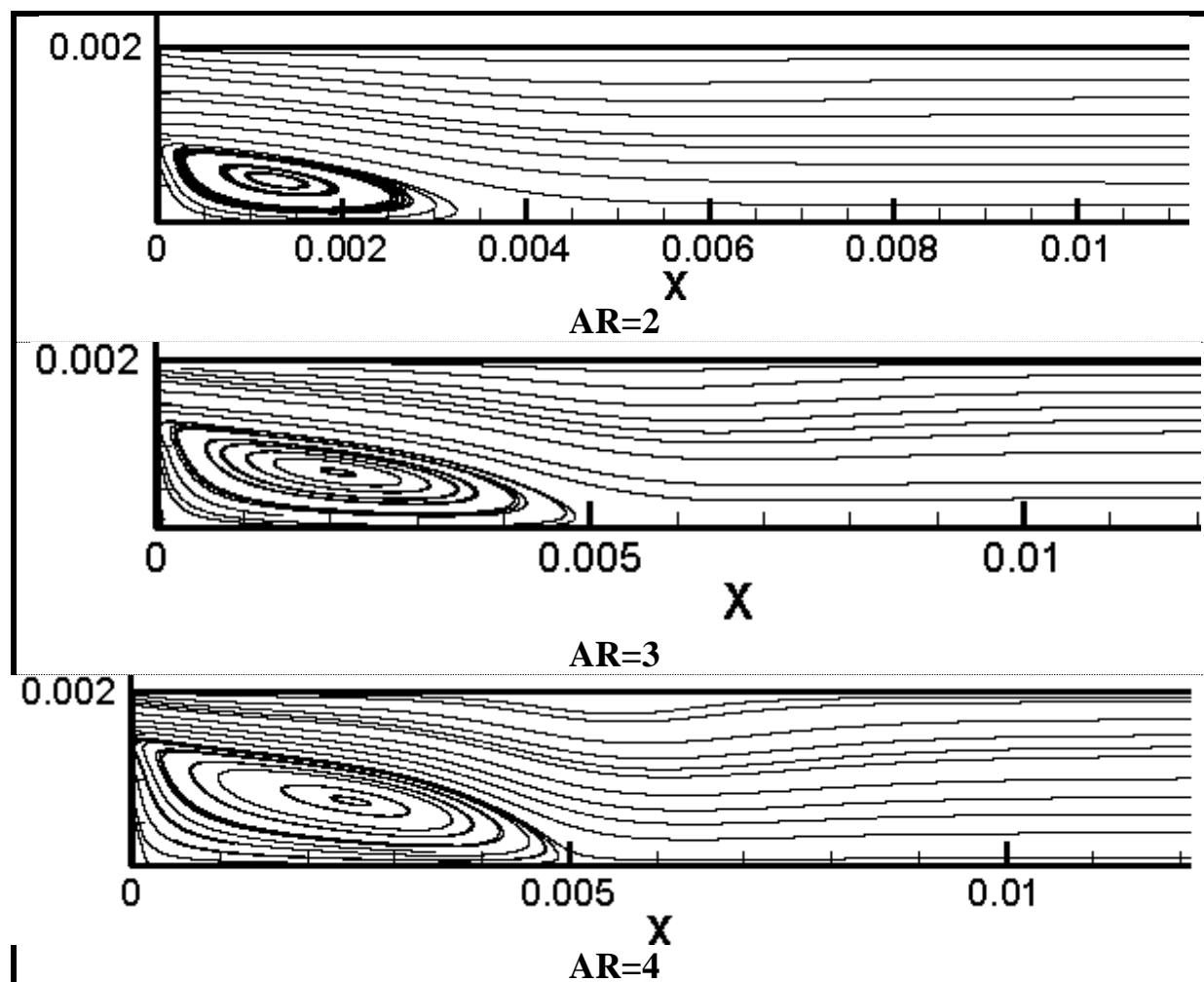


شکل (۲۹) کانتور سرعت نانوسیال در شرایط $d_p=100$ nm ، $L/H=30$ ، $AR=2$ و در اعداد رینولدز مختلف

بررسی اثر ضریب منظر روی پارامترهای ترموهیدرولیکی در جت محدود :

در این قسمت اثر نسبت منظر جت ورودی روی پارامترهای مختلف ترموهیدرولیکی جت محدود مورد بررسی قرار می گیرد. در این مرحله $\Phi=4\%$ ، $d_p=100\text{ nm}$ ، $L/H=30$ ، $Re=200$ ، $T_1=300\text{ K}$ ، $T_2=330\text{ K}$ ، هندسه جت کانال مطابق شکل (۲۱)، دمای سیال ورودی 315 K و سرعت نانوسیال ورودی 0.09 m/s می باشد.

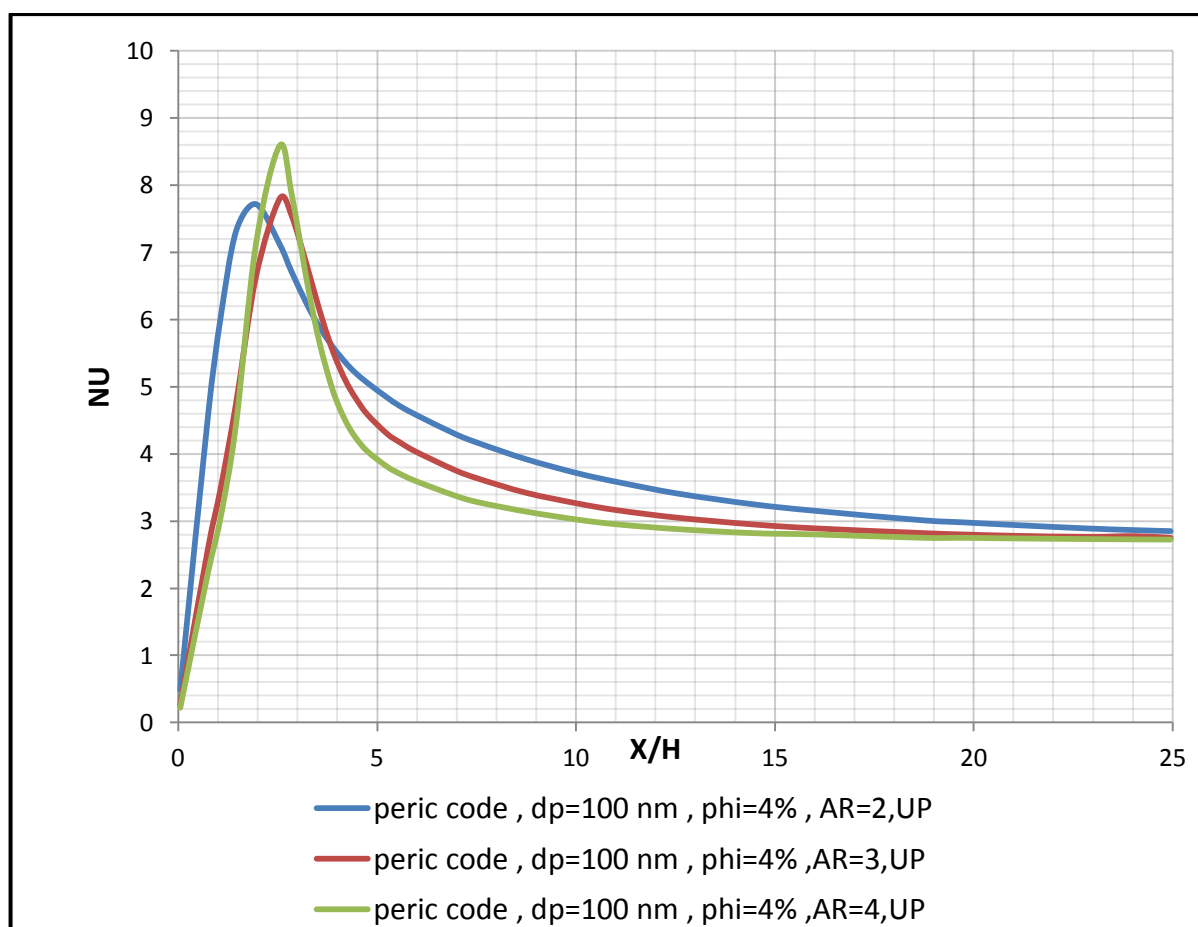
در شکل (۳۰) خطوط جریان نانوسیال در نسبت منظرهای مختلف نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد با افزایش ضریب منظر طول و عرض ناحیه جریان گردابی افزایش می یابد .



شکل (۳۰): خطوط جریان نانوسیال در شرایط $Re=200$ ، $\Phi=4\%$ ، $L/H=30$ ، $d_p=100\text{ nm}$ در نسبت منظرهای مختلف

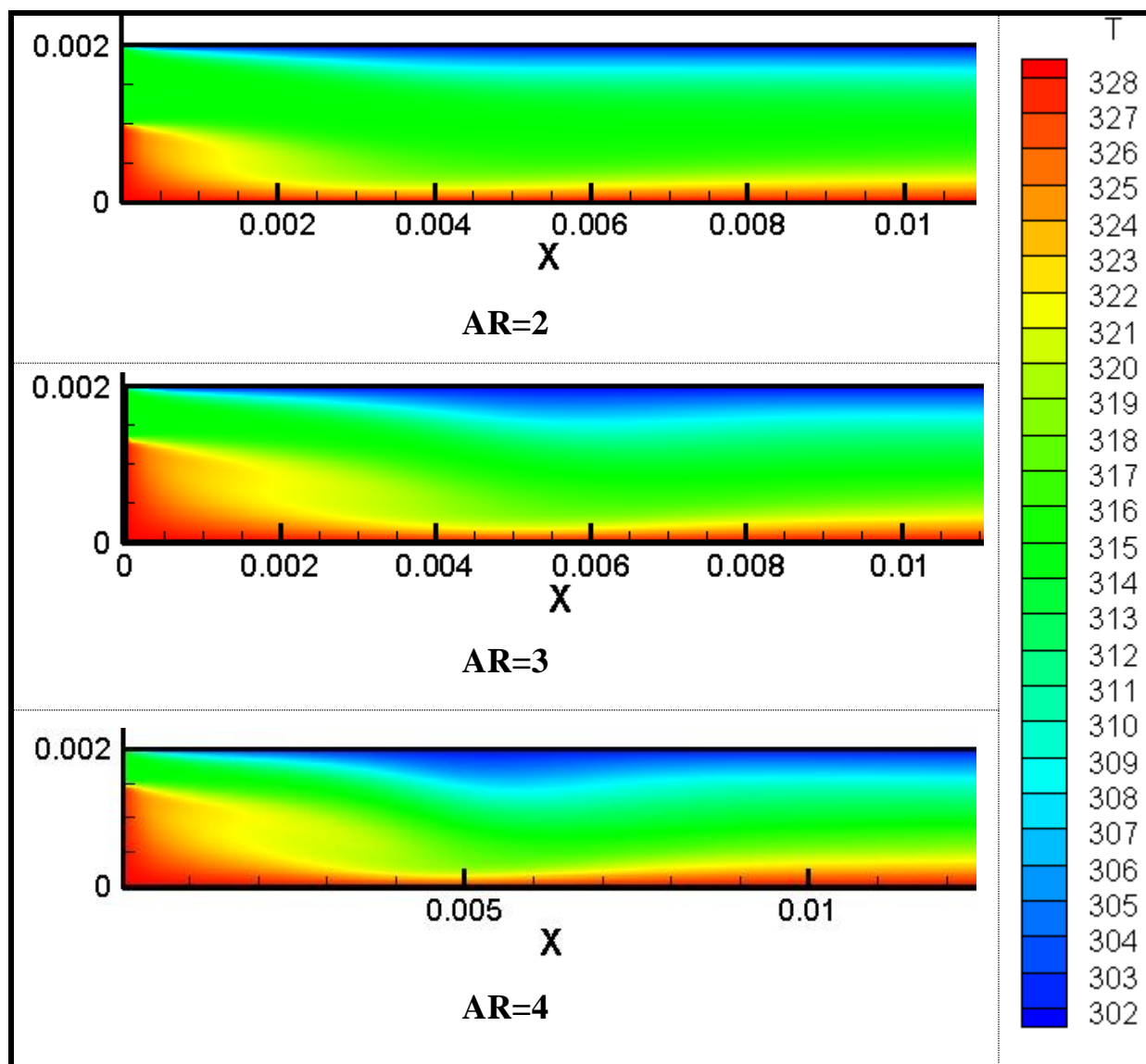
همان طور که از شکل (۳۰) مشخص است با افزایش ضریب منظر عرض ناحیه جریان گردابی در ناحیه ورودی کانال افزایش می یابد و جریان گردابی موجب افزایش توربولانس جریان شده و افزایش توربولانس

موجب بهبود شرایط انتقال حرارت و افزایش عدد ناسلت در ناحیه ورودی کانال می شود که این روند در شکل (۳۱) به وضوح مشاهده می شود.



شکل (۳۱) عدد ناسلت نانوسیال در شرایط $Re=200$ ، $\Phi=4\%$ ، $L/H=30$ ، $d_p=100\text{ nm}$ در نسبت منظرهای مختلف

در شکل (۳۳) کانتور دمای کانال در نسبت منظرهای مختلف برای جت ورودی نشان داده شده است. هر چه نسبت منظر (ظریب منظر) بزرگتر باشد نفوذ جریان جت به داخل کانال بیشتر خواهد بود که این روند در شکل (۳۳) به وضوح دیده می شود.



شکل (۳۲): کانتور دمای نانوسیال در شرایط $Re=200$ ، $\Phi=4\%$ ، $L/H=30$ ، $d_p=100$ nm در نسبت منظرهای مختلف

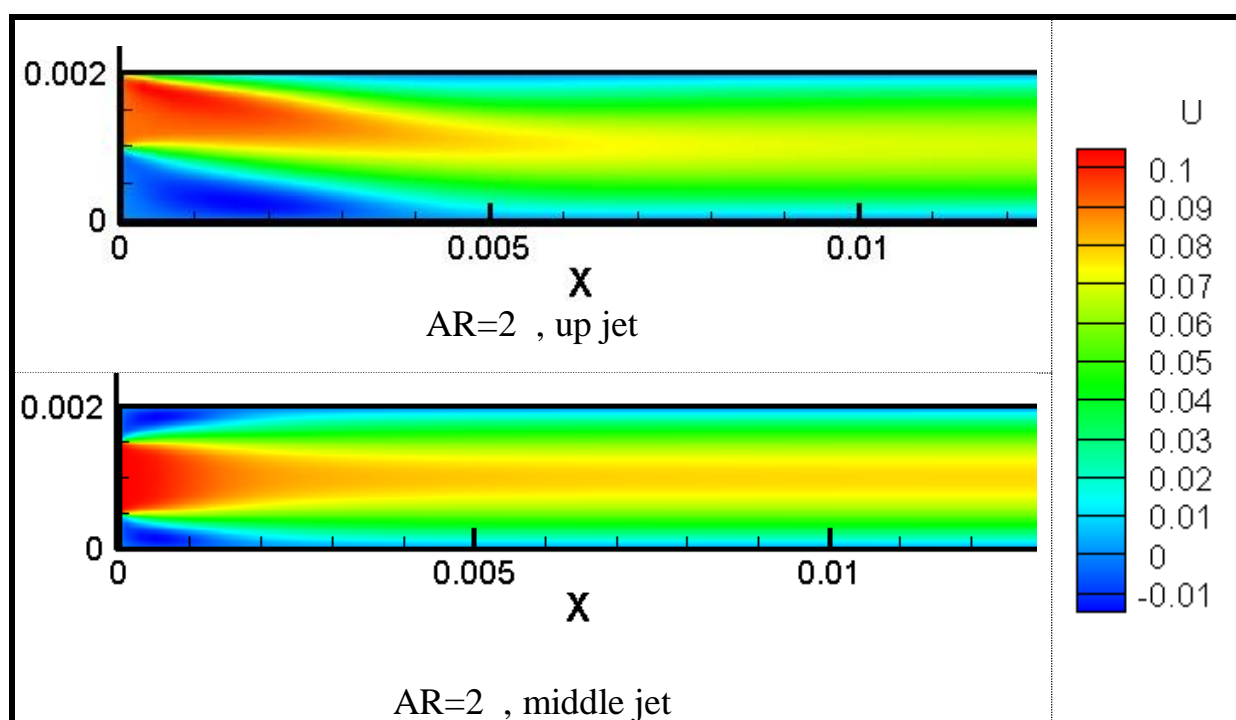
بررسی اثر محل جت ورودی روی پارامترهای ترموهیدرولیکی :

در این قسمت اثر مکان جت ورودی روی پارامترهای مختلف ترموهیدرولیکی جت محدود مورد بررسی قرار می گیرد. در این مرحله $Re=200$ ، $L/H=30$ ، $d_p=100$ nm، $\Phi=4\%$ ، هندسه جت کانال مطابق شکل های (۲۱) و (۲۲)، دما نانوسیال ورودی 315k و سرعت نانوسیال ورودی به کانال 0.09m/s می باشد.

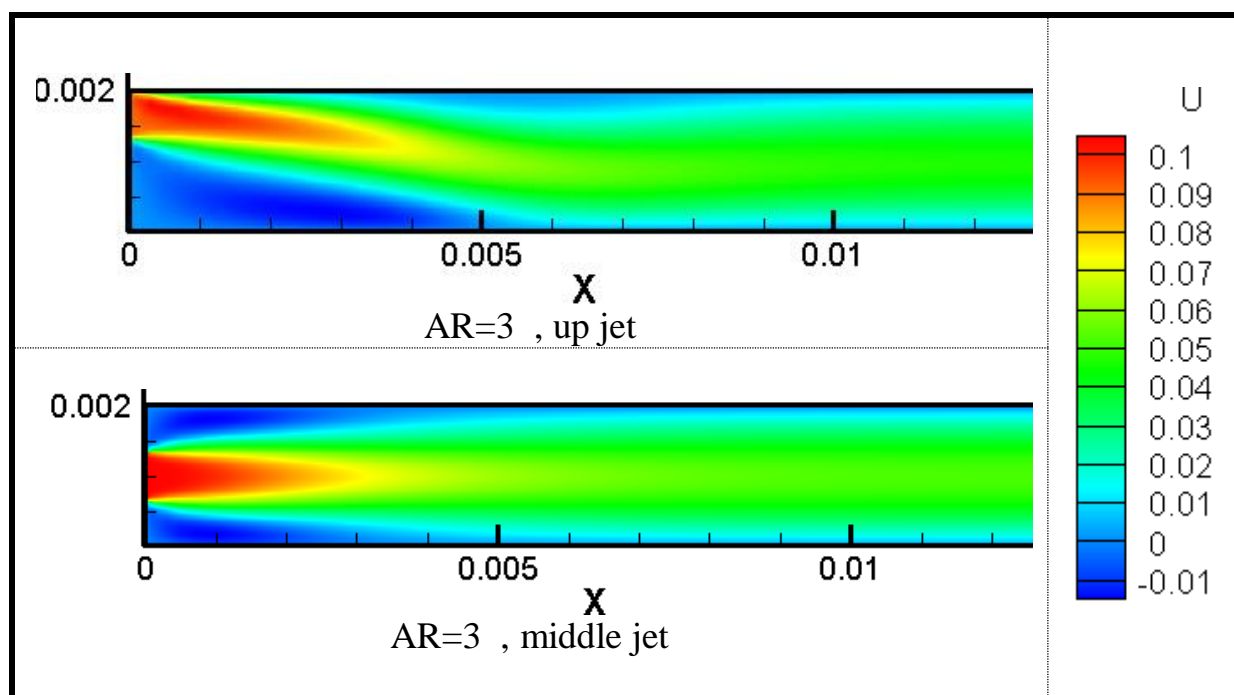
UP	مربوط به هندسه جت با ورودی از بالا می باشد (شکل ۱)
mid	مربوط به هندسه جت با ورودی از وسط می باشد (شکل ۲)

در شکل (۳۴)، (۳۵) و (۳۶) کانتور دمای نانوسیال در نسبت منظر ۲، ۳ و ۴ و با ورودی جت از بالا و وسط نشان داده شده است. در شکل (۳۷)، (۳۸) و (۳۹) نمودار عدد ناسلت دیواره پایینی کانال در نسبت منظر ۲، ۳ و ۴ و با ورودی جت از بالا و وسط نشان داده شده است.

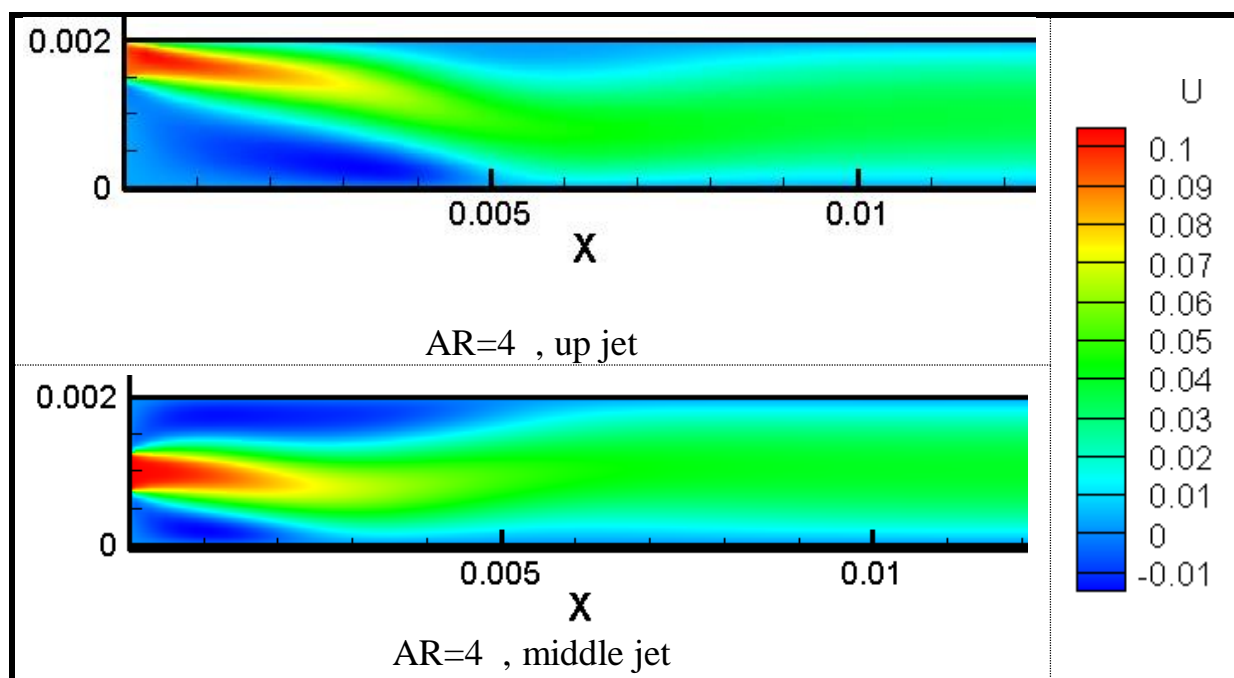
نتایج نشان می دهد هنگامی که ورودی جریان جت ورودی به کانال از سمت بالا می باشد یک ناحیه گردابی در قسمت پایینی کانال ایجاد می شود اما هنگامی که جریان جت ورودی به کانال از وسط باشد باشد ۲ ناحیه گردابی نسبتاً کوچکتر در قسمت بالایی و پایینی کانال ایجاد خواهد شد.



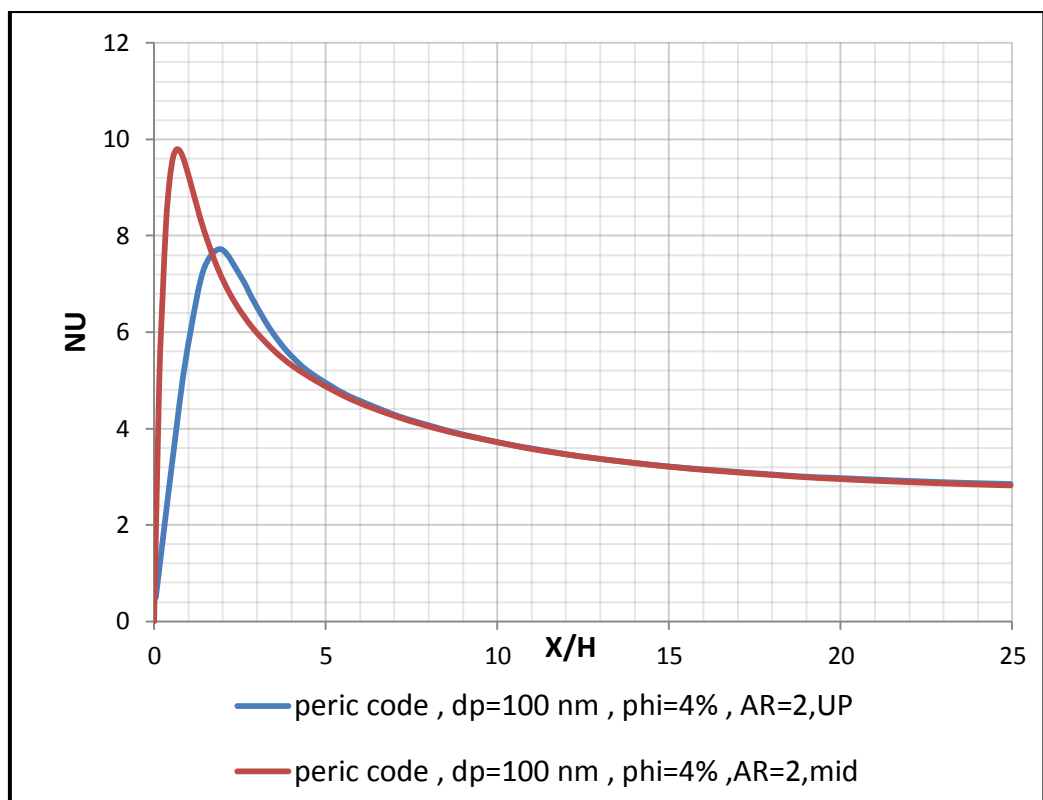
شکل (۳۴): کانتور سرعت نانوسیال در شرایط $AR=2$ ، $Re=200$ ، $\Phi=4\%$ ، $L/H=30$ ، $d_p=100$ nm و با ورودی جت از بالا و وسط



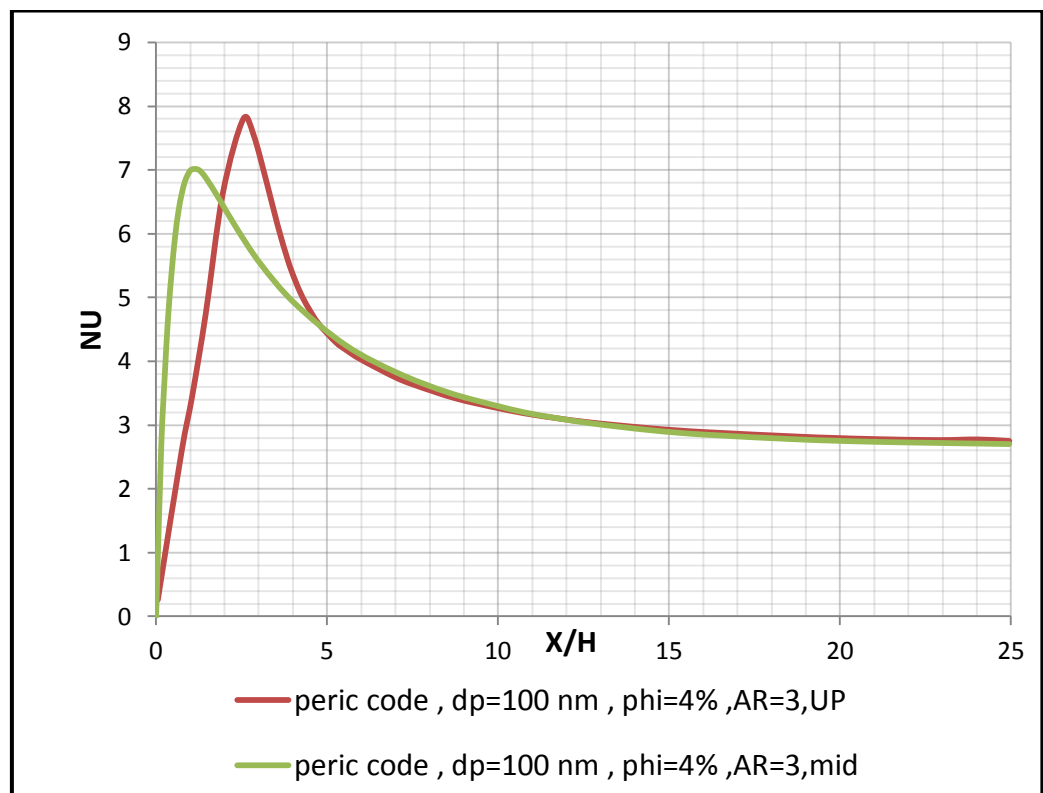
شکل (۳۵): کانتور سرعت نانوسیال در شرایط $AR=3$ ، $Re=200$ ، $\Phi=4\%$ ، $L/H=30$ ، $d_p=100$ nm و با ورودی جت از بالا و وسط



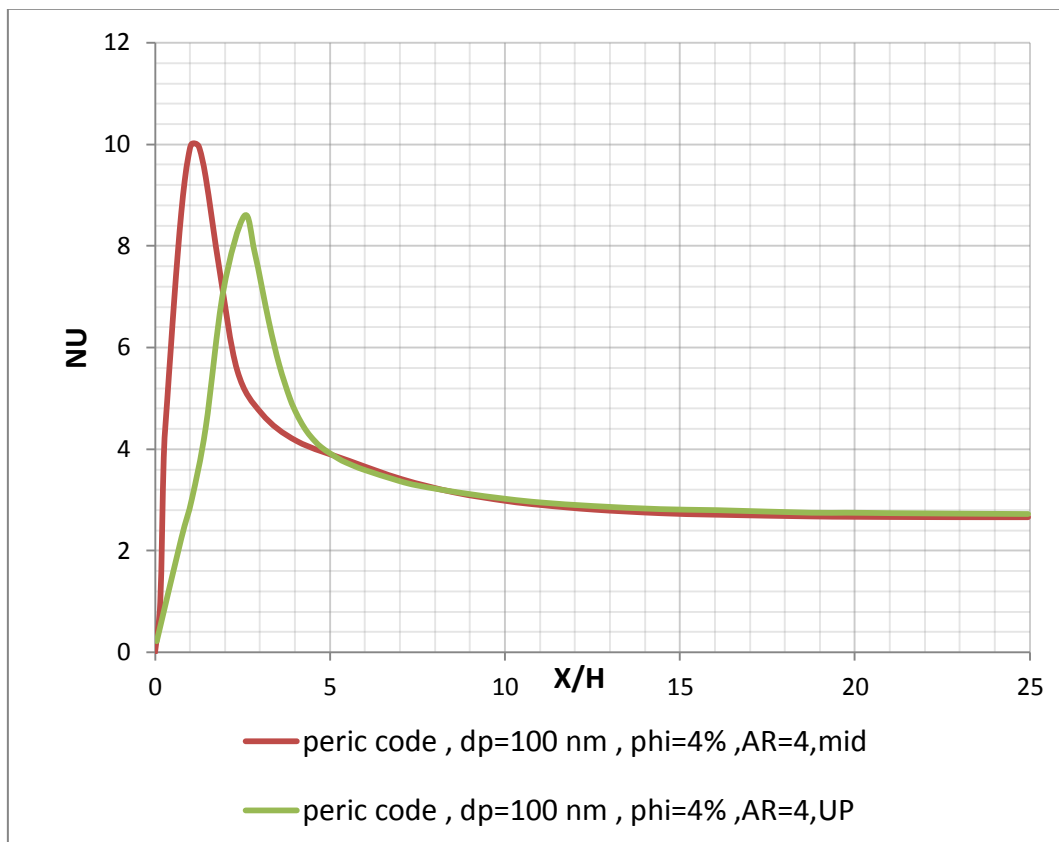
شکل (۳۶): کانتور سرعت نانوسیال در شرایط $AR=4$ ، $Re=200$ ، $\Phi=4\%$ ، $L/H=30$ ، $d_p=100$ nm و با ورودی جت از بالا و وسط



شکل (۳۷): عدد ناسلت نانوسیال در شرایط $AR=2$ ، $Re=200$ ، $\Phi=4\%$ ، $L/H=30$ ، $d_p=100\text{ nm}$ و با وروی جت از بالا و وسط



شکل (۳۸): عدد ناسلت نانوسیال در شرایط $AR=3$ ، $Re=200$ ، $\Phi=4\%$ ، $L/H=30$ ، $d_p=100\text{ nm}$ و با وروی جت از بالا و وسط



شکل (۹۸) : عدد ناسلت نانوسیال در شرایط $d_p=100\text{ nm}$ ، $L/H=30$ ، $Re=200$ ، $\Phi=4\%$ ، $AR=4$ و با ورودی جت از بالا و وسط


پوست ۱: نحوه ران کردن از برنامه

نحوه ران گرفتن از این برنامه به ترتیب زیر می باشد:

۱- ابتدا باید اطمینان نمود در کدنویسی برنامه خطایی وجود ندارد بدین منظور در قسمت منو بار دکمه

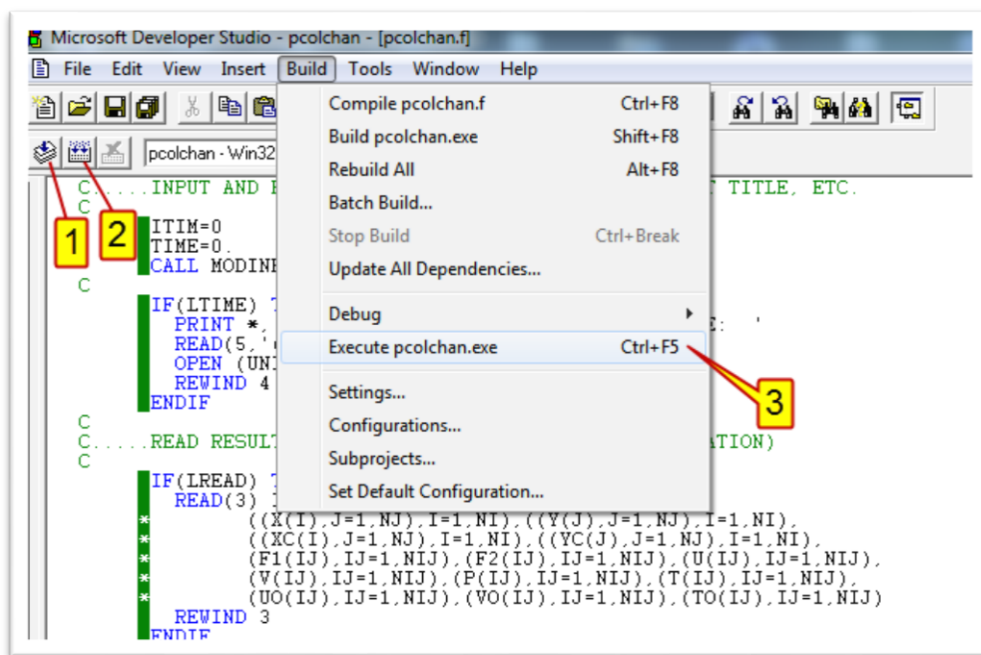
 compile یا در صفحه کلید دکمه های **ctrl+f8** نگه می داریم، در این زمان در قسمت

پایین برنامه تعداد خطاها و نوع خطا و مکان آنها نمایش داده می شود و با دبل کلیک روی هر یک از خطاها محل خطا با علامت فلش نشان داده می شود.

۲- کلیک کردن دکمه  Build یا نگه داشتن دکمه های **shift+f8** در صفحه کلید

۳- سپس در منو بار مسیر **Build >> Execute pcolchan.exe** دنبال می شود یا در صفحه کلید دکمه های **ctrl+f5** نگه داشته شود تا از برنامه ران گرفته شود.

شکل زیر مراحل گفته شده را در محیط برنامه نشان می دهد.



همچنین برای بستن برنامه مسیر **File >> Close Workspace** دنبال می شود. بستن برنامه از طرق دیگر باعث می شود برنامه در هنگام ران مجدد دچار مشکل شود.

مراجع و منابع:

- [1]. Abu-Nada, Eiyad, 2008. Application of nanofluids for heat transfer enhancement of separated flows encountered in a backward facing step. International Journal of Heat and Fluid Flow. Vol.22, 242-249
- [2]. A.K. Santra, S. Sen, N. Charaborty, Study of heat transfer due to laminar flow of copper–water nanofluid through two isothermally heated parallel plates, International Journal of Thermal Science 48 (2009) 391–400.
- [3]. Brinkman, H.C., 1952. The viscosity of concentrated suspensions and solutions. J. Chem. Phys. 20, 571–581.