



بررسی عددی انتقال حرارت جابجائی در کانال حاوی مادہ متحکم درمقیاس حفرہ ماستفادہ از روش سمه بولترمن

رسول محبى

اسآدرابها:

د کتر محد سن کهانی

اسآد شاور:

ک دکتر محن نظری

رساله جت اخذ درجه دكترى

تابسان ۹۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: مکانیک

گروه: تبدیل انرژی

رسالهٔ دکتری آقای رسول محبی

تحت عنوان :

بررسی عددی انتقال حرارت جابجائی در کانال حاوی ماده متخلخل در مقیاس

حفره با استفاده از روش شبکه بولتزمن

در تاریخ ۹۲/۴/۱۵ در کمیتهٔ تخصصی زیر جهت اخذ مدرک دکتری ارزیابی گردید و با درجهٔ

مورد پذیرش قرار گرفت.

امضا	استاد مشاور	امضا	استاد راهنما
	دکتر محسن نظری		دکتر محمد حسن کیهانی

امضا	نمایندهٔ تحصیلات تکمیلی	امضا	اساتید داور
	دکتر علی عباس نژاد		دکتر سیف ا سعدالدین دکتر فرهاد طالبی دکتر محمد محسن شاه مردان دکتر محمود نوروزی

تقديم به:

به پاس قدر دانی از قلبی آکنده از عثق و معرفت، که محیطی سر ثار از سلامت و امنیت و آرامش و آسایش برای من

فراہم آوردہ است؛

ہمدی کہ باواژہ ی نجیب و مغرور تلاش، آشابی دارد و تلاش راستین رامی شاسد و عطر رومایی آن را استشام می کند و مرا

در راه رسیدن به امداف عالی باری می رساند؛

کسی که حس تعهد ومئولیت را در زندگی ام تلالویی خدایی داده است؛

این رساله تقدیم **بمسر هربانم** می کردد که سایه صربانیش سایه سار زندگیم می باشد.

تشکر و قدردانی:

با سپاس ازسه وجود مقدس:

آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم ...

موهایشان سپید شد تا ماروسفید شویم ...

و عاشقانه سوختند تا گرمابخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند...

پدرم

مادرم

استادانم

پس از حمد و ستایش خداوند یکتا وظیفه خود می دانم که تشکر و قدرانی خود را از جناب آقای دکتر محمد حسن کیهانی که در انجام رساله مرا یاری نمود و با راهنمایی های ایشان انجام رساله مقدور گردید و زحمات بی شائبه دکتر محسن نظری که راهنمایی ها و حمایت های ارزنده شان همواره راهگشا و روشنی بخش پیشبرد اهداف این رساله بود، ابراز نمایم.

٥

تأئيدية صحت و اصالت نتايج:

اینجانب رسول محبی به شمارهٔ دانشجویی ۸۸۱۸۳۹۵ دانشجوی رشتهٔ مهندسی مکانیک در مقطع دکتری تأیید می نمایم که کلیهٔ نتایج این رساله حاصل کار اینجانب است و موارد نسخه برداری شده از آثار دیگران با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر شده است.

کلیهٔ حقوق مادی مرتبط از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این رساله متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد.

تابستان ۱۳۹۲

روش شبکهٔ بولتزمن از جمله روش های سودمند در حل مسائل دینامیک سیالات در محیط های متخلخل پیچیده می باشد. در این رساله از روش شبکهٔ بولتزمن در بررسی جریان و انتقال حرارت سیال نیوتنی و غیر نیوتنی بین دو صفحه موازی که به صورت جزئی با محیط متخلخل یر شده، استفاده شده است. محيط متخلخل با موانع مربعي، با أرايش منظم و نامنظم ايجاد گرديده است كه امکان بررسی جریانهای پیچیده در مقیاس حفره را فراهم میکند. جهت بررسی صحت و دقت روش عددی مورد استفاده، در هر مرحله، بررسی های موردی مختلفی انجام شده است. سه سیال توانی مختلف نازک شونده، نیوتنی و ضخیم شونده، با آرایش های متفاوت از بلوک های مربعی بین دو صفحه بررسی شده است. تاثیر اعداد رینولدز مختلف، درصدهای انسداد و نسبت تخلخل های متفاوت بر روی پروفیلهای سرعت و دما و همچنین عدد ناسلت در دیوارهٔ کانال بررسی گردیده است. نتایج به خوبی حرکت جریان سیال و توزیع دمای داخل محیط متخلخل را نشان میدهد. همچنین گردابههای ایجاد شده در پشت موانع مربعی نمایش داده شده و تاثیر آن بر انتقال حرارت مطالعه شده است. وجود موانع ثابت در دامنه محاسباتی به عنوان محیط متخلخل باعث افزایش عدد ناسلت و بهبود انتقال حرارت می گردد. همچنین مشاهده شده که در سیالات شـبه پلاسـتیک میـزان عـدد ناسـلت بیشتر بوده و با کاهش نسبت تخلخل، مقدار عدد ناسلت متوسط افزایش می یابد. در نسبت تخلخل و درصد انسداد ثابت، میزان افزایش عدد ناسلت میانگین در آرایش نامنظم بیشتر می باشـد. بـا بررسـی حالت های مختلف از آرایش موانع مربعی، مقدار عدد ناسلت با محدودهٔ اطمینان ۲ گزارش شده و دو رابطه در ارایش منظم و نامنظم موانع مربعی بین عدد ناسلت، عـدد رینولـدز، ضـریب تـوانی، درصـد انسداد و نسبت تخلخل ارائه گردیده است.

¹ Confidence interval

کلمات کلیدی: سیال نیوتنی و غیر نیوتنی، روش شبکهٔ بولتزمن، محیط متخلخ ل، موانع مربعی،

آرایش منظم و نامنظم.

ليست مقالات مستخرج از رساله:

1-(ISI) Heat Transfer Enhancement in a Channel Partially Filled with a Porous Block:Lattice Boltzmann Method, International Journal of Modern Physics C, 2013

۲-(ISC) بررسی عددی جریان سیال و انتقال حرارت در محیط متخلخل بین دو صفحه موازی با استفاده از روش شبکه بولتزمن، **مجله علمی و پژوهشی مکانیک هوافضا (انتقال حرارت و** پیشرانش)- جلد ۹، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۲.

*- (ISI) A Comparative Study of Forced Convection of Power Law Fluid in a Channel with a Built-in Square Cylinder: Lattice Boltzmann/Finite Element Methods, Journal of Applied Mechanics and Technical Physics (under review).

δ-(**ISI**) Lattice Boltzmann Simulation of Power-Law Fluid Flow and Heat Transfer in a Channel Partially Filled with a Porous Block: Analysis of Geometrical Parameters of Porous Media, **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics (revised)**.

۶- بررسی جریان سیال عبوری از دو صفحه موازی دارای محیط متخلخل موضعی با روش شبکهٔ بولتزمن، چهاردهمین کنفرانس دینامیک شارهها FD2012 ، بیرجند، دانشگاه بیرجند، ۱۲-۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۱. ۷- بررسی انتقال حرارت و جریان سیال عبوری از محیط متخلخل داخل کانال با آرایش های مختلف با استفاده روش شبکهٔ بولتزمن، کنفرانس بین المللی مهندسی مکانیک و فناوری های پیشرفته، مهرماه ۱۳۹۱ - اصفهان، هتل بین المللی عباسی.

A- A Computation of Flow and Heat Transfer in Channel Partially Filled with Square Obstacles Using Lattice Boltzmann Method, International Conference on Mechanical, Automobile and Robotics Engineering (ICMAR'2012), 2012 ,Penang ,Malaysia, Feb. 11-12.

عنوان

صفحه

۱		فصل اول
۱		مقدمه
۲	ﻪﻩ	۱–۱– مقد
۱۵	ه جدید و نوآوری این رساله	۲-۱- جنب
Error!	رد کاربردی این رسالهBookmark not defined	1-۳- موا
۱۶	ل انجام این رساله	۱-۴- روش

١٧	فصل دوم
۱۸	روش شبكة بولتزمن
۱۹	۲-۱-۲ روش شبکهٔ بولتزمن
۱۹	۲-۱-۱- معادلة روش شبكة بولتزمن
۲۱	۲-۱-۲ روند تکاملی روش شبکهٔ بولتزمن
۲۲	۲-۲- مدل BGK
۲۵	۲-۳- معادلهٔ شبکهٔ بولتزمن انتقال حرارت
۲۵	۲-۴ الگوريتم کلي روش شبکهٔ بولتزمن
۳۳	۲-۵- شرایط مرزی
۳۳	۲-۵-۱ شرط مرزی عدم لغزش
٣٧	۲-۵-۲- شرایط مرزی فشار و یا سرعت معلوم
۴۰	۲-۵-۳-شرط مرزی خروجی
۴۱	۲-۵- ۴-شرط مرزی دما ثابت
۴۱	۲-۵-۵-شرط مرزی دمای خروجی
۴۱	۲-۵-۶-شرط مرزی آدیاباتیک
4 4	فمرا بير
۲۱	عصل شوم
r)	بررسى نايج ھيدروديناميک
	۲-۱-۲ - مقدمه
	۲-۲- جریان بین دو صفحهٔ موازی بینهایت
	۳-۲- ۱ - هندسه و شرایط مرزی
۴۵	۳-۲- ۲ نتایج بدست امده
۵۳	۳-۳- بررسی موردی جریان اطراف تک مانع مربعی
۵۴	الف- اعتبار سنجي با نتايج تركي و همكاران

۵۴	ف- اعتبار سنجی با نتایج ترکی و همکاران
۵۴	۳-۳- ۱ - شرایط مرزی
۵۴	۳-۳- ۲- نتایج بدست آمده
۵۵	ب- اعتبار سنجی با نتایج دیمان

۵۵	۳-۳-۳- شرایط مرزی
۵۵	۳-۳- ۴- نتایج بدست آمده
۵۶	ج- اعتبار سنجي با نتايج پاليوال و همكاران
۵۶	۳-۳-۵- شرایط مرزی
۵۶	۳–۳– ۶– نتایج بدست آمده
ΔΥ	۳-۴- جریان اطراف تک مانع مربعی
ΔΥ	۳-۴-۱ - شرایط مرزی
۵۸	۳-۴-۲ نتایج بدست آمده
۶۵	۳-۵- جریان در محیط متخلخل
۶۵	۳-۵-۱- جریان در محیط متخلخل موضعی منظم
<i>99</i>	۳–۵– ۱–۱ - شرایط مرزی
۶۷	۳–۵– ۱–۲- نتایج بدست آمده
Υλ	۳-۵-۲- جریان در کانال حاوی بلوک متخلخل
٧٩	۳-۵- ۲ -۱-۱ شرایط مرزی
٨١	۳–۵– ۲–۲– نتایج بدست آمده

۵۱۶۵	فصل چهارم
١۶۵	بررسي نتايج انتقال حرارت
199	1-۴- مقدمه
188	۴-۲- انتقال حرارت بین دو صفحهٔ موازی بینهایت
188	۴-۲-۴ شرایط مرزی
١۶٧	۲-۴-۲ نتایج بدست آمده
١٧١	۴-۳- بررسی موردی انتقال حرارت اطراف تک مانع مربعی
١٧٢	الف- اعتبار سنجي با نتايج تركي و همكاران
١٧٢	۴-۳-۴ شرایط مرزی
١٧٢	۴–۳– ۲– نتایج بدست آمده
١٧٣	ب- اعتبار سنجی با نتایج دیمان
١٧٣	۴-۳-۳ شرایط مرزی
١٧۴	۴–۳– ۴– نتایج بدست آمده
١٧۴	ج- اعتبار سنجي با نتايج پاليوال و همكاران
١٢۵	۴–۳– ۵– شرایط مرزی
١٢۵	۴–۳– ۶– نتایج بدست آمده
١٧۶	۴-۴- بررسی انتقال حرارت اطراف تک مانع مربعی
١٧۶	۴-۴- ۱ - شرایط مرزی
١٧۶	۴–۴– ۲– نتایج بدست آمده
١٨۵	۴–۵- انتقال حرارت در محیط متخلخل
١٨۵	۴-۵-۱- انتقال حرارت در محیط متخلخل موضعی منظم
١٨۶	۴-۵-۱-۱-۱ شرایط مرزی

۱۸۶	۴–۵– ۱–۲– نتایج بدست آمده
194	۴-۵-۲- انتقال حرارت در کانال حاوی بلوک متخلخل.
194	۴-۵- ۲-۱-۱ شرایط مرزی
۱۹۷	۴–۵– ۲–۲– نتایج بدست آمده
741	فصل پنجم
741	فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات
<pre></pre>	فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات ۵-۱-۱ نتیجه گیری
7 f 1 7 f 1 7 f 7 7 f 7	فصل پنجم نتیجه گیری و پیشنهادات ۵-۱- نتیجه گیری

منابع

А	طول وجه مربع	m
c	سرعت شبکه	m/s
Cp	ظرفیت گرمایی مخصوص در فشار ثابت	J/kg K
d	اندازهٔ بعد سیلندر مربعی	m
\mathbf{D}_{h}	قطر هيدروليكي	m
e	سرعت جاری شدن تک ذرہ	
f	تابع توزيع چگالی	
f^{eq}	تابع توزيع تعادلى چگالى	
g	تابع توزيع انرژی	
g ^{eq}	تابع توزیع تعادلی انرژی	
Н	عرض كانال	m
k	ضریب هدایت گرمایی	W/(m K)
L	طول کانال	m
Lr	طول بی بعد گردابه, $\overline{\mathrm{L}}_\mathrm{r}/\mathrm{A}$	
m	شاخص سازگازی	Pa.s ⁿ
n	ضريب قانون توانى	
Nu	عدد ناسلت توانی	
<nu></nu>	عدد ناسلت میانگین	
$<\overline{Nu}_t>$	عدد ناسلت متوسط زمانی (ترکی و همکاران)	
N_x	تعداد گره ها در جهتX	
Pr	ν/α , عدد پرانتل	
Р	فشار	Pa
P *	فشار بی بعد	
Re _{Dh}	عدد رينولدز, u ₀ 2H/ v	
$S_{\alpha'\beta}$	تانسور نرخ کرنش	s ⁻¹

S	فاصلهٔ بین موانع در حالت ۱ قرار گیری موانع مربعی	m
t	زمان	S
Т	دما	К
T ₀	دمای ورودی	К
T _b	دمای بالک	К
u ₀	سرعت اوليه	m s ⁻¹
u, v	مولفه های سرعت	m s ⁻¹
u	بردار سرعت	m s ⁻¹
ū	سرعت متوسط	m s ⁻¹
х, у	مولفه های مختصات کارتزین	m
Xu	x/A فاصلهٔ بی بعد از ورودی تا مانع مربعی	
W	تابع وزنى	
Wr	عرض بی بعد گردابه, $\overline{\mathrm{w}}_{\mathrm{r}}$ /A	

نشانه های یونانی

α	ضریب پخش گرمایی	m ⁻² s ⁻¹
α΄	مختصات كارتزين	m
β	A/H, درصد انسداد	
β´	مختصات كارتزين	m
γ̈́	نرخ برش محلی	s ⁻¹
δχ	فاصلهٔ شبکه	m
δy	فاصلة شبكه	m
δt	گام زمانی	S
3	تخلخل	
ε΄	خطای نسبی	
ν	ويسكوزيتة سينماتيك	m ² /s

v_0	شاخص پایداری توانی	m ² s ⁿ⁻²
ρ	چگالی سیال	kg m ⁻³
$ au_{ m g}$	زمان آرامش منفرد بی بعد گرمایی	
$ au_{ u}$	زمان آرامش منفرد بی بعد هیدرودینامیک	
$ au_{w}$	تنش برشی دیوار	

زير نويس

с	سرد
f	سيال
f	ضریب اصطکاک دارسی
Н	گرم
i	جهت حرکت تک ذره
in	ورودى
Ν	نيوتنى
NN	غير نيوتنى
out	خروجى
S	جامد
W	ديوار
-	کمیت بعد دار

فهرست جداول

صفحه

عنوان

۴	شکل(۱–۱) هندسه کره های به هم فشردهٔ مورد استفادهٔ پن و همکاران [12]
۵	شکل(۱-۲) هندسه های مورد استفادهٔ پن و همکاران [13]
۵	شكل(۱-۳) محيط متخلخل سه بعدي اينامورا [14]
۷	شکل(۱-۴) آرایش محیط متخلخل مورد استفادهٔ جئونگ و همکاران [19]
۷	شکل(۱-۵) نمونه ای از محیطهای مورد بررسی لهمان و همکاران [20]
۸	شكل(۱-۶) شماتيک هندسهٔ مورد بررسی شکوهمند و همکاران [21]
۹	شکل(۱-۷) شماتیک محیط متخلخل تصادفی چای و همکاران [23]
۹	شکل(۱-۸) نمونه ای از حفره مربعی پر شده با بلوک های فلزی مربعی متخلخل زو و همکاران [24]
۱۰	شکل(۱-۹) شماتیک محیط متخلخل و شرایط مرزی مورد بررسی سای و همکار [25]
۱۱	شكل(۱۰-۱۰) شماتيک هندسهٔ مورد بررسی تی ماه و همکاران [27]
۱۱	شكل(۱–۱۱) شماتيک هندسهٔ مورد بررسی سوليوان و همکاران [30]
14	شكل (۱–۱۲) طرح كلى مسألة مورد بررسي
۱۸	شكل (۲-۱) لودويگ بولتزمن
۱۹	شکل (۲-۲) نمایش ابر میکروسکوپی تابع توزیع ذره
۲۰	شكل (٣-٢) شكل شبكة D3Q15 و شبكة D3Q19
۲١	شکل (۲–۴) شبکهٔ D2Q9
۲۶.	شكل(۲–۵) شبكة D2Q9
۲۶.	شکل(۲-۶) مولفه های سرعت در شبکهٔ D2Q9
۳١	شكل(۲-۷) فلوچارت حل روش شبكهٔ بولتزمن در حالت نيوتنی
٣٢	شکل(۲-۸) فلوچارت حل روش شبکهٔ بولتزمن در حالت غیرنیوتنی
٣۴	شکل(۲-۹) شرط مرزی بازگشت به عقب کامل
٣۴	شکل(۲-۱۰) توابع توزیع مجهول در مرز شمالی هندسه با دایره مشخص شده اند
۳۶.	شکل(۲–۱۱) مراحل طرح بازگشت به عقب میانی
٣٧	شکل(۲-۱۲) لایه های مربوط به طرح برونیاب
۳۸	شکل(۲–۱۳) گره های همسایهٔ یک گره مرزی
43	شکل(۳-۱) شماتیک جریان بین دو صفحهٔ موازی
44	شكل(۳-۲) طرح كلى شبكة توليد شده
	شکل(۳-۳) مقایسه بین نمودار سرعت بیبعد روش شبکهٔ بولتزمن با نتایج تحلیلی در ناحیه توسعه یافته دامنهٔ
۴۵	محاسباتي.
	شکل(۳-۴) مقایسه بین نمودار سرعت بیبعد روش شبکهٔ بولتزمن با نتایج تحلیلی و نرم افزار کمسول در ناحیه
49.	توسعه يافته دامنهٔ محاسباتی.
41	شکل(۳-۵) مقایسه بین نمودار سرعت بیبعد تانگ با نتایج بدست آمده از روش شبکهٔ بولتزمن
41	شکل(۳-۶) بردارهای سرعت داخل کانال در Re=100 و ضرایب توانی مختلف

۴۸	شکل(۳-۷) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در Re=100 و ضرایب توانی مختلف
49	شکل(۳-۸) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت y در Re=100 و ضرایب توانی مختلف
	شکل(۳-۹) نمودارهای سرعت بی بعد عرضی در جهت x داخل کانال در مقاطع مختلف به ازای Re=100 و
۵۰	ضرایب توانی مختلف.
	شکل(۳-۱۰) نمودارهای سرعت بی بعد عرضی در جهت y داخل کانال در مقاطع مختلف به ازای Re=100 و
۵۰	ضرایب توانی مختلف.
۵۱	شکل(۳-۱۱) نمودارهای سرعت بی بعد طولی در موقعیت y/H=0.5 به ازای Re=100 و ضرایب توانی مختلف
۵۳	شکل(۳-۱۲) نمودار ضریب اصطکاک دارسی در سیال نیوتنی و به ازای Re=100
۵۴	شکل(۳-۱۳) شماتیک مانع مربعی داخل کانال
۵۵	شکل(۳-۱۴) میدان جریان در کانال حاوی یک مانع مربعی در سیال نیوتنی در Re=40
۵۶	شکل(۳-۱۵) میدان جریان در کانال حاوی یک مانع مربعی در سیال غیر نیوتنی در Re=15
۶۰	شکل(۳-۱۶) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در Re=100، $eta=1/4$ و ضرایب توانی مختلف
۶۱	شکل(۳–۱۷) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در $eta = 1/4$ ، $Re=200$ و ضرایب توانی مختلف
۶۱	شکل(۳–۱۸) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در $eta = 8 = 1/4$ $eta = 8 = 1/4$ و ضرایب توانی مختلف
۵۸	شکل(۳–۱۹) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در $eta = 1/8$ ، $Re=100$ و ضرایب توانی مختلف
۵۹	شکل(۳-۲۰) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در $ ho$ $ ho$ $ ho$ $ ho$ $ ho$ و ضرایب توانی مختلف
۶۰	شکل(۲۵-۲۱) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در $eta = 8$ ، $Re=300$ و ضرایب توانی مختلف
۶۲	شکل(۳-۲۲) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در $ ho$ = $1/2$ ، $ ho$ = $1/2$ و ضرایب توانی مختلف
۶۲	شکل(۳-۲۳) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در $ ho$ = $1/2$ ، $ ho$ = $1/2$ و ضرایب توانی مختلف
۶۳	شکل(۳-۲۴) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در $ ho$ Re=300، $ ho=1/2$ و ضرایب توانی مختلف
۶۴	شکل(۳-۲۵) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در رینولدز بحرانی، $\beta=1/2$ و ضرایب توانی مختلف
	شکل(۳-۲۶) نمودارهای سرعت بی بعد عرضی در جهت x داخل کانال در مقاطع مختلف به ازای Re=100 و
۶۴	ضرایب توانی مختلف
9 9	شکل(۳-۲۷) طرح کلی محیط متخلخل مورد استفاده
	شکل(۳–۲۸) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در Re=100، آرایش 4*4 و ضرایب
۶۷	نوانی مختلف
	شکل(۳–۲۹) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در Re=300، آرایش 4*4 و ضرایب
۶۸	نوانی مختلف
	شکل(۳-۳۰) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در Re=100، آرایش 7*7 و ضرایب
۶٩	نوانی مختلف
	شکل(۳–۳۱) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در Re=300، آرایش 7*7 و ضرایب
٧٠	نوانی مختلف
	شکل(۳-۳۲) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در Re=100، آرایش 10*10 در ضرایب
۷۱	نوانی مختلف
	شکل(۳-۳۳) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در Re=300، آرایش 10*10 در ضرایب
۷۲	نوانی مختلف
۷۳	شکل(۳-۳۴) میدان جریان در آرایش 4*4 در Re=100 و ضرایب توانی مختلف
۷۴	شکل(۳-۳۵) میدان جریان در آرایش 4*4 در Re=300 و ضرایب توانی مختلف

شکل(۳–۳۶) مقایسه بین نمودار سرعت بی بعد طولی در Re=300 و آرایش $4*4$ در موقعیت $y/H = 0.5$
شکل(۳–۳۷) نمودار سرعت بیبعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در Re=300 و $Re=300$
شکل(۳–۳۸) نمودار سرعت بیبعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در Re=300 در موقعیت های
مختلف
شکل(۳–۳۹) طرح کلی مسألهٔ مورد بررسی۷۸
شکل(۳-۴۰) شماتیک آرایش قرارگیری موانع مربعی
شکل(۳–۴۱) بردارهای سرعت بی بعد در شبکه بندی های مختلف برای حالت ۱، A/H=1/4 ،c = 0.88 و
Re=100 الف) در موقعیت y/H=0.5 ب) در موقعیت x/L=0.086667 الف) در موقعیت k۰
شکل(۳-۴۲) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، eta =8.8، eta =1/4 (eta =1/4) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در
توانی مختلف
شکل(β-۳) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، β=1/4،ε=0.88، مالت ۲و ضرایب
توانی مختلف
شکل(۳-۴۴) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، eta =0.88، جالت ۳و ضرایب (۴۴-۳) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در
توانی مختلف
شکل(۳-۴۵) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، β=1/4،ε=0.88، مالت ۴و ضرایب
توانی مختلف
شکل(۳-۴۶) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، β=1/2 ،ε=0.88، حالت ۱ و ضرایب
توانى مختلف
شکل(β-۲) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، β=1/2،ε=0.88، حالت ۲ و ضرایب
توانی مختلف
شکل(۳-۴۸) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، ε=0.88، β=1/2، حالت ۳ و ضرایب
توانی مختلف
شکل(۳-۴۹) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، β=1/8، ε=0.88، حالت ۱ و ضرایب
توانی مختلف۸۸
شکل(۳-۵۰) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، β=1/8، ε=0.88، حالت ۲ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۵۱–۵۱) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، β=1/8، ε=0.88، حالت ۳ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(α-۲۲) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=300، β=1/4،ε=0.88، مالت ۱ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۳-۵۳) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=300، β=1/4، ε=0.88، محالت ۲ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۳-۵۴) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=300، β=1/4،ε=0.88، محالت ۳ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۳-۵۵) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=300، β=1/2،ε=0.88، محالت ۱ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(β-۳) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=300، β=1/2، β=1/2، حالت ۲ و ضرایب توانی
مختلف

شکل(β-۵۷) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=300، β=1/2، ε=0.88، مالت ۳ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۳–۵۸) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=300، Re=1/8، eta =1/8، حالت ۱ و ضرایب توانی
٩٧
شکل(۳-۵۹) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=300، β=1/8، ε=0.88، محالت ۲ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۳-۶۰) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=300، ε=0.88، β=1/8، حالت ۳ و ضرایب توانی
٩٩
شکل(۳-۶۱) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/4، ε=0.88، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.
شکل(۳-۶۲) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/4، ε=0.88، حالت ۲ و ضرایب توانی مختلف. یعر
1
شکل(۳–۶۲) میدان جریان در محیط متخلخل در Ke=100، Ke=3، β=1/4، حالت ۳ و ضرایب توانی مختلف.
شکل(β-۶+) میدان جریان در محیط متخلخل در Ke=100، Ke=3، ۶۰=3، β=1/4، حالت ۴ و ضرایب توانی مختلف. م
شکل(۳-۶۵) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/2،ε=0.88، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.
$1 \cdot 0$
شکل(۲-۲۶) میدان جریان در محیط متحلحل در Ke=100، Ke=100، حالت ۴ و صرایب توانی محتلف. ع. د
$1 \cdot 7$
شکل(۱−۲۷) میدان جریان در محیط متحلحل در Ke=100، Ke=100، ۲/2−۹، حالت ۱ و صرایب توانی محتلف. ۲۰۰۷
$1 \cdot \gamma$
سکل(۱-۲۸) میدان جریان در محیط متحلحل در ۱۵۵–۱۸۲ ۵۰.۵۳–۲۵ ۲۰۵۵–۲۴ خالف ۱ و صرایب توانی مختلف. ۱۰۸
$\beta = \frac{1}{2} + $
شکل (۲۰۰۱) میدان جریان در محیط متحلحل در ۱۰۵۰–۱۸۰ ۵۰۵۵ ۵۰ ۲۰۱۵ م. عالمت ۲ و ضرایب کوانی محلف. ۱۰۹
$\beta = \frac{1}{2} \beta = \frac{1}{2} \beta = \frac{1}{8} \epsilon = 0.88 \text{ Re} = 100 \text{ s} = \frac{1}{2} \beta $
شکل (۲۰۰۱) میدان جریان در محیط متحلحل در ۲۰۵۰ - ۲۰۵ ۵۰۰۵ ۵۰ ۲۰۰۵ ۲۰ کامت ۲ و ضرایب توانی محلف. ۱۱۰
$\beta = \frac{1}{4} = 0.88$ Re-300 s $\beta = 1/4 = 0.00$
شکل (۱-۱۱) میدان جریان در محیط متحلحل در 500 -۳۰۵ ۵۰۵ ۲۰۰ ۲۰۱۵ م. ۲۰۱۴ م. حالت ۱ و ضرایب توانی محلف. ۱۱۱
$\beta = \frac{1}{2} + $
شکل(۱-۱۱) میدان جریان در محیط متحلحل در ۵۰۵–۱۸۰ ۲۰۰۵، p-۱/۹، حالت ۱ و صرایب توانی محلف. ۱۱۲
$\beta = \frac{1}{2} + $
سکل(۱-۱۱) میدان جریان در محیط متحلحل در ۵۰۰۷–۱۹۰۰ ۵۰۰۵ م ۱۱۰۳ م. حالف ۱ و صرایب توانی محلف. ۱۱۳
$\beta = \frac{1}{2} \beta = \frac{1}{2} \beta = \frac{1}{4} \epsilon = 0.88 \text{ Re} = 300 solutions in the set of t$
سکل(۱-۱۱) میدان جریان در محیط متحلحل در ۵۰۰۷–۱۹۰۰ ۵۰۰۵ م ۱/۳ م حالف ۱ و صرایب توانی محلف. ۱۱۴
$\beta = \frac{1}{2} = 0.88 \text{ Re} = 300 solution in the set of the se$
سکل(۱-۲۵) میدان جریان در محیط متحلحل در ۵۰۰۵ - ۱۲۵ ۵۰۰۵ ۵۰ ۲۰ ۲۰ ۲۰ عنگ ۱ و طرایب توانی محسک. ۱۱۸
1.1 W

۲-۲) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، Re=3، جالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.	شکل('
119	·····
۱-۹۹) میدان جریان در محیط متحلحل در ۵۰۵–۲۵، ۵۰٬۵۰۵، ۵۰/۵–۴، ۲۱۷ و صرایب توانی محتلف. 	شكل(
۲-۲۷) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، $eta=1/8$ ، $eta=1/8$ ، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.	شکل('
11λ	
۲-۷۹) میدان جریان در محیط متحلحل در Ke=300، Be=3، ۶۰۳=۵، حالت ۲ و ضرایب توانی مختلف. 	شكل(`
۲-۸۰) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، $= 1/8$ ، $= 1/8$ ، حالت ۳ و ضرایب توانی مختلف.	شکل('
$\beta = 1/8 = 0.88 \text{and} $	 ۲) ار ش
۱-۱۸۱) تعییرات طول بی بعد کردانه (<i>L_r</i>) با عدد ریتوندر برای ضرایب توانی مختلف در ۵۰۵۵–۵۶ ۳/۱۷ و ۱.	سكل(حالت
۲-۸۲) میدان جریان در محیط متخلخل در $Re=100$ ، $Re=1/4$ ، $\varepsilon=0.75$ ، Re=100) میدان جریان در محیط متخلخل در ۸۲-۲	شکل('
۲۰۰۳) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/4، ε=0.75، Re=100، حالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.	 شکل('
174	
۸۴-۲) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/4 ،ε=0.٬5، حالت ۳ و ضرایب توانی مختلف. ۱۲۵	شکل('
۲-۸۵) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β =1/2، β =1/2، دالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.	شكل('
179	
۱-۸۶) میدان جریان در محیط متحلحل در Ke=100، ۲۵٬۰۵۵، ۹۲/۲۵–۴، ۵/۲۱۹، حالت ۱ و صرایب توانی محتلف. 	شكل(
۲-۸۷) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/2، ε=0.75، محالت ۳ و ضرایب توانی مختلف.	شکل('
میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β =1/8، β =1/8، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف. β -۸۸) میدان جریان در محیط متخلخل در	شکل('
۱۲۹ الت در محرط متخاخل در $Re=100$ هجال $\beta=1/8$ $\varepsilon=0.75$ $Re=100$ مخاخل مختلف (۵۹-۲ در ۱۹	شکا (*
۱۳۰، سیمان بریان در عمیلا منطقان در ۲۰۰۵ ۲۰۰۰ ۲۰۰ ۲۰۰ ۲۰۰ ۲۰۰ و طرایب ورایی معمد. ۱۳۰	
۲-۹۰) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/8، β=1/8، حالت ۳ و ضرایب توانی مختلف.	شکل('
میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β =1/4، β =1/4، دان جریان در محیط متخلخل در β =1/4، β =1/4، β	شکل('
1%	·····
۱۱-۱۱) میدان جریان در محیط متحلحل در ۵۰۵–۱۸۰ ۵۰۰ <i>۵ – ۱</i> ۰۳ میدان جریان در محیط متحلحل در ۱۳۵۰–۱۳۳	سحل,
۹۳-۲) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/4، ε=0.75، Re=300، حالت ۳ و ضرایب توانی مختلف.	شکل('
۲-۹۴) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/2، ε=0.75، رحالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.	شکل('
1.44	

شکل(۳-۹۵) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/2،ε=0.75، حالت ۲ و ضرایب توانی مختلف. ۱۳۶
شکل(۳-۹۶) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/2،ε=0.75، Re=300، حالت ۳ و ضرایب توانی مختلف. ۱۳۷
شکل(۳-۹۷) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/8، ε=0.75، مالت ۱ و ضرایب توانی مختلف. ۱۳۸
شکل(۳-۹۸) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/8، ε=0.75، مالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.
شکل(۳-۹۹) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/8، ε=0.75، مالت ۳ و ضرایب توانی مختلف.
شکل(۳-۱۰۰) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/4، ε=0.9375، القاد و ضرایب توانی نیان
محتلف شکل(β-۱۰۱) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/4، ε=0.9375، حالت ۲ و ضرایب توانی بیدن
محتلف شکل(β-۱۰۲-) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/4، ε=0.9375، حالت ۳ و ضرایب توانی نیان
محتلف شکل(β-۱۰۳) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/2، ε=0.9375، حالت ۱ و ضرایب توانی نیان
محتلف. شکل(۳-۱۰۴) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/2، ε=0.9375، حالت ۲ و ضرایب توانی نیان
محتلف شکل(۳-۱۰۵) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/2،ε=0.9375، حالت ۳ و ضرایب توانی بیان
محتلف. شکل(۳-۱۰۶) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/8، ε=0.9375، حالت ۱ و ضرایب توانی بند.
مختلف شکل(۳-۱۰۷) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/8، ε=0.9375، حالت ۲ و ضرایب توانی
مختلف شکل(۳-۱۰۸) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/8، ε=0.9375، حالت ۳ و ضرایب توانی میرون
مختلف شکل(۳-۱۰۹) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/4، ε=0.9375، حالت ۱ و ضرایب توانی
مختلف شکل(۳-۱۱۰) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/4، ε=0.9375، حالت ۲ و ضرایب توانی
مختلف شکل(۳-۱۱۱) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/4، ε=0.9375، مالت ۳ و ضرایب توانی
مختلف شکل(۳-۱۱۲) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/2، ε=0.9375، حالت ۱ و ضرایب توانی
مختلف شکل(۳-۱۱۳) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/2،ε=0.9375، حالت ۲ و ضرایب توانی
مختلف

کل(۳-۱۱۴) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، $eta=1/2$ ، $eta=1/2$ ، حالت ۳ و ضرایب توانی
ختلفختلف
کل(۳-۱۱۵) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β =1/8، ε =0.9375، طالت ۱ و ضرایب توانی
ختلف
کل(۳-۱۱۶) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/8، ε=0.9375، حالت ۲ و ضرایب توانی
ختلف
کل(۳-۱۱۷) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/8، ε=0.9375، حالت ۳ و ضرایب توانی متافی
کل (۱۱۸–۱۱۸) الف) نمودار سرعت بی بعد طولی در آرایش های مختلف در y / H = 0.5 ،Re=100 ،n=0.8 ،
و $\beta=1/4$ و $\beta=1/4$ ب) نمای نزدیکتر در نقطهٔ A $=0.8$
کل (۳-۱۱۹) الف) نمودار سرعت بیبعد طولی در آرایش های مختلف در n=1.0، Re=100، Re=100، الف) نمودار سرعت بی
د $\beta=1/4$ و $\beta=1/4$ ب) نمای نزدیکتر در نقطهٔ A
کل (۳-۱۲۰) الف) نمودار سرعت بیبعد طولی در آرایش های مختلف در n=1.2، Re=100، n=1.2، y / H
د $\beta=1/4$ و $\beta=1/4$ ب) نمای نزدیکتر در نقطهٔ A
کل (۳–۱۲۱) نمودار سرعت بیبعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در Re=100، Re ا x/L ،
ιειβ=1/4 ε=0.8
کل (۳-۱۲۲) نمودار سرعت بیبعد عرضی در موقعیت ها و ضرایب توانی مختلف در حالت ۱، n=0.8،
$\beta = 1/4$, $\epsilon = 0.88$ Re=10
کل (۳–۱۲۳) نمودار سرعت بیبعد عرضی در موقعیت و ضرایب توانی و اعداد رینولدز مختلف در حالت۱،
β=1/4 ,ε=0.8
کی (۳–۱۲۴) نمودار سرعت ہے بعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانے مختلف در Re=100، Re=100، x/L
β=1/4, ε=0.7
کی کل (۳–۱۲۵) نمودار سرعت بی بعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در Re=100، Re=100، x / L=
νεπβ=1/4 , ε=0.937
کی کل(۳-۱۲۶) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در Re=100، ε=0.88 و β=1/4 و β=1/4
ضرايب توانی مختلف
کی کل(۸-۱) شماتیک انتقال حرارت بین دو صفحهٔ موازی
کل(۲-۲) عدد ناسلت بر حسب مختصات طولی بی بعد در ضرایب توانی مختلف و Re=400
کل کل(۴–۳) مقایسه بین نتایج حل عددی و نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار کمسول برای عدد ناسلت
حلی در دیوارهٔ پایینی در Re=100 و ضرایت توانی مختلف
کی را ایرار پیدایی از کار(۴–۴) مقایسه بین نمودار دمای بی بعد تانگ با نتایج بدست آمده از روش شیکهٔ بولتزمن
کی (۴–۵) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100 و ضرایت توانی مختلف
کل(۴–۶) نمودارهای دمای بی بعد عرضی داخل کانال در مقاطع مختلف به ازای Re=100 و ضرایب توانی
ختلف
کا .(۲-۴) نمودارهای دمای بی بعد طولی در موقعیت y/H=0.5 به ازای Re=100 و ضرایب توانی مختلف و
ناسه آن یا د م افزار کمسوا
۔ کا (۴–۸) شماتیک مانع مربعے, داغ داخا , کانال

شکل(۴–۹) مقایسهٔ بین عدد ناسلت متوسط زمانی بدست آمده با نتایج ترکی و همکاران <i>در</i> اعداد رینولدز
مختلف
شکل(۴-۱۰) مقایسهٔ بین عدد ناسلت متوسط بدست آمده با نتایج دیمان [67] در اعداد رینولدز مختلف و ضریب مدر
توانی ۱٫۵
شکل(۲-۱۱) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد ۲۰/۵ = Re=100 و ضرایب توانی میرد
محتف
شکل(۲–۱۲) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد β / β = 200 β و ضرایب توانی میر
مختلف
شکل(۲-۱۲) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد ۲۰/۵ = Re=300 و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۲–۱۴) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد β = 1/β، Re=100 و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴–۱۵) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد β = 1/β، 200 Be=200 و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴–۱۶) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد β = 1/β، Re=300 و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴–۱۷) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد β = 1/2، Re=100 و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴–۱۸) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد β = 1/2، Re=200 و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴–۱۹) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد β = 1/2، Re=300 و ضرایب توانی
مختلف٨١
شکل(۴-۲۰) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در رینولدز بحرانی، درصد انسداد $eta=1/2$ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴–۲۱) نمودارهای دمای عرضی داخل کانال در مقاطع مختلف به ازای $eta=1/4$ $eta=100$ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴-۲۲) مقایسه بین نتایج حل عددی و نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار کمسول برای عدد ناسلت محلی
در ديوارهٔ پايينی در اعداد رينولدز مختلف و ضريب توانی ۰٫۷۸۳
شکل(۴-۲۳) مقایسه بین نتایج حل عددی و نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار کمسول برای عدد ناسلت محلی
در ديوارهٔ پاييني در اعداد رينولدز مختلف و ضريب تواني ١,٣
شکل(۴–۲۴) عدد ناسلت میانگین بر حسب عدد رینولدز در درصد انسداد و ضرایب توانی متفاوت۸۴
شکل(۴–۲۵) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در آرایش 4*4، Re=100 و ضرایب توانی مختلف۸۷
شکل(۴-۲۶) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در آرایش 4*4، Re=300 و ضرایب توانی مختلف۸۸
شکل(۴-۲۷) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در آرایش 7*7، Re=100 و ضرایب توانی مختلف
شکل(۴–۲۸) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در آرایش 7*7، Re=300 و ضرایب توانی مختلف۹۰
شکل (۴-۲۹) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در آرایش 10*10، Re=100 و ضرایب توانی مختلف۹۱
شکل(۴-۳۰) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در آرایش 10*10، Re=300 و ضرایب توانی مختلف

شکل (۴–۳۱) نمودار دمای بیبعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در Re=300 در موقعیت های
مختلف
شکل (۴-۳۲) نمودار عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز در آرایش های مختلف
شکل (۴–۳۳) تاثیر اندازهٔ شبکه بر روی عدد ناسلت متوسط در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی در حالت۱،
۱۹۶
شکل (۴-۳۴) تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب تعداد تکرارها در سیال در حالت۱، B/H=1/4 ،E = 0.88 و
۱۹۶Re=100
شکل(۴-۳۵) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، β=1/4،ε=0.88، re=1/6، حالت ۱و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴-۳۶) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، β=1/4،ε=0.88، محالت ۲و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴-۳۷) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، β=1/4،ε=0.88، re=β، حالت ۳و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴-۳۸) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، β=1/4،ε=0.88، محالت ۴و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴-۳۹) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، $egin{array}{c} { m se}=0.88 & { m se} \end{array}$ ، حالت 1 و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴-۴۰) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، ε=0.88، β=1/2، حالت ۲ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴۱-۴) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، ε=0.88، β=1/2، حالت ۳ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴-۴۲) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، $eta = 0.88$ ، $eta = 1/8$ ، حالت 1 و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴-۴۳) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، ε=0.88، β=1/8، حالت ۲ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴-۴۴) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، ε=0.88، β=1/8، حالت ۳ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴۵-۴) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، β=1/4،ε=0.88، re=8، حالت ۱ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴-۴۶) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، β=1/4،ε=0.88، محالت ۲ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴-۴۷) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، β=1/4،ε=0.88، محالت ۳ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴-۴۸) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، ε=0.88، β=1/2، حالت 1 و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴۹-۴۹) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، ε=0.88، β=1/2، حالت ۲ و ضرایب توانی
مختلف

شکل(۴-۵۰) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، ε=0.88، β=1/2، حالت ۳ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴-۵۱) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، β=1/8، ε=0.88، محالت ۱ و ضرایب توانی مختلف
محسنی. شکل(۸۴۵۲) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، β=1/8، ε=0.88، محالت ۲ و ضرایب توانی
مختلف
شکل(۴-۵۳) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، β=1/8، β=1/8، حالت ۳ و ضرایب توانی
محتكف
شکل (۴+۵) الف) نمودار دمای بی بعد عرضی در ارایش های مختلف در n=0.8، Re=100، L = 0.084، Re=100، n=0.8،
ε=0.88 و β=1/4 ب) نمای نزدیکتر در نقطهٔ A
شکل (۴-۵۵) الف) نمودار دمای بیبعد عرضی در آرایش های مختلف در n=1.0، Re=100، Re=100، x / L = 0.084، م
ε=0.88 و β=1/4 ب) نمای نزدیکتر در نقطهٔ A
شکل (۴-۵۶) الف) نمودار دمای بیبعد عرضی در ارایش های مختلف در n=1.2، Re=100، Re=100، x / L = 0.084، Re
و $\beta=1/4$ و $\beta=1/4$ ب) نمای نزدیکتر در نقطهٔ A
شکل (۴–۵۷) نمودار تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی عدد ناسلت محلی در ضرایب توانی مختلف برای حالت اول،
ε=0.88 و β=1/4 در دیوارهٔ پایین کانال
شکل (۴-۵۸) نمودار تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی عدد ناسلت محلی در ضرایب توانی مختلف برای حالت دوم،
ε=0.88 و 1/4 در دیوارهٔ پایین کانال.
شکل (۴–۵۹) نمودار تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی عدد ناسلت محلی در ضرایب توانی مختلف برای حالت سوم،
ε=0.88 و 1/4 در دیوارهٔ پایین کانال
شکل (۸۴۶۰) نمودار تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی عدد ناسلت محلی در ضرایب توانی مختلف برای
حالت چهارم، ε=0.88 و β=1/4 در ديوارهٔ يايين کانال
شکل (۴–۶۱) نمودار مقابسهٔ عدد ناسلت محلی در حالت های مختلف در β=1/4 و β=1/4 در
ديوارة بايت: كاناار الف) Re=300 ب) Re=300 المستقدم (Construction) (Re
شکار (۴–۶۲) نمودار مقایسهٔ عدد ناسلت محلی در حالت های مختلف در n=1.0، n=2.88 ه 1/4=8 در
مدين راب کانال الف Re=100 (Re=100) تعليم الم علي الم علي الم علي الم علي الم الم الم الم الم الم الم الم الم
$\beta = 1/4$, $s = 0.88$, $n = 1.2$, $s = 1/4$, $s = 0.88$, $n = 1.2$
P = 1.2 (1-1) $P = 1.2$ (1-
ديواره پايين كانل الف (Ke=100 ب) Ke=100 بيند الم الم در ما الم در مدار از داد زيران در مارد در مارد د
شکل (۲-۶) نمودار تعییرات عدد ناسلت متوسط در حالت و درصدهای انسداد مختلف بر حسب عدد رینولدز در ۵.۵۰ م. ۵.۹۵ م.
8.0=n. 88.0=3
شکل (۴–۴۵) نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط در حالت و درصدهای انسداد مختلف بر حسب عدد رینولدز در
ε=0.88 .n=1.0
شکل (۴–۶۶) نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط در حالت و درصدهای انسداد مختلف بر حسب عدد رینولدز در
٤=0.88 n=1.2 €
شکل (۴-۶۷) نمودار تاثیر ضریب توانی n بر روی عدد ناسلت بی بعد در اعداد رینولدز مختلف و A/H=1/4۲۳۵
شکل (۴–۶۸) نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط در حالت و درصدهای انسداد مختلف بر حسب عدد رینولدز در
۳۳۸۲۳۶.

شکل (۴–۶۹) نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب نسبت تخلخل در حالت و درصدهای انسداد مختلف در Re=300 و A/H=1/2....

فصل اول

مقدمه

۱–۱– مقدمه

محیط های متخلخل طبیعی و صنعتی به علت ساختار منحصر به فرد و اهمیت کاربرد آن در زمینه های مختلف مهندسی از جمله صاف کننده های جریان، جاذب های گرما، جاذب های انرژی مکانیکی، مبدل های حرارتی، سلول های خورشیدی، هسته های رآکتورهای هسته ای، عایق های حرارتی ساختمانی، سیستم های ژئوترمال، شبیه سازی جریان آب های زیر زمینی، جریان های دوفازی، حرکت روغن و گاز در مخازن نفتی، استخراج نفت خام، صنایع غذایی، تکنولوژی لوله های گرمایی^۱، صنایع آلیاژسازی و غیره، از دو جنبهٔ هیدرودینامیکی و گرمایی از سالیان دور برای مهندسین و دانشمندان بسیار قابل توجه بوده است که به طور نمونه می توان به تحقیقات ابتدایی صورت گرفته توسط دارسی^۲ در قرن نوزدهم که در ارتباط با مهندسی منابع طبیعی بنا نهاده شده، اشاره نمود که مدل وی شیوهٔ اولیهٔ برای حل مسائل جابجایی در محیط متخلخل می باشد. بررسی مکانیک، عمران، نفت، کشاورزی، شیمی و محیط زیست است، این موضوع دانشمندان را در جهت روی آوری به مدل های بهتر و جامعتر سوق داد. توسعهٔ ابزارهای شبیه سازی با توجه به پیچیدگی مشاهدهٔ مستقیم و یا رخداد بسیار کند و یا سریع، گامی مهم در درک فرآیندهای انتقال در محیط مشاهدهٔ مستقیم و یا رخداد بسیار کند و یا سریع، گامی مهم در درک فرآیندهای انتقال در محیط متخلخل می باشد.

¹ Heat pipe

² Darcy

جریان سیال در محیط متخلخل با مقیاس های طولی مختلف از جمله منفذی^۱ و محلی^۲ مرتبط می باشد. معمولاً انتقال سیال برحسب پارامترهای متوسط مناسب مدلسازی می شود به نحوی که ساختار حفره واقعی و مقیاس های طولی مرتبط در نظر گرفته نمی شوند. علاوه بر این، پارامترهای متوسط با آزمایش به دست آمده و به شدت تحت تاثیر نوع ساختار میکروسکوپیکی و شرایط عملیاتی می باشد. اثر انتشار میکروسکوپیکی تاثیر بسزایی بر روی انتقال حرارت، مومنتوم و جرم دارد. در نتیجه مدلسازی رفتارهای انتقالی در مقیاس منفذی در فرآیندهای مهندسی واقعی مورد توجه است. جهت شبیه سازی صحیح، معتبر بودن روش های مدلسازی از الزامات می باشد.

روش های مختلفی جهت شبیه سازی محیط متخلخل وجود دارد که در این بین بکارگیری روش شبکهٔ بولتزمن^۳ در مقیاس منفذی بسیار مناسب خواهد بود. در سال های اخیر روش شبکهٔ بولتزمن به عنوان یک طرح عددی مطلوب در شبیه سازی جریان سیال و مدلسازی فیزیک سیالات، توسعه یافته است. این روش به علت ساده بودن پیاده سازی آن بر روی سخت افزارهای معمول و قدرت زیاد آن در شبیهسازی جریان سیال و مدلسازی فیزیک سیالات، توسعه آن در شبیهسازی جریان سیال و مدلسازی فیزیک سیالات، توسعه یافته است. این روش به علت ساده بودن پیاده سازی آن بر روی سخت افزارهای معمول و قدرت زیاد آن در شبیهسازی جریان سیال و مدلسازی فیزیک سیالات، توسعه آن در شبیهسازی جریان سیال و مدلسازی فیزیک سیالات، توسعه آن در شبیهسازی جریان سیال و انتقال حرارت در مسائلی مانند جریان با مرزهای پیچیده، جریان چندفازی و جریان سیال غیرنیوتنی مناسب است [7-1]. روش شبکهٔ بولتزمن یک روش با دیدگاه آماری می باشد. در این مدلسازی جدید، حرکت ذرات به دو بخش برخورد⁴ و انتقال⁴ پس از برخورد تقسیم بندی می شود. الگوی برخورد در واقع هستهٔ اصلی روش بوده و درستی آن تضمین کنندهٔ صحت و اعتبار این روش در حل یک معادلهٔ دیفرانسیل جزئی خاص می باشد [۸-۱۰].

به منظور بررسی جریان سیال و انتقال حرارت از محیط متخلخل تاکنون مطالعات عددی و تجربی فراوانی انجام گرفته است. در ادامه مروری بر اقدامات انجام شده عددی با استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن انجام شده و نتایج بدست آمده در این زمینه بررسی گردیده است.

³ Lattice Boltzmann Method

¹ Pore

² Local

⁴ Collision

⁵ Streaming

زانگ و همکاران ^۱ [11] به بررسی برخی موضوعات بنیادی جریان تک فازی در محیط متخلخل در مقیاس های منفذی و ماکروسکوپی پرداخته و وابستگی ضرایب ماکروسکوپی را با مقیاس تخلخل بررسی نمودند. مطالعات آنها در لابراتوار ملی لوس آلاموس^۲ که جهت شبیه سازی جریان سیال عبوری از مقیاس های منفذی مختلف بود، انجام گرفت. آنها دو نوع ساختار مختلف با نسبت تخلخل 9.02 و 0.16 را بررسی نمودند. جریان سیال با ثابت نگه داشتن گرادیان فشار کلی در یک جهت، القا گردید و در دیواره ها از شرط عدم لغزش استفاده شد. در این شبیه سازی عدد رینولدز کمتر از القا گردید و در دیواره ها از شرط عدم لغزش استفاده شد. در این شبیه سازی عدد رینولدز کمتر از القا گردید و در دیواره ها از شرط عدم لغزش استفاده شد. در این شبیه سازی عدد رینولدز کمتر از یک در نظر گرفته شد.

پن و همکاران^۳ [12] جریان سیال یک فازی و دوفازی محیط های متخلخل در مقیاس منفذی را بررسی نمودند. آنها از پنج دامنهٔ محاسباتی مختلف با محیط متخلخل همگن و ناهمگن از کره های فشرده استفاده کرده و به روش جدیدی در تسریع همگرایی دست یافتند. در شکل (۱–۱) هندسهٔ مورد استفاده آنها نشان داده شده است.



شکل(۱-۱) هندسه کره های به هم فشردهٔ مورد استفادهٔ پن و همکاران [12]

در زمینهٔ بررسی دقت و قابلیت معادله شبکه بولتزمن در جریان عبوری از محیط متخلخل، تحقیقاتی توسط پن و همکاران^۴ [13] انجام گرفت. محیط متخلخل آنها مکعبی سه بعدی با دو آرایش مختلف

¹ Zhang et. al.

² Los Alamos National Laboratory

³ Pan et. al.

⁴ Pan et. al.

بود که در شکل (۱–۲) نشان داده شده است. نتایج آنها که با دو مدل مختلف، زمان آرامش منفرد^۱ و زمان آرامش منفرد^۱ و زمان آرامش چندگانه را در بررسی محیط محنط متخلخل نشان داد.



شکل(۱-۲) هندسه های مورد استفادهٔ پن و همکاران [13]

شبیه سازی جریان دو فازی، لزج و غیردائم سه بعدی محیط متخلخل، مطابق شکل (۱–۳)، در یک کانال مربعی توسط اینامورا^۳ [14] انجام گرفت. وی از طرح شبکهٔ سینتیک^۴ که طرح بهبود یافته روش شبکهٔ بولتزمن بوده و به توابع توزیع سرعت نیاز ندارد، استفاده نمود. نتایج وی نشان داد که روش ذکر شده در شبیه سازی جریان سیالات پیچیده بسیار کارامد است.



شكل(۱-۳) محيط متخلخل سه بعدى اينامورا [14]

¹ Single Relaxation Time(BGK)

² Multiple Relaxation Time(MRT)

³ Inamura

⁴ Lattice Kinetic Scheme(LKS)

یوشینو و میزوتانی^۱ [15] جریان سیال دو فازی عبوری از اجسام جامد داخل یک کانال مربعی را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان داد که روش شبکه بولتزمن در بررسی جریانهای مایع-گاز عبوری از هندسه های پیچیده بسیار مفید است.

ستا و همکاران^۲ [16] مطالعاتی در تصدیق قابلیت اعتماد و بازدهٔ محاسباتی روش شبکهٔ بولتزمن در شبیه سازی جابجایی طبیعی در محیط متخلخل انجام دادند. بررسی آنها در اعداد رایلی و دارسی مختلف و با تخلخل های متعدد انجام گرفت.

تحقیقات دیگری نیز در زمینه جریان دوفازی در محیط متخلخل توسط یوتیس و همکاران^۳ [17] انجام گرفت. در تحقیقات آنها اثر خیس شدگی در سطح تماس مایع – جامد و موئینگی با زاویه های تماس مختلف بررسی گردید.

کااو و همکاران[†] [18] جریان سیال داخل میکرو رآکتورهای با بستر ثابت دارای موانع متخلخل را بررسی نمودند. بررسی آنها با استفاده از مدل زمان آسودگی منفرد و در اعداد رینولدز مختلف انجام گرفت و یک آرایش بهینه در چیدمان موانع به دست آمد. شبیه سازی حرارتی آنها با گرمایش سیال و محیط متخلخل انجام گرفت. بررسی های آنها افزایش اثر انتشار گرمایی و کاهش اثر جریان رسانایی را نشان داد.

جئونگ و همکاران^۵ [19] ضریب پخش جرمی و گرمایی را در یک محیط متخلخل بررسی نمودند. محیط مورد بررسی آنها از کره های جامد با دو آرایش روی هم افتاده و غیر روی هم افتاده مطابق شکل (۱-۴) پر شده بود و به دو صورت دو بعدی و سه بعدی با مدل های D2Q9 و D3Q15 انجام گرفت. لازم به ذکر است که ضریب پخش به دست آمده آنها سازگاری خوبی با نتایج تحلیلی داشت.

¹ Yoshino & Mizutani

² Seta et. al.

³ Yiotis et. al.

⁴ Kao et. al.

⁵ Jeong et. al.



شكل(۱-۴) آرایش محیط متخلخل مورد استفادهٔ جئونگ و همكاران [19]

به منظور پیش بینی توزیع فاز مایع داخل محیط متخلخل، تحقیقاتی توسط لهمان و همکاران^۱ [20] بر روی خواص هندسی در نفوذپذیری و توزیع فاز سیال در محیط متخلخل انجام گرفت. نمونه ای از محیطهای متخلخل مورد استفادهٔ آنها در شکل (۱–۵) نشان داده شده است.



شکل(۱-۵) نمونه ای از محیطهای مورد بررسی لهمان و همکاران [20]

در زمینه بررسی جریان سیال و انتقال حرارت بین دو صفحه موازی یک مجرا، تحقیقاتی توسط شکوهمند و همکاران^۱ [21] صورت گرفت. در تحقیقات آنها، مرکز مجرا با محیط متخلخل پر شده

¹ Lehmann et. al.

بود و تاثیر پارامترهای مختلف همچون عدد دارسی، ضخامت محیط متخلخل و غیره بررسی گردید. آنها از مدل D2Q9 با مدل هندسی مطابق شکل (۱–۶) استفاده نمودند. تحقیقات آنها نشان داد که تمام پارامترهای ذکر شده تاثیر قابل توجهی در عملکرد گرمایی کانال دارند.



شکل (۱-۶) شماتیک هندسهٔ مورد بررسی شکوهمند و همکاران [21]

رانگ و همکاران^۲ [22] به بررسی جریان های گرمایی متقارن محوری داخل محیط متخلخل پرداختند. آنها از مدل دو بعدی جریان دائم و آرام در لوله متخلخل استفاده نمودند. نتایج آنها بیانگر سازگاری خوب روش شبکه بولتزمن در حل این گونه مسائل بود.

به علت ناتوانی قانون دارسی در بررسی جریانهای با نرخ عبوری بالا از محیط متخلخل، چای و همکاران^۳ [23] به مطالعه رژیم جریانهای غیر دارسی تراکم ناپذیر عبوری از محیط های متخلخل نامنظم مطابق شکل (۱–۷) پرداختند. شبیه سازی آنها در مقیاس منفذی و در محدودهٔ اعداد رینولدز 0.02 تا 30 انجام گرفت. آنها با استفاده از مدل زمان آسایش چند گانه، به بررسی جریان سیال عبوری از محیط متخلخل پرداختند.

¹ Shokouhmand et. al.

² Rong et. al.

³ Chai et. al.


شکل(۱-۷) شماتیک محیط متخلخل تصادفی چای و همکاران [23]

زو و همکاران^۱ [24] به بررسی جریان با جابجایی طبیعی دو بعدی در محیط متخلخل پرداخته و تاثیر اندازه سلول ها، تخلخل و آرایش محیط متخلخل را نیز بررسی نمودند. مدل هندسی آنها یک حفره مربعی پر شده با بلوک های فلزی مربعی متخلخل مطابق شکل (۱–۸) با آرایش های مختلف بود. نتایج آنها نشان داد که انتقال حرارت کلی با پایین آوردن میزان تخلخل و اندازه سلولها، افزایش یافته و محیط متخلخل مربعی نسبت به محیط کروی به علت ایجاد اختلاط قوی سیال و سطح تماس بیشتر، عملکرد گرمایی بیشتری دارد.

o			o
0			D
o	D	D	O
0		D	O
0		D	D

شکل(۱-۸) نمونه ای از حفره مربعی پر شده با بلوک های فلزی مربعی متخلخل زو و همکاران [24]

¹ Zhao et. al.

شبیه سازی عددی مایع – جامد به همراه انتقال حرارت در محیط متخلخل فرکتالی^۱ از جمله مطالعات سای و هوآی^۲ [25] بود. در این مطالعه تاثیر افت فشار و تخلخل بر روی جریان سیال بررسی گردید. نتایج آنها نشان داد که روش شبکهٔ بولتزمن به خوبی با نتایج حجم محدود منطبق بوده و در ساختارهای متخلخل پیچیده کارایی بالایی دارد. شماتیک محیط متخلخل و شرایط مرزی مورد بررسی آنها در شکل (۱–۹) نشان داده شده است.



شکل(۱-۹) شماتیک محیط متخلخل و شرایط مرزی مورد بررسی سای و همکار [25]

هاسرت و همکاران^۳ [26] جریان هوای عبوری از محیط متخلخل پریودیک را بررسی نمودند. در زمینه انتقال حرارت جابجایی اجباری آرام در یک لوله افقی دارای ماده متخلخل، مطالعاتی توسط تی ماه و همکاران^۴ [27] در سه حالت مختلف قرار گیری ماده متخلخل داخل کانالی مطابق شکل (۱-۱۰) و در محدودهٔ اعداد دارسی مختلف انجام گرفت. نتایج آنها نشان داد که افزایش شعاع مادهٔ متخلخل، بر عملکرد گرمایی و توان یمیاژ تاثیر منفی می گذارد.

¹ Fractal Porous Medium

² Cai & Huai

³ Hasert et. al.

⁴ Teamah et. al.



شکل(۱۰-۱۰) شماتیک هندسهٔ مورد بررسی تی ماه و همکاران [27]

قاسمی و پاک^۱ [28] نیز به مطالعه عددی فاکتورهای تاثیر گذار نفوذپذیری نسبی دو جریان سیال مخلوط نشدنی عبوری از محیط متخلخل پرداختند. مطالعات اشاره شدهٔ بالا همگی در مورد سیالات نیوتنی انجام گرفته بودند اما در زمینهٔ سیالات غیرنیوتنی نیز بررسی های زیر در زمینهٔ محیط متخلخل با استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن انجام گرفته است. بوک و همکاران [29] جریان سیال تک فازی سیالات غیرنیوتنی را با استفاده از قانون توانی بررسی نمودند. کانال مورد بررسی آنها جهت اندازه گیری پروفیل های سرعت شبیه سازی شده بود و نتایج آنها تطابق خوبی با نتایج تئوری داشت. سولیوان و همکاران^۲[30] به صورت سه بعدی به بررسی جریان سیالات غیرنیوتنی عبوری از محیط متخلخل در مقیاس منفذی پرداختند. آنها با تمرکز بر روی سیالات توانی^۳، از ذرات کروی با آرایش



شكل(۱۱-۱) شماتيک هندسهٔ مورد بررسی سوليوان و همکاران [30]

¹ Ghassemi & Pak

² Sullivan et. al.

³ Power-Low Fluids

چن و همکاران [31] روش شبکهٔ بولتزمن خاکستری در جریان سیال عبوری از محیط متخلخل را پیشنهاد نمودند. آنها به معرفی معادلات سیالات توانی و معتبر سازی مدل خود با شبیه سازی سیال پوازی^۱ بین دو صفحه موازی بینهایت پر شده با محیط متخلخل همگن پرداختند. آنها نشان دادند که سرعت لغزشی سیال توانی در سطح محیط متخلخل با افزایش ضریب توانی و در یک ضریب توانی معلوم، با افزایش تخلخل محیط متخلخل، افزایش می یابد.

افشار زاده و بخشایی^۲[32] به بررسی مقایسهٔ بین سه مدل غیرنیوتنی کی-ال^۳، مدل کاسون^۴ و مدل کارو-یاسودا^۵ جهت شبیه سازی جریان خون با استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن پرداختند. این شبیه سازی که به صورت دوبعدی در داخل یک کانال انجام گرفته بود، تطابق خوب بین نتایج حل عددی را با نتایج حل تحلیلی دقیق نشان داد.

وانگ و برنسدورف³[33] جریان غیرنیوتنی خون را با استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن بررسی نمودند. جهانشاهی [34] به بررسی دو بعدی جریان سیال محیط متخلخل در سیستم های بازیافت گرمایی با استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن پرداختند. در مطالعهٔ آنها یک سیستم با جریان دمای بالا در نظر گرفته شد که از داخل یک ماتریس متخلخل تصادفی عبور می نمود. تحقیقات دیگری نیز توسط وانگ و هو^۷[35] در زمینه استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن در جریان خون انجام گرفت. خلاصه مطالعات انجام گرفته در زمینه محیط متخلخل با استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن در جدول (۱–۱)

⁵ Carreau-Yasuda Model

¹ Poiseuille flow

² Ashrafzaadeh & Bakhshaei

³ K-L Model

⁴ Casson Model

⁶ Wang & Bernsdorf

⁷ Wang & Ho

	" "~" II .	- -	دامنهٔ	• • • •	غير
محققين	سال تحقيق	رمينه تحقيق	محاسباتى	ىيوىسى	نيوتنى
زانگ و	۲۰۰۰	بررسی پارامترهای تخلخل در مقیاس	بستر شنی دو	*	
همکاران[۱۰]		حفره	بعدى		
		بررسي عملكرد روش شبكة بولتزمن	کرہ ھای به ھم		
پن و	74	در شبیه سازی محیط متخلخل در	ر ^ی . ۱۰ فشرده همگن	*	
همکاران[۱۱]		مقیاس حفرہ در جریان یک فازی و	سه بعدی		
		دوفازى	-		
ساليوان و		بررسی جریان سیالات عبوری از	کره های با آ ا سرا :		
همکاران [۴۴]	1	محیط متخلخل در مقیاس حفرہ	ارایش تصادفی		*
			دو و سه بعدی		
کار و همکاران [۱۷]	۲۰۰۷	بررسی جریان سیال داخل میکرو آکت جام باب تی ثلبت	بلوت متحلحل	*	
[]]		را فتورهای با بستر کابک	ب اند های		
حئونگ و		یں سے ضرب بخش جرمہ ہ گرمانہ	استمانه ای به		
بر- – ر همکاران [۱۸]	۲۰۰۸	محبط متخلخل	هم فشرده دو و	*	
0,7		U .	سه بعدی		
_		بررسی جریان سیال و انتقال حرارت			
شکوهمند و	79	یک مجرا دارای محیط متخلخل در	بلوک متخلخل	*	
همکاران [۲۰]		مرکز	دو بعدی		
افثا ادم		بررسی سه مدل غیر نیوتنی مختلف			
افسار راده و	7 • • 9	در شبیه سازی جریان خون بدون			*
		وجود محيط متخلخل			
کای و		یں سے جربان سیال و انتقال جرارت	چیدمان منظم		
همکار [۲۴]	7.1.	د. محیط متخلخل فرکتالی	سیرپینسکی دو	*	
,			بعدى		
تی ماہ و ھمکاران		بررسي انتقال حرارت جابجايي اجباري			
[79]	7.11	ارام در یک لوله افقی دارای ماده	بلوك متخلخل	*	
		متخلخل در مرکز			
وانگ و همکار		استفاده از روش شبکه بولتزمن در			
[47]	1 • 1 1	شبیه سازی جریان حون بدون وجود استینانیا			*
		محيط متحلحل			

جدول (۱-۱) خلاصه مطالعات انجام گرفته در زمینه محیط متخلخل با استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن

با توجه به مطالعات اشاره شده، استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن در شبیه سازی میدان جریان و دما بین دو صفحه موازی حاوی محیط متخلخل در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی، از موضوعات پر اهمیت است. در نتیجه در این رساله شبیه سازی جریان و انتقال حرارت در کانال حاوی ماده متخلخل با آرایش پریودیک و تصادفی، و در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی [39-33] انجام گرفته و حل عددی جریان سیال و انتقال حرارت در مقیاس حفره در داخل ماده متخلخل انجام شده است. در این رساله با شبیه سازی دو بعدی محیط متخلخل، اثر نسبت تخلخل بر جریان سیال و انتقال حرارت در سیالات نیوتنی بررسی شده و امکان سنجی اعمال روش شبکه بولتزمن برای سیالات غیرنیوتنی نیز بررسی شده است. شماتیک دامنه محاسباتی و محیط متخلخل مورد استفاده در شکل (۱–۱۲) نشان داده شده است که در فصل ۳ و ۴ به طور مفصل توضیح داده شده است.



شكل (۱-۱۲) طرح كلى مسألة مورد بررسي.

به طور کلی می توان اهداف این رساله را به صورت زیر بیان نمود:

شبیه سازی جریان سیال و انتقال حرارت در کانال حاوی ماده متخلخل در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی به کمک روش شبکهٔ بولتزمن.
 بررسی آرایشهای مختلف محیط متخلخل (در مقیاس حفره) در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی با روش شبکه بولتزمن.

 بررسی تاثیر نسبت تخلخل^۱ محیط متخلخل بر جریان سیال و انتقال حرارت در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی.

۱-۲- جنبه جدید و نوآوری این رساله

با توجه به پیشرفت های اخیر روش شبکهٔ بولتزمن در شبیه سازی جریان سیال و انتقال حرارت و لزوم گسترش این روش و با توجه به محدود بودن مطالعات انجام گرفته در زمینهٔ محیط متخلخل، این رساله با توجه به موارد زیر دارای نوآوری می باشد:

بررسی ساختار محیط متخلخل (در مقیاس حفره، به صورت چیدمان پریودیک و تصادفی) در
 سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی و اثرات آن بر انتقال حرارت.

- بررسی اثر نسبت تخلخل ماده متخلخل موضعی بر جریان سیال و انتقال حرارت در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی (با روش شبکهٔ بولتزمن).
 - 🗸 🔹 مدلسازی محیط متخلخل در مقیاس حفره در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی.

۱-۳- موارد کاربردی این رساله

از جمله موارد مهمی که در تعریف یک رساله نقش مهم و بسزایی دارد، موارد کاربرد آن است. با توجه به ساختار منحصر به فرد محیط متخلخل، انتظار می رود که از نتایج این رساله در زمینه های زیر استفاده گردد.

بررسی جریان خون درون شریان های پیچیده مویرگی
 بررسی جریان سیال در اتساع عروقی دارای استنت های^۲ متخلخل
 بررسی مبدلهای حرارتی فشرده

¹ Porosity

² Stents

۱-۴- روش انجام این رساله

به منظور انجام این رساله و رسیدن به نتایج مطلوب مراحل زیر به ترتیب دنبال شده است:

 مرور کامل بر مقالات منتشر شده در زمینه مواد متخلخل، روش شبکهٔ بولتزمن و سیالات غیرنیوتنی

۲. شبیه سازی دو بعدی محیط متخلخل بین دو صفحه موازی (با ساختار داخلی مختلف)

۳. استفاده از روش شبکه بولتزمن برای حل جریان سیال و انتقال حرارت در سیال نیوتنی و غیر نیوتنی (در حضور ماده متخلخل)

۴. معتبر سازی نتایج بند ۳

۵. ترکیب روش شبکه بولتزمن و مدل سیال غیرنیوتنی برای حل جریان سیال و انتقال حرارت
 در ماده متخلخل موضعی

- ۶. معتبر سازی نتایج بند ۵
- ۷. آنالیز نتایج، بحث در نتایج و مقایسه بند های ۳ و ۵
 - ۸. چاپ مقاله در مجلات و کنفرانس های معتبر
 - ۳. تدوین و گردآوری رساله

فصل دوم

روش شبكهٔ بولتزمن

۲-۱- روش شبكهٔ بولتزمن

لودویگ بولتزمن^۱ (شکل (۲–۱)) در سال ۱۸۴۴ در اطریش به دنیا آمد. وی در سال ۱۹۰۶ با تحمل مشکلات فراوان به دلیل عدم پذیرش ایده هایش دست به خودکشی زد، اما مدتی پس از مرگش اندیشه های او در مورد گازها و تئوری اتمی ماده به طور وسیعی توسط جامعهٔ علمی مورد پذیرش قرار گرفت. ایدهٔ اصلی کار بولتزمن این بود که گاز از ذراتی تشکیل شده که بر یکدیگر برهمکنش دارند و می توان رفتار آنها را در غالب مکانیک کلاسیک بیان نمود، و از آنجا که تعداد این ذرات زیاد است، یک عملیات آماری ضروری و مناسب خواهد بود. علم مکانیک، فقط با تفکرات جاری شدن در فضا و برهم کنش های برخورد شبه بیلیاردی، می تواند به شدت ساده و خلاصه شود.



شكل (۲-۱) لودويگ بولتزمن [5]

در روش شبکهٔ بولتزمن، یک ذره که در مدل شبکهٔ گاز با عدد بولین نمایش داده می شود، توسط تابع توزیع تک ذره ای که عددی حقیقی است، جایگزین شده است[44-44].

¹ Ludwig Boltzmann

۲-۱-۱- معادلهٔ روش شبکهٔ بولتزمن

اساس کار معادله شبکهٔ بولتزمن اولیه که برای رفع مشکل اغتشاش آماری در روش شبکهٔ گاز ایجاد شد، میانگین گیری از اعداد اقامت بولین است:

$$f_i = < n_i >$$
 (۱-۲)
که علامت براکت، میانگین گیری مجموع را نشان می دهد. در واقع به جای دنبال کردن یک ذرهٔ
منفرد بولین، با تارخچهٔ زمانی یک جمعیت گروهی سر و کار داریم که احتمال حضور آنها به صورت
یک ابر میکروسکوپی مطابق شکل (۲-۲) قابل تجسم است [5]. می توان عدد اقامت بولین را به دو
بخش متوسط و نوسانی تفکیک کرد:
 $n_i = f_i + g_i$ (۲-۲)
که طبق تعریف، متوسط نوسانات g_i صفر خواهد بود.
با استفاده از این رابطه در معادلات بولین در نهایت معادلهٔ اولیهٔ شبکهٔ بولتزمن به صورت زیر به دست
می آید [4]:

$$\Delta f_i = c'(f_1, \dots, f_b) \tag{(Y-Y)}$$

که در آن b بیانگر تعداد سرعت های گسسته شبکه، f_i ها چگالی احتمال حضور ذره در مسیر iام و c'



شکل (۲-۲) نمایش ابر میکروسکوپی تابع توزیع ذره [5]

در روش شبکهٔ بولتزمن، تجدید آرایش ذرات طی مراحل برخورد و جاری شدن رخ داده و توابع توزیع جدید محاسبه می گردد. شکل کلی نمایش این شبکه ها به صورت $D_m Q_n$ است که m بیانگر بعد و $D_2 Q_9, D_1 Q_5, D_1 Q_3$ است که m بیانگر بعد و n بیان کنندهٔ سرعت های مدل است و به عنوان نمونه می توان به شبکه های $D_3 Q_1, D_1 Q_5, D_1 Q_5$ اشاره نمود که در شکل اشاره نمود. در حالت سه بعدی نیز می توان به شبکه های $D_3 Q_{19}, D_3 Q_{15}$ اشاره نمود که در شکل است (۳-۲) نشان داده شده است. فی از می توان به شبکه مای دو بعدی، شبکه مراحل است و به عنوان نمونه می توان به شبکه های در حالت مود که در شکل است (۳-۲) نشان داده شده است. غالباً در روش شبکهٔ بولتزمن در حالت های دو بعدی، شبکهٔ و $D_2 Q_9$ مورد استفاده قرار می گیرد که در شکل (۲-۴) مشاهده می گردد.



شکل (۲-۳) شکل سمت راست شبکهٔ D3Q15 و شکل سمت چپ شبکهٔ D3Q19 را نشان می دهد [4]

این شبکه برای نخستین بار توسط کیان و همکاران^۱ [45] معرفی گردید. ملاحظه می شود که در شبکه، هر گره می تواند از هشت مسیر مختلف با گره های مجاورش ارتباط برقرار نماید. احتمال حضور ذره در مرکز هر گره با f_0 نشان داده شده است. در این مدل، سرعت ذراتی که در مسیرهای عمودی و افقی حرکت می کنند برابر با $\delta t = \delta t / \delta t$ و سرعت ذراتی که در مسیرهای قطری در حرکتند برابر با $\sqrt{2}c$ در نظر گرفته می شود که $\delta t + \delta t$ به ترتیب گام مکانی و گام زمانی شبکه هستند. ذره مقیم در مرکز هر گره، ساکن و سرعت صفر دارد.

¹ Qian et. al



شكل (۲-۲) شبكة D2Q9 [5]

۲-۱-۲ روند تکاملی روش شبکهٔ بولتزمن

روند تكاملي روش شبكهٔ بولتزمن را به طور خلاصه مي توان به صورت زير بيان نمود:

- ۱. ایدهٔ اولیه توسط فریش-هاسلاچر و پومئو در سال ۱۹۸۶ بیان گردیدد.
- ۲. این ایده توسط مک نامارا و زانتی در سال ۱۹۸۸ توسعه یافت. محرک اصلی انتقال از ماشین سلولی شبکهٔ گاز به روش شبکهٔ بولتزمن رهایی از اغتشاش آن بود.
 - ۳. خطی سازی اپراتور تصادم توسط هیگورا و جیمز در سال ۱۹۸۹ انجام گرفت.
 - ۴. از بولتزمن به جای تابع توزیع اولیه استفاده شد.
- ۵. اپراتور تصادم که اساس تصادم ماشین سلولی شبکهٔ گاز بود، با تقریب بتنگار گراس کراک توسط کولمن^۱ در سال ۱۹۹۱، کوئین و همکاران^۲ در سال ۱۹۹۲ و همچنین چن^۳ در سال ۱۹۹۲ جایگزین شد.
- ۶. برخی از مشکلات روش زمان آسودگی منفرد همچون اعمال معادلات انتقال جرم، مومنتم و انرژی در گام های یکسان منجر به توسعه ماتریس تصادم اصلی گردیده و در نهایت استفاده از روش زمان آسودگی چندگانه را با دقت و پایداری بیشتر، توسط هیگورا و جیمز، توسعه داد.

¹ Koelman

² Qian et. al.

³ Chen

T-۲- مدل BGK

معمولاً برای آسان کردن حل های معادلهٔ بولتزمن، اپراتور برخورد در معادلهٔ بولتزمن با عباراتی ساده جایگزین می گردد که مشکلات ریاضی آن را بدون از بین بردن مبانی فیزیکی، حل می نماید. این دسته از معادلات ساده شدهٔ بولتزمن با اپراتور تصادم BGK، بتنگار-گراس-کراک^۱، به صورت زیر بیان می گردد:

$$C'_{BGK}(f) = -\frac{f - f^{eq}}{\tau_v}$$
(f-Y)

که f^{eq} تابع توزیع تعادل بوده و در حالی که τ_v مقیاس زمانی رایج بوده و با آسودگی از برخورد تا تعادل موضعی تداعی می گردد. بدون اشاره به جزئیات ریاضی مرجع [6]،معادلهٔ بولتزمن با تقریب BGK، با گسسته سازی زمان به شکل زیر خواهد بود:

$$f(\vec{x} + \vec{e} \,\delta t, t + \delta t) - f(\vec{x}, t) = -\frac{1}{\tau_v} [f(\vec{x}, t) - f^{eq}(\vec{x}, t)] \tag{\Delta-Y}$$

قبل از تعیین تابع توزیع تعادلی باید متغیرها محاسبه گردند و محاسبهٔ آنها یکی از مهمترین مراحل گسسته سازی معادلهٔ بولتزمن خواهد بود. در معادلهٔ بالا، δt گام زمانی و τ_v ویسکوزیته مبنی بر زمان آرامش^۲ می باشد که به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\tau_v = 3v \frac{\delta t}{\delta x^2} + 0.5 \tag{(7-1)}$$

که ۷ ویسکوزیته سینماتیک سیال و بر حسب عدد رینولدز معلوم به صورت زیر به دست می آید:

$$v = \frac{U^{2-n} \cdot D_h^{\ n}}{Re} \tag{Y-Y}$$

¹ Lattice Bhatnagar-Gross-Krook

² Relaxation Time

در رابطهٔ بالا U سرعت ورودی، D_h قطر هیدرولیکی و برابر 2H برای جریان بین دو صفحهٔ موازی با فاصلهٔ H از یکدیگر، Re عدد رینولدز جریان و n ضریب توانی می باشد. به منظور محاسبهٔ مقادیر ماکروسکوپی از روابط زیر استفاده می شود:

$$\rho = \sum_{i=1}^{b} f_{i} \tag{A-Y}$$

$$\rho \vec{u} = \sum_{i=1}^{b} \vec{e}_i f_i \tag{9-1}$$

$$\rho \varepsilon = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{b} (e_i)^2 f_i \tag{1.-1}$$

که f_i مقدار تابع توزیع در جهت \vec{e}_i بوده، ٤ انرژی داخلی جریان و b+1 تعداد مسیرهای شبکه در f_i مقدار تابع توزیع تعادلی در شبکهٔ مربعی نه سرعته، D_2Q_9 ، به صورت زیر است: هر گره است. تابع توزیع تعادلی در شبکهٔ مربعی نه سرعته، D_2Q_9 ، به صورت زیر است: $f_i^{eq} = \rho \omega_i \left[1 + \frac{3(\vec{e}_i.\vec{u})}{c^2} + \frac{9(\vec{e}_i.\vec{u})^2}{2c^4} - \frac{3|\vec{u}|^2}{2c^2} \right]$ (۱۱-۲)

$$\begin{cases} \omega_0 = 4/9 \\ \omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4 = 1/9 \\ \omega_5 = \omega_6 = \omega_7 = \omega_8 = 1/36 \end{cases}$$

 $i = 1,2,3,4$ g $\vec{e}_0 = (0,0)$ g $\vec{e}_0 = (0,0)$ g $c = \delta x / \delta t$

$$\vec{e}_{i} = c\sqrt{2} \left(\cos(\frac{(i-5)\pi}{2} + \frac{\pi}{4}), \sin(\frac{(i-5)\pi}{2} + \frac{\pi}{4}) i = 1, 2, 3, 4 \right) \vec{e}_{i} = c \left(\cos\frac{(i-1)\pi}{2}, \sin\frac{(i-1)\pi}{2} \right)$$
Image: non-state integrable int

که

اندازهٔ سرعت شبکه با توجه به شکل شبکه (طول هر مسیر) و توجه به این نکته که مدت زمان رسیدن به هر گره همسایه در تمام مسیرهای یکسان و برابر گام زمانی شبکه است، تعیین می شود. سرعت صوت مربوط به هر شبکه از رابطهٔ زیر تعیین می شود:

$$c_s^2 = \frac{1}{D} \sum e_i^2 \omega_i \tag{17-7}$$

که
$$D$$
 بیانگر بعد شبکه است. فشار در روش شبکهٔ بولتزمن نیز با استفاده از معادلهٔ حالت گاز کامل به صورت زیر محاسبه می گردد: $P = c_s^2
ho$

جدول (۲-۱) سرعت های شبکه، ضرایب وزنی و سرعت صوت مربوط به شبکه های مورد استفاده در روش شبکهٔ

نوع شبکه	$\left e_{i} \right $ ווגונל שנשד איז ווגונל	ϖ_i ضرایب وزنی	c_s^2 مربع سرعت صوت
D1Q3	•	۴/۶	
	١	۱/۶	1/1
D1Q5	•	۶/۱۲	
	١	۲/۱۲	١
	٢	1/17	
D2Q9		18/88	
	١	۴/۳۶	١/٣
	$\sqrt{2}$	١/٣۶	
D3Q15		18/77	
	١	٨/٧٢	١/٣
	$\sqrt{3}$	1/42	
D3Q19		17/88	
	١	۲/۳۶	١/٣
	$\sqrt{2}$	۱/۳۶	

بولتزمن [4]

۲-۲- معادلة شبكة بولتزمن انتقال حرارت

در سال های اخیر حل معادلهٔ انتقال حرارت با استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن مورد توجه قرار گرفته است. مطابق بخش قبلی می توان معادلهٔ حرارتی شبکهٔ بولتزمن را نیز بیان نماییم. طبق هی و همکاران [46] داریم:

$$g_{i}(x + e_{i}\delta t, t + \delta t) - g_{i}(x, t) = -\frac{1}{\tau_{g}} [g_{i}(x, t) - g_{i}^{eq}(x, t)]$$
(14-7)

که $g_i(x,t)$ و $g_i(x,t)$ به ترتیب تابع توزیع دمای تک ذره و تابع توزیع تعادلی آن می باشد. $\tau_g^{eq}(x,t)$ نیز زمان آرامش انتقال انرژی بوده و به صورت زیر تعریف می گردد:

$$\tau_g = 3 \frac{k}{(\rho c_p)_f c^2 \delta t} + 0.5 \tag{10-T}$$

که k هدایت گرمایی سیال یا جامد، ho و $c_p^{}$ چگالی و گرمای ویژه در فشار ثابت هستند. در رابطهٔ k هدایت گرمایی سیال یا جامد، ho و $g_i^{eq}(x,t)$ میزان $g_i^{eq}(x,t)$ نیز از رابطهٔ زیر به دست می آید [47]:

$$g_i^{eq} = \omega_i T [1 + 3\frac{e_i . u}{c^2}] \qquad i = 0...8$$
 (19-7)

 $T = \sum_{i=0}^{8} g_i$

دمای محلی نیز از رابطهٔ زیر محاسبه می گردد [48]: (۲–۱۷)

۲-۴- الگوريتم کلي روش شبکهٔ بولتزمن

اولین قدم در تحلیل هر جریان، بیان هندسهٔ مسأله، شرایط جریان و انتخاب شبکه مناسب برای جریان مورد نظر است. معمولاً در روش شبکهٔ بولتزمن در حالت دو بعدی از مدل D_2Q_9 استفاده می شود. در شکل (۲–۵) نحوهٔ شماره گذاری سرعت های گسسته در این شبکه نشان داده شده است. مطابق این شکل، ۸ ذره متحرک و یک ذرهٔ ساکن در این مدل وجود دارد. که طبق بخش قبل این سرعت ها در حالت دو بیان می گردد:

$$e_{i} = \begin{cases} (0,0) & (i=0) \\ (\cos[(i-1)\pi/2], \sin[(i-1)\pi/2]).c & (i=1,...,4) \\ \sqrt{2}(\cos[(i-5)\pi/2 + \pi/4], \sin[(i-5)\pi/2 + \pi/4]).c & (i=5,...,8) \end{cases}$$
(1A-Y)



-1,-1 0,-1

1,-1

شکل(۲-۶) مولفه های سرعت در شبکهٔ D2Q9 [5]

با تعیین کمیت های طول مشخصه، سرعت مشخصه، چگالی مشخصه و دمای مشخصه در یک سیستم آحاد متعارف و همچنین در سیستم آحاد شبکه، می توان بین نتایج حاصل از کد و متغیرهای فیزیکی ارتباط برقرار کرد [5]. کمیات اصلی در مدل شبکهٔ بولتزمن به صورت زیر تعریف می شوند:

- ✓ واحد طول^۳، فاصله یک گره تا گره مجاور است و ^u نامیده می شود. ضرایت تبدیل از واحد شبکه به واحدهای متعارف با مقایسه کمیات فوق در دو سیستم آحاد، قابل محاسبه است. اگر کمیات مشخصه را در سیستم آحاد متعارف (به عنوان مثال سیستم متریک) به صورت T,ρ_0,U,H که به ترتیب طول مشخصه، سرعت مشخصه، چگالی مشخصه و دمای مشخصه بوده و در سیستم آحاد شبکه با T_1,ρ_{0l},U_l,H_l مشخص می گردد را نشان دهیم، ضرایب تبدیل به
 - صورت زیر تعیین می گردند:

$$H^{m} = H_{l}^{ll} \Longrightarrow H * 1^{m} = H_{l} * 1^{ll}$$

بنابراين:

$$1^{ll} = (H/H_l) * 1^m$$
 (19-7)

$$U^{m/sec} = U_l^{ll/lt} \Longrightarrow U^*(1^m/1^{sec}) = U_l^*(1^{ll}/1^{lt})$$

با استفاده از رابطهٔ (۲-19) خواهیم داشت:

$$1^{lt} = (U_l H / U H_l)^{*1}^{sec}$$
 (20-۲)
بنابراین باید توجه داشت در صورتی که در سیستم آحاد شبکه، سرعت مشخصه ثابت نگه داشته شود،
آنگاه ریز کردن شبکه و یا به عبارتی کاهش گام مکانی به معنی کوچک شدن گام زمانی نیز خواهد
 $\rho_0^{kg/m^3} = \rho_{0l}^{lm/ll^3} \Rightarrow \rho_0^{*1} + 1^{m} - 1^{m} + 1^{m} + 1^{m}$

با استفاده از رابطهٔ (۲–19) خواهیم داشت:

¹ Lattice Mass

² Lattice Time

³ Lattice Length

$$\begin{split} 1^{lm} = (\rho_0 H^3 / \rho_{0l} H_l^3)^* 1^{kg} \\ \text{كميات فرعى نظير فشار را نيز مى توان به همين ترتيب در دو سيستم آحاد به هم مرتبط نمود: <math display="block">P^* = (\Delta P) / (1/2) \rho_0 U^2 = (\Delta P)_l / (1/2) \rho_{0l} U_l^2 \\ (\Delta P)_l = (\rho_{0l} U_l^2 / \rho_0 U^2) (\Delta P) \end{split}$$

به این ترتیب هر واحد فشار شبکه با واحد فشار در سیستم آحاد متعارف مرتبط می شود. با معلوم بودن عدد رینولدز، طول مشخصه، سرعت مشخصه، دمای مشخصه و عدد پرانتل در سیستم آحاد شبکه، ابتدا لزجت و پس از آن با استفاده (2-۶) و (2-۱۴) زمان آسودگی محاسبه می شود.

قبل از آغاز الگوریتم اصلی، لازم است که با توجه به هندسهٔ مسأله و نوع جریان، نوع هر گره واقع بر شبکه مشخص گردد تا در طی انجام الگوریتم حل، با توجه به داخلی یا مرزی بودن گره، محاسبات مربوط به آن قابل انجام باشد و همچنین با توجه به شرایط اولیهٔ موجود، متغیرهای ماکروسکوپیکی را در شرایط اولیه در سیستم آحاد شبکه تعیین نمود.

در هر گره در هر گام زمانی مراحل زیر بایستی طی شود:

(21 - 7)

✓ توابع توزیع تعادلی g^{eq}, f^{eq} با استفاده از متغیرهای ماکروسکوپیکی مربوط به گره در آن گام زمانی، با استفاده از روابط (2–۱۱) و (۲–۱۵) برای هر مسیر در هر گره محاسبه می شود که با در نظر گرفتن مقدار واحد برای c به صورت رابطهٔ (۲–۲۳) و (۲–۲۴) قابل بیان است.

$$\begin{split} f_{0}^{eq} &= 4\rho \Big[1 - (3/2)(u^{2} + v^{2}) \Big] / 9 \\ f_{1}^{eq} &= \rho \Big[1 + 3u + (9/2)u^{2} - (3/2)(u^{2} + v^{2}) \Big] / 9 \\ f_{2}^{eq} &= \rho \Big[1 + 3v + (9/2)v^{2} - (3/2)(u^{2} + v^{2}) \Big] / 9 \\ f_{3}^{eq} &= \rho \Big[1 - 3u + (9/2)u^{2} - (3/2)(u^{2} + v^{2}) \Big] / 9 \\ f_{4}^{eq} &= \rho \Big[1 - 3v + (9/2)v^{2} - (3/2)(u^{2} + v^{2}) \Big] / 9 \\ f_{5}^{eq} &= \rho \Big[1 + 3(u + v) + (9/2)(u^{2} + v^{2} + 2uv) - (3/2)(u^{2} + v^{2}) \Big] / 36 \\ f_{6}^{eq} &= \rho \Big[1 - 3(u + v) + (9/2)(u^{2} + v^{2} + 2uv) - (3/2)(u^{2} + v^{2}) \Big] / 36 \\ f_{7}^{eq} &= \rho \Big[1 - 3(u + v) + (9/2)(u^{2} + v^{2} + 2uv) - (3/2)(u^{2} + v^{2}) \Big] / 36 \\ f_{8}^{eq} &= \rho \Big[1 + 3(u - v) + (9/2)(u^{2} + v^{2} - 2uv) - (3/2)(u^{2} + v^{2}) \Big] / 36 \end{split}$$

$$g_{0}^{eq} = 4T/9$$

$$f_{1}^{eq} = T[1+3u]/9$$

$$f_{2}^{eq} = T[1+3v]/9$$

$$f_{3}^{eq} = T[1-3u]/9$$

$$f_{4}^{eq} = T[1-3v]/9$$

$$(\Upsilon F-\Upsilon)$$

$$f_{5}^{eq} = T[1+3(u+v)]/36$$

$$f_{7}^{eq} = T[1-3(u+v)]/36$$

$$f_{8}^{eq} = T[1+3(u-v)]/36$$

$$f_{i}(\vec{x} + \vec{e}\delta t, t + \delta t) - f_{i}(\vec{x}, t) = -\frac{1}{\tau_{v}} \Big[f_{i}(\vec{x}, t) - f_{i}^{eq}(\vec{x}, t) \Big]$$
(Ya-Y)

$$g_{i}(x+e_{i}\delta t,t+\delta t) - g_{i}(x,t) = -\frac{1}{\tau_{g}} [g_{i}(x,t) - g_{i}^{eq}(x,t)]$$
(Y9-Y)

$$f_i(\vec{x} + \vec{e}_i \delta t, t + \delta t) = f_i(\vec{x}, t)$$
(YV-Y)

$$g_i(\vec{x} + \vec{e}_i \delta t, t + \delta t) = g_i(\vec{x}, t)$$
(YA-Y)

$$\rho = f_0 + f_1 + f_2 + f_3 + f_4 + f_5 + f_6 + f_7 + f_8$$
(Y9-Y)

$$\rho u = f_1 + f_5 + f_8 - (f_3 + f_6 + f_7) \tag{(\mathcal{T} \cdot - \mathcal{T})}$$

$$\rho v = f_2 + f_5 + f_6 - (f_4 + f_7 + f_8) \tag{(Y1-Y)}$$

 $T = g_0 + g_1 + g_2 + g_3 + g_4 + g_5 + g_6 + g_7 + g_8$ (°Y-Y)

$$\varepsilon' = \frac{1}{n} \sum_{x} \frac{\left| \boldsymbol{u}(x,t) - \boldsymbol{u}(x,t-1) \right|}{\left| \boldsymbol{u}(x,t) \right|} \tag{YT-T}$$

که '٤ یک مقدار کوچک انتخابی است. بعد از طی تکرارهای لازم برای رسیدن به شرط همگرایی، نتایج بدست آمده جهت مقایسه با مطالعات انجام گرفته، بی بعدسازی می شوند. متغیرهای بی بعد به صورت زیر تعریف می شوند:

$$x^{*} = x/L = x_{l}/L_{l}$$

$$y^{*} = y/H = y_{l}/H_{l}$$

$$u^{*} = u/U = u_{l}/U_{l}$$

$$v^{*} = v/U = v_{l}/U_{l}$$

$$P^{*} = (\Delta P)/(1/2)\rho_{0}U^{2} = (\Delta P)_{l}/(1/2)\rho_{0l}U_{l}^{2}$$

$$T^{*} = \frac{T - T_{w}}{T_{b} - T_{w}}$$
(°F-7)

که T_w دمای دیواره و T_b دمای بالک بوده که از فرمول زیر به دست می آید:

$$T_b = \frac{\int_0^H u \, dy}{\int_0^H u \, dy}$$
(٣Δ-٢)

میزان عدد ناسلت جریان در دیوارهٔ نیز از رابطهٔ (۲-۳۶) محاسبه می گردد.

$$Nu = -\frac{D_h \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0}}{T_w - T_b}$$
(٣۶-٢)

فلوچارت حل در حالت نیوتنی در شکل (۲–۷) نشان داده شده است. در سیال نیوتنی مقدار زمان آرامش در هر نقطه شبکه مقداری ثابت در نظر گرفته می شود ولی در سیال غیرنیوتنی زمان آرامش در هر گره با گره مجاور تفاوت دارد.



شکل(۲-۷) فلوچارت حل روش شبکهٔ بولتزمن در حالت نیوتنی

دلیل آن را این گونه می توان بیان نمود که در سیال غیرنیوتنی لزجت، تابع گرادیان سرعت است و چون گرادیان سرعت در هر نقطه کانال متفاوت از سایر نقاط شبکه است، لزجت نیز در هر نقطه متفاوت از نقطه مجاور است. به این ترتیب وقتی لزجت در نقاط مختلف مقادیر متفاوت داشته باشد زمان آرامش نیز در هر گره متفاوت است. در حل عددی لازم است که بعد از راه اندازی اولیه برنامه رایانه ای، در هر تکرار با محاسبه گرادیان سرعت، زمان آرامش جدید محاسبه شود. از این زمان آرامش جدید در گام زمانی بعد استفاده می شود. در گام های زمانی اولیه ممکن است در نقاطی مقدار گرادیان سرعت صفر باشد، همچنین در مدل های غیرنیوتنی امکان اینکه در مرکز کانال، گرادیان سرعت صفر باشد وجود دارد. به همین منظور جهت جلوگیری از تقسیم بر صفر، مقدار بسیار کوچک اپسیلون را به گرادیان سرعت در نقاطی که صفر می شود، اضافه می کنیم. فلوچارت حل در حالت توانی نیز در شکل (۲-۸) نشان داده شده است.



در حالت سیال توانی، معادلهٔ ساختاری را به صورت زیر در نظر می گیریم [49]:

$$v = v_0(\dot{\gamma})^{n-1}$$
 (۳۷-۲)
که v ویسکوزیته سینماتیک، v شاخص پایداری است $\dot{\gamma}$ اندازهٔ نرخ برش محلی بوده که با
اینوریانت دوم تانسور نرخ کرنش $v_0 \kappa_{\alpha'\beta'}$ به صورت زیر مرتبط است [50].
 $\dot{\gamma} = 2\sqrt{S_{\alpha'\beta'}S_{\alpha'\beta'}}$ (۳۸-۲)
 $S_{\alpha'\beta'} = \frac{\partial u_{\alpha'}}{\partial x_{\beta'}} + \frac{\partial u_{\beta'}}{\partial x_{\alpha'}}$

۲-۵- شرایط مرزی

اهمیت شرایط مرزی به علت وظیفه انتخاب جوابی صحیح سازگار با قیود خارجی است. روش شبکهٔ بولتزمن، انعطاف پذیری زیادی در به کارگیری شرایط مرزی دارد. مهمترین خصوصیت هر یک از مدل های اعمال شرایط مرزی در روش شبکهٔ بولتزمن، توانایی گنجاندن شرایط مرزی پیچیده است به گونه ای که امکان شبیه سازی جریان های با هندسه های پیچیده مانند جریان در محیط های متخلخل را فراهم می کند[5]. در این روش همواره باید توابع توزیع به سمت داخل محدوده حل مشخص می شوند.

۲-۵-۱ شرط مرزی عدم لغزش

شرط مرزی عدم لغزش نقش مهمی در شبیه سازی جریان ها به ویژه جریان های با هندسهٔ پیچیده دارد. با توجه به موقعیت قرارگیری دیوار (مرز با عدم لغزش) نسبت به گره های شبکه، طرح های متفاوتی در بکارگیری این شرط وجود دارد. معمولاً زمانی که دیوار روی گره های شبکه قرار گیرد، از

¹ No-Slip Boundary Condition

طرح بازگشت به عقب کامل^۱ و زمانی که دیوار بین گره ها قرار گیرد، از طرح بازگشت به عقب میانی^۲ استفاده می شود [9]. بر اساس طرح بازگشت به عقب کامل مطابق شکل (۲–۹)، تابع توزیع ذره که از گره سیال در امتداد لینک شبکه جریان می یابد بعد از برخورد با گره دیوار در همان امتداد در جهت مخالف باز می گردد. یعنی تمام توابع توزیع روی گره دیوار معکوس می شوند.



شکل(۲-۹) شرط مرزی بازگشت به عقب کامل [4]

برای گره های واقع بر مرز به جای اعمال رابطهٔ معمول برخورد، شرط بازگشت به عقب کامل اعمال می شود. می توان این طرح را به شکل ماتریسی بیان نمود [4]. به عنوان مثال در مرز شمالی یک هندسه، مطابق شکل (۲-۱۰)، که (x,y) موقعیت گره روی مرز را نشان میدهد، می توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} f_7(x, y) \\ f_4(x, y) \\ f_8(x, y) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} f_5(x, y) \\ f_2(x, y) \\ f_6(x, y) \end{bmatrix}$$
($\mathbf{f} \cdot -\mathbf{f}$)



شکل(۲-۱۰) توابع توزیع مجهول در مرز شمالی هندسه با دایره مشخص شده اند [5]

این انعکاس کامل، صفر شدن هر دو مولفهٔ عمودی و مماسی سرعت را در مرز تضمین می کند، یعنی: $\rho u = (f_1 + f_5 + f_8) - (f_6 + f_3 + f_7) = (f_1 - f_3) = 0$ (۴۱-۲)

¹ Complete Bounce Back Scheme

² Half Way Bounce Back Scheme

$$\rho v = (f_5 + f_6 + f_2) - (f_4 + f_7 + f_8) = 0 \tag{(FT-T)}$$

که تساوی اول با در نظر گرفتن شرایط اولیه $f_1 = f_3$ حاصل می شود. این شرط اولیه در طول گام های زمانی بعد تحت تأثیر قرار نگرفته و همواره برقرار خواهد بود. تساوی دوم نیز با توجه به انعکاس کامل توابع توزیع تضمین می شود. این طرح به دلیل استقلال از سرعت های گسسته \bar{f} و سادگی بیان آن، در هندسه های پیچیده به راحتی قابل کاربرد بوده که از جمله مزایای مهم روش شبکهٔ بولتزمن می باشد. این طرح ساده حتی در جریان های با اعداد رینولدز بالا نیز کاملاً پایدار است. در مرجع [51] روابطی برای تعیین مرتبهٔ کلی دقت با توجه به درجه ریز بودن شبکه ارائه شده است. در طرح بازگشت به عقب میانی با در نظر گرفتن یک دیوار موثر در موقعیت میانی بین گرهٔ سیال و مرز، توابع توزیع جاری شده از سیال به سمت دیوار، مطابق شکل (۲–۱۱)، درون دیوار ذخیره شده و در مرحلهٔ زمانی بعد به سیال بازگردانده می شود [5]. از لحاظ ریاضی می توان این طرح را به عنوان در مرحلهٔ زمانی بعد به سیال بازگردانده می شود [5]. از لحاظ ریاضی می توان این طرح را به عنوان در مرحلهٔ زمانی مرز جنوبی به صورت زیر نشان داد که (x, y) بیانگر موقعیت گرهٔ جامد درون مرز است [5]:

$$\begin{bmatrix} f_2(x,y) \\ f_5(x,y) \\ f_6(x,y) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} f_4(x,y+1) \\ f_7(x+1,y+1) \\ f_8(x-1,y+1) \end{bmatrix}$$
(4°7-7)

نوبل و همکارانش^۱ [52] روشی برای محاسبهٔ چگالی (فشار) و توزیع ذرات مجهول در مرز بیان کردند که طرح پیشنهادی آنها در گسترهٔ وسیعی از زمان های آسودگی به خوبی عمل می کرد. اینامورا و همکارانش^۲ [53] نیز روشی برای بیان شرط عدم لغزش ارائه دادند. آنها برای شرح روش خود از شبکهٔ D_2Q_9 استفاده کرده و ادعا کردند که می توان آن را به راحتی در مدل های دیگر نیز به کار برد. همچنین زو و هی^۳ [54] روشی ارائه نمودند که با در نظر گرفتن مقدار صفر برای مولفه های سرعت، قابلیت کاربرد در شرط عدم لغزش را دارد. طرح دیگری که می تواند برای بیان شرط مرزی

¹ Noble et. al.

² Inamuro et. al.

³ Zou & He

عدم لغزش به کار گرفته شود، طرح برونیاب است. این طرح بر این اساس بنا شد که روش شبکهٔ بولتزمن به عنوان یک طرح اختلاف محدود خاص در نظر گرفته شود.



شکل(۲-۱۱) مراحل طرح بازگشت به عقب میانی [5]

$$f_i^{-1} = 2f_i^0 - f_i^1$$
 (44-7)

که $f_i^{1}, f_i^{0}, f_i^{-1}$ به ترتیب توابع توزیع روی لایهٔ خارجی، دیوار و اولین لایهٔ داخل سیال است. بعد از این برونیابی، مرحلهٔ جاری شدن برای تمام گره ها از جمله لایهٔ اضافی خارجی انجام می شود. با توجه به مرتبهٔ دوم بودن رابطهٔ برونیابی و در نظر گرفتن این موضوع که کمیات ماکروسکوپیکی همچون چگالی و سرعت از جمع وزنی توابع توزیع به دست می آیند، می توان به وضوح مشاهده کرد که کمیات ماکروسکوپیکی دقت عددی مشابهی با تابع توزیع دارند.

هر چند طرح بازگشت به عقب با دیوار میانی هم از دقت با مرتبهٔ دوم است اما طرح برونیاب به علت قابلیت استفاده برای شرایط مرزی متنوع و دلخواه بودن موقعیت قرارگیری مرزها، کلی تر است. باید توجه داشت که برای مرزهای پیچیده، تنظیم کردن محل میانی سلول می تواند دردسرساز باشد[55]. از جمله عیوب این طرح می توان به پایداری کمتر آن نسبت به طرح بازگشت به عقب و دقت کمتر در سطوح خمیده اشاره نمود [51].



شکل(۲-۱۲) لایه های مربوط به طرح برونیاب [55]

شبیه سازی دیوار خمیده در مراجع [۵۶-۵۸] موجود است.

۲-۵-۲ شرایط مرزی فشار و یا سرعت معلوم

به منظور اعمال شرط مرزی که در آن متغیرهای ماکروسکوپی همچون سرعت و یا فشار معلوم است، نوبل و همکارانش [52] یک شبکهٔ FHP را در نظر گرفتند. آنها گره های همسایهٔ هر گرهٔ مرزی را مطابق شکل (۲–۱۳) به سه دستهٔ گره های همسایهٔ واقع در سیال، گره های همسایهٔ واقع بر مرز و گره های همسایهٔ واقع در دیوار یا خارج از حوزه تقسیم نمودند.

نوبل و همکارانش با توجه به این نکته که در مرحلهٔ جاری شدن، توزیع ذرات جاری شونده از گرهٔ همسایه واقع در دیوار، نامعلوم بوده ولی سرعت در مرز مشخص است، با استفاده از روابط مربوط به متغیرهای ماکروسکوپی روش شبکهٔ بولتزمن، سه معادله نوشته و مجهول سوم را چگالی مرز قرار دادند و به این ترتیب با حل دستگاه سه معادله و سه مجهول، توزیع ذرات نامعلوم و چگالی مرز را تعیین نمودند. از آنجایی که چگالی و فشار در روش شبکهٔ بولتزمن با هم مرتبطند، در واقع شرایط مرزی فشار توسط الگوریتم محاسبه می گردد که در شبیه سازی های عملی معمولاً کمیتی نامعلوم

زو و هی [54] عملی مشابه همین روش را برای شبکهٔ D_2Q_9 اجرا نمودند. آنها ابتدا با فرض یک رو و هی [54] ملی مشابه همین روش را برای شبکهٔ D_2Q_9 اجرا نمودند. آنها ابتدا با فرض یک بردار سرعت معلوم $\begin{bmatrix} u_0\\v_0 \end{bmatrix}$ ، بعد از مرحله جاری شدن، سه توزیع ذره مجهول متمایل به سمت

میدان حل را به گونه ای تعیین نمودند که سرعت معینی در گرهٔ شبکه مربوط به آنها حفظ شود.



شکل(۲-۱۳) گره های همسایهٔ یک گره مرزی [52]

مطابق شکل (۲–۱۰) که مجهولات را بعد از مرحلهٔ جاری شدن در یک گرهٔ مرزی شمالی نشان می دهد، مقادیر $f_i; i = 0,1,2,3,5,6$ به علت جاری شدن از گره های همسایه معلوم بوده و به منظور

محاسبهٔ چهار مجهول
$$ho,f_8,f_7,f_4$$
 از معادلات چگالی ماکروسکوپی، سرعت ذره در دو جهت x, y و
همچنین آخرین معادله با فرض وجود شرط عدم لغزش در راستای عمود بر مرز نوشته می شود. به
این ترتیب خواهیم داشت:

$$\rho = \sum_{i} f_{i} = f_{0} + f_{1} + f_{2} + f_{3} + f_{4} + f_{5} + f_{6} + f_{7} + f_{8}$$
 (iii) -۴۵-۲)

$$\rho u_0 = f_1 - f_3 + f_5 - f_6 - f_7 + f_8 \tag{(--4)}$$

$$\rho v_0 = f_2 - f_4 + f_5 + f_6 - f_7 + f_8 \tag{2-4}$$

$$f_2 - f_2^{eq} = f_4 - f_4^{eq}$$
 (3 - 4)

در معادلهٔ (۲–۴۵–الف) مقادیر توابع توزیع مجهول را به یک طرف می بریم و خواهیم داشت:

$$f_4 + f_7 + f_8 = \rho - f_0 - f_1 - f_2 - f_3 - f_5 - f_6 \tag{2-4}$$

همین روند را برای معادلهٔ (۲–۴۵-ج) انجام می دهیم:

$$f_4 + f_7 + f_8 = f_2 + f_5 + f_6 - \rho v_0 \tag{2-4}$$

$$\rho - f_0 - f_1 - f_2 - f_3 - f_5 - f_6 = f_2 + f_5 + f_6 - \rho v_0 \tag{(3-4)}$$

با حل رابطهٔ بالا برای چگالی داریم:

$$\rho = \frac{f_0 + f_1 + f_3 + 2(f_2 + f_5 + f_6)}{1 + v_0}$$
(j-40-7)

با در نظرگرفتن معادلهٔ (۵–۱۱) برای مقادیر f_2^{eq} و f_4^{eq} و تفاضل مقادیر به دست آمده از یکدیگر خواهیم داشت:

$$\begin{split} f_4^{eq} - f_2^{eq} &= \\ \left(\frac{1}{9}\rho + \frac{1}{3}\rho(-1.v_0) + \frac{1}{2}\rho v_0^2 - \frac{1}{6}\rho(u_0^2 + v_0^2)\right) & (\psi - \psi - \psi - \psi) \\ - \left(\frac{1}{9}\rho + \frac{1}{3}\rho(1.v_0) + \frac{1}{2}\rho v_0^2 - \frac{1}{6}\rho(u_0^2 + v_0^2)\right) = -\frac{2}{3}\rho v_0 \\ & \text{if } d = -\frac{2}{3}\rho v_0 \\ & \text{if } d = -\frac{2}{3}\rho v_0 \\ & \text{if } d = -\frac{2}{3}\rho v_0 \end{split}$$

$$f_4 = f_2 - f_2^{eq} + f_4^{eq} = f_2 - \frac{2}{3}\rho v_0$$
 (۲۵–۲۰) (۲۵–۴۵) (۲۵–۲۰) را بر حسب از رابطه (۲–۴۵–۰) مقدار f_8 را یافته و همراه با معادلهٔ (۲–۴۵–ش)، رابطهٔ (۲–۴۵–ج) را بر حسب

: بازنویسی می کنیم
$$f_7$$

$$\rho v_0 = f_2 - \left(\underbrace{f_2 - \frac{2}{3}\rho v_0}_{f_4}\right) + f_5 + f_6 - f_7 - \left(\underbrace{\rho u_0 - f_1 + f_3 - f_5 + f_6 + f_7}_{f_8}\right) \quad (-\$\Delta-\$)$$

$$f_7 = f_5 + \frac{1}{2}(f_1 - f_3) - \frac{1}{6}\rho v_0 - \rho u_0$$
 (ϕ -۴۵-۲)

جهت محاسبهٔ آخرین مجهول مسأله نیز از رابطه (۲–۴۵–ب) مقدار f_7 را یافته و همراه با معادلهٔ (۲–۴۵–ش)، رابطهٔ (۲–۴۵–ج) را بر حسب f_8 بازنویسی می کنیم :

$$\rho v_0 = f_2 - \left(\underbrace{f_2 - \frac{2}{3}\rho v_0}_{f_4}\right) + f_5 + f_6 - \left(\underbrace{-\rho u_0 + f_1 - f_3 + f_5 - f_6 + f_8}_{f_7}\right) - f_8 \quad (1 - 4) - 4 - 4$$

$$f_8 = f_6 - \frac{1}{2}(f_1 - f_3) - \frac{1}{6}\rho v_0 + \rho u_0$$
 (4-7)

قابل ذکر است که جهت اعمال شرط مرزی سرعت و یا فشار ثابت می توان از طرح برونیاب نیز استفاده نمود [55].

۲-۵-۳-شرط مرزی خروجی

به منظور محاسبهٔ این شرط می توان از شرط گرادیان صفر استفاده نمود که در این حالت مقادیر گره های ماقبل آخر در گره های آخر قرار می گیرند اما متأسفانه این روش همواره درست نبوده و به خصوص در حالتی که مرز به اندازه کافی در دوردست قرار نگرفته است و پروفیل به حالت توسعه یافتگی (گرادیان صفر) نمی رسد، باعث واگرایی جواب می گردد.

۲-۵- ۴-شرط مرزی دما ثابت

در دیواره هایی با دمای ثابت و همچنین ورودی هایی با دمای مشخص طبق روش محمد [47] عمل می شود.

 T_{in} بدین منظور به عنوان مثال در ورودی جریان توابع توزیع مجهول با معلوم بودن دمای ورودی مطابق زیر به دست می آیند:

- $g_5 = T_{in}(\omega_5 + \omega_7) g_7 \tag{(FP-T)}$
- $g_1 = T_{in}(\omega_1 + \omega_3) g_3 \tag{(Y-Y)}$
- $g_8 = T_{in}(\omega_8 + \omega_6) g_6 \tag{(FA-T)}$

۲-۵- ۵-شرط مرزی دمای خروجی

معمولا جهت اعمال شرط مرزی در خروجی از شرط گرادیان دمای صفر استفاده می شود. اگر مرز خروجی را در محل N_x در نظر بگیریم، شرط گرادیان دمای صفر به صورت زیر اعمال می شود [47]:

$$g_n^{Nx} = g_n^{Nx-1}, n = 3,6,7$$
 (49-7)

۲-۵- ۶-شرط مرزی آدیاباتیک

با فرض اینکه دیوارهٔ شکل (۲-۶) آدیاباتیک باشد، تابع توزیع دما بر روی دیواره در جهات ۴، ۷ و ۸ مجهول خواهد بود که به صورت زیر به دست می آید:

$$\begin{bmatrix} f_7(x,y) \\ f_4(x,y) \\ f_8(x,y) \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} f_7(x,y-1) \\ f_4(x,y-1) \\ f_8(x,y-1) \end{bmatrix}$$
($\Delta \cdot -\Upsilon$)

فصل سوم

بررسى نتايج هيدروديناميك

۳–۱– مقدمه

در این فصل نتایج بدست آمده با استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن ارائه شده است. توجه شود که نتایج این قسمت محدود به نتایج هیدرودینامیک بوده و نتایج انتقال گرما در فصل بعدی بررسی می شود. بدین ترتیب ابتدا نتایج جریان بین دو صفحه موازی برای کانال فاقد مانع و کانال حاوی تک مانع معتبر سازی شده و سپس محیط متخلخل داخل کانال با نصب موانع داخلی با حالت ها و آرایش های مختلف شبیه سازی گردیده است.

۲-۳- جریان بین دو صفحهٔ موازی بینهایت

جریان بین دو صفحهٔ موازی بینهایت ساکن مطابق شکل (۳–۱)، علاوه بر حل های تحلیلی با روش های مختلف شبیه سازی شده است. بدین منظور از یک پروفیل ثابت سرعت در ورودی استفاده گردیده است. بررسی نتایج موجود در منابع مختلف با نتایج به دست آمده بیانگر دقت روش شبکهٔ بولتزمن است.





شکل(۳-۱) شماتیک جریان بین دو صفحهٔ موازی

۳-۲-۱ هندسه و شرایط مرزی

دامنهٔ محاسباتی دو بعدی در جریان سیال تراکم ناپذیر بین دو صفحه موازی، مطابق شکل (۳–۱) تعریف شد. در شکل نشان داده شده، L طول و H فاصله بین صفحات می باشد. در ورودی میدان جریان با فرض سرعت یکنواخت 0.00 = 0 و 0 = 0.0، از مدل زو و هی [54] استفاده گردیده است. در خروجی نیز با میان یابی از تابع توزیع داخل برای مقادیر مجهول، از طرح برونیاب [61] استفاده گردیده است. شده و برای دیواره های بالا و پایین با فرض عدم لغزش سرعت، از طرح بازگشت به عقب [9] استفاده گردیده است.

در شبیه سازی انجام شده، از ضخامت صفحات صرفنظر شده و به منظور رسیدن به حالت توسعه یافتگی سرعت، طول صفحات به اندازهٔ کافی طویل در نظر گرفته شده است. جهت حل مسأله، دامنهٔ محاسباتی شبکه بندی گردیده است. شبکه سازی شامل مراحل تعریف نواحی ورودی و خروجی و دیواره ها و ایجاد شمارهٔ گره ها می باشد. شبکهٔ تولید شده در شکل (۳–۲) نشان داده شده است. مطابق این شکل، n,m به ترتیب تعداد گره ها در راستای i, j و $\delta x, \delta y$ طول شبکه در راستاهای مذکور می باشد که در شبیه سازی انجام گرفته $1 = y\delta = \delta x$ بوده و اندازهٔ شبکهٔ نهایی برابر با 300 n = 103



شكل(۳-۲) طرح كلى شبكة توليد شده.

قابل ذکر است که در کلیهٔ مطالعات انجام گرفته در این رساله از رایانه زیر استفاده گردیده است: برد اصلی: یردازنده:
ATi Radeon HD 5450 4GB

حافظه:

گرافیک:

۳-۲-۲ نتایج بدست آمده

در جریان بین دو صفحه موازی، نسبت سرعت در مقطع y به سرعت ورودی سیال، با رابطهٔ تحلیلی (۱-۳) بیان می شود [62]:

$$\frac{u(y)}{u_0} = \frac{2n+1}{n+1} \left[1 - \left(\frac{2|(H/2) - y + 1|}{H} \right)^{(1+1/n)} \right]$$
(1-\mathbf{T})

مقایسهٔ بین نمودار سرعت بی بعد روش شبکهٔ بولتزمن با نتایج تحلیلی در ناحیه توسعه یافته دامنهٔ محاسباتی در ضرایب توانی مختلف در شکل (۳-۳) برای Re=100 نشان داده شده است. مطابق شکل، نتایج بدست آمده از روش شبکهٔ بولتزمن کاملاً منطبق با حل تحلیلی می باشد.



شکل(۳-۳) مقایسه بین نمودار سرعت بی بعد روش شبکهٔ بولتزمن با نتایج تحلیلی در ناحیه توسعه یافته دامنهٔ

محاسباتى.

همچنین نتایج بدست آمده، با نتایج شبیه سازی شده توسط نرم افزار کمسول 4.2^۰ که مبتنی بر روش المان محدود است نیز برای ضرایب توانی مختلف بررسی شد که تطابق بسیار بالای سرعت بی بعد عرضی در ناحیه توسعه یافته دامنهٔ محاسباتی در شکل (۳–۴) نشان داده شده است.



شکل(۳-۴) مقایسه بین نمودار سرعت بیبعد روش شبکهٔ بولتزمن با نتایج تحلیلی و نرم افزار کمسول در ناحیه توسعه یافته دامنهٔ محاسباتی.

به منظور بررسی بیشتر اعتبار حل عددی، روش شبکهٔ بولتزمن با شرایط 0.01 و $u_0 = 0.01$ و $e_0 = 0.0$ و $\rho = 10$ و Re = 10، مرتبط با مطالعات انجام گرفته توسط تانگ و همکاران [64]، سنجیده شده و نتایج بدست آمده با نمودار های بی بعد سرعت در مقاطع مختلف دامنهٔ محاسباتی در حالت نیوتنی مقایسه گردیده است. نتایج در شکل (۳–۵) نشان داده شده است. مطابق این شکلها، نتایج اختلاف بسیار اندکی با یکدیگر داشته و صحت روش شبکهٔ بولتزمن را بیان می نماید. در شکل (۳–۶) بردارهای اندکی با یکدیگر داشته و محت روش شبکهٔ بولتزمن را بیان می نماید. در شکل (۳–۶) بردارهای اندکی با یکدیگر داشته و صحت روش شبکهٔ بولتزمن را بیان می نماید. در شکل (۳–۶) بردارهای شرعت در مقاطع مختلف دامنهٔ محاسباتی در حالت نیوتنی مقایسه گردیده است. نتایج در شکل (۳–۵) نشان داده شده است. مطابق این شکلها، نتایج اختلاف بسیار اندکی با یکدیگر داشته و صحت روش شبکهٔ بولتزمن را بیان می نماید. در شکل (۳–۶) بردارهای سرعت در ورودی کانال در 100R

¹ COMSOL Multiphysics 4.2



شكل(٣-٥) مقايسه بين نمودار سرعت بيبعد تانگ [64] با نتايج بدست آمده از روش شبكهٔ بولتزمن.



شکل(۳-۶) بردارهای سرعت داخل کانال در Re=100 و ضرایب توانی مختلف.

خطوط هم تراز موضعی سرعت در جهات X و Y داخل کانال نیز در شکل ها (۳–۷) و (۳–۸) در Re=100 در ضرایب توانی مختلف نشان داده شده است. مطابق شکل (۳–۷)، حرکت سیال داخل کانال به خوبی شبیه سازی گردیده است. همچنین مطابق شکل (۳–۸) اندازه سرعت در جهت Y دارای مرتبهٔ بسیار کوچکی است.



شکل(۲-۳) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در Re=100 و ضرایب توانی مختلف.

نمودارهای سرعت بی بعد عرضی در جهت x داخل کانال در مقاطع مختلف به ازای Re=100 و ضرایب توانی مختلف در شکل (۳–۹) آمده است. مطابق این شکل ها، جریان با فاصله گرفتن از مقطع ورودی به شکل سهموی در می آید.



شکل(۸-۳) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت y در Re=100 و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳–۹) نمودارهای سرعت بی بعد عرضی در جهت x داخل کانال در مقاطع مختلف به ازای Re=100 و ضرایب توانی مختلف.

شکل (۳–۱۰) نیز به منظور بررسی نمودارهای سرعت بی بعد عرضی در جهت y در مقاطع مختلف، Re=100 و ضرایب توانی متفاوت ترسیم گردیده است. کاملاً آشکار است که در هر سه ضریب توانی مقدار مؤلفه عمودی سرعت با دور شدن از ورودی کانال کاهش یافته و به تدریج به صفر نزدیک می شود به گونه ای که در ناحیهٔ کاملاً توسعه یافته، مقداری برابر با صفر دارد.



شکل(۳-۱۰) نمودارهای سرعت بی بعد عرضی در جهت y داخل کانال در مقاطع مختلف به ازای Re=100 و ضرایب توانی مختلف.

به منظور بررسی نمودار سرعت خط مرکزی کانال، شکل (۳–۱۱) ترسیم گردید. در این شکل که در Re=100 به ازای ضرایب توانی مختلف ترسیم شده است، نتایج شبیه سازی با نرم افزار کمسول را شامل می شود، مطابق شکل روش شبکهٔ بولتزمن کاملاً منطبق بر نتایج نرم افزار کمسول می باشد. قابل ذکر است که طول توسعه یافتگی نیز از این شکل قابل محاسبه است. جهت محاسبهٔ طول توسعه یافتگی تحقیقات تجربی مختلفی انجام گرفته است که از مهمترین آنها می توان به مطالعات چن [63] اشاره نمود که وی یک رابطهٔ تحلیلی-تجربی به صورت معادلهٔ (۳-۲) در اعداد رینولدز پایین در سیالات نیوتنی ارائه نموده است. به منظور محاسبهٔ این طول، نقطه ای را که در آن سرعت خط مرکزی کانال به ۰٫۹۹ سرعت ماکزیمم می رسد را به عنوان طول توسعه یافتگی تعریف می کنند.

$$\frac{l_H}{D_H} = \frac{0.63}{0.035\,Re+1} + 0.044\,Re\tag{(Y-Y)}$$

این طول در حالت نیوتنی برابر $l_H = 1.40625 D_H$ می باشد در حالی که با استفاده از رابطهٔ (۳–۲) مقدار $l_H = 1.485 D_H$ مقدار $l_H = 1.485 D_H$ به دست می آید و نتیجهٔ بدست آمده با نتیجهٔ عددی که یک رابطهٔ تقریبی است، مقدار ...



شکل(۲–۱۱) نمودارهای سرعت بی بعد طولی در موقعیت y/H=0.5 به ازای Re=100 و ضرایب توانی مختلف.

پارامتر دیگری که به منظور بررسی صحت نتایج مورد بررسی قرار می گیرد، ضریب اصطکاک دارسی'،
$$f$$
، است. این ضریب به صورت زیر بیان می گردد $f = \frac{8\tau_w}{\rho\overline{u}^2}$

که در آن \overline{u} سرعت متوسط و τ_w تنش برشی دیوار است. این ضریب برای جریان بین دو صفحهٔ موازی در ناحیهٔ کاملاً توسعه یافته برابر است با [65]:

$$f = \frac{96}{Re_{D_h}} \tag{F-T}$$

برای جریان بین دو صفحهٔ موازی میزان تنش برشی برحسب گرادیان فشار به صورت زیر بیان می گردد:

$$\tau_w = \left| \frac{dp}{dx} \right| \frac{D_h}{4} \tag{d-7}$$

با تعريف فشار و طول بی بعد $p^* = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho \overline{u}^2}$ و تركيب آنها با رابطهٔ بالا خواهيم داشت: $p^* = \frac{p}{\frac{1}{2}\rho \overline{u}^2}$

$$\tau_{W} = \left| \frac{dp^{*}}{dx^{*}} \right| \frac{1}{8} \rho \overline{u}^{2}$$
(8-7)

$$f = \left| \frac{dp^*}{dx^*} \right| \tag{V-T}$$

$$\left|\frac{dp^*}{dx^*}\right| = f = \frac{96}{Re_{D_h}} \tag{A-$``}$$

¹ Darcy friction factor

مطابق این شکل مقدار ضریب اصطکاک در ناحیهٔ کاملاً توسعه یافته در 0.9293 =
$$\left| \frac{dp^*}{dx^*} \right|$$
 به شیب
صفر میل می نماید که از رابطهٔ (۳–۸) عدد ۰٫۹۶ محاسبه می گردد. در نتیجه ضریب اصطکاک
دارسی محاسبه شده در روش عددی در حدود ٪۳٫۱۹ خطا دارد.



شکل(۳-۱۲) نمودار ضریب اصطکاک دارسی در سیال نیوتنی و به ازای Re=100.

۳-۳- بررسی موردی جریان اطراف تک مانع مربعی

در این قسمت جریان اطراف تک مانع مربعی در دوحالت نیوتنی و غیر نیوتنی با نتایج مراجع موجود شبیه سازی شده است. الف- اعتبار سنجي با نتايج تركي و همكاران [66]

پس از اعتبارسنجی کد عددی در جریان داخل کانال، بررسی صحت کد نوشته شده در حالت وجود مانع در داخل کانال نیز از اهمیت خاصی برخوردار است. در نتیجه در این قسمت نتایج ترکی و همکاران [66] برای جریان اطراف یک مانع مربعی با درصد انسداد $4/1=\beta$ ، در عدد رینولدز ۴۰ مطابق شکل (۳–۱۳) شبیه سازی شد. فاصلهٔ مکان قرار گیری مانع تا ابتدای کانال نیز $x_{\mu} = x/A = 10$



۳-۳-۱ شرایط مرزی

در ورودی کانال مطابق شکل (۳–۱۳) یک پروفیل سرعت سهموی اعمال شد. در دیواره های بالایی و پایینی و دیوارهٔ مانع مربعی از شرط مرزی عدم لغزش استفاده گردید. مطابق شکل (۳–۲)، تعداد m=101 و m=651 گره به ترتیب در راستای i, j در نظر گرفته شد.

۳-۳- ۲- نتایج بدست آمده

در این بررسی، پارامتر طول و عرض گردابهٔ ایجاد شده در پشت مانع مورد علاقه بوده است. این طول، (\overline{L}_r) ، طبق شکل (۳–۱۳) از پشت مانع تا نقطه ای که خطوط جریان در امتداد خط مرکزی گردابه به یکدیگر می رسند، در نظر گرفته می شود. عرض گردابه نیز با \overline{W}_r مشخص می شود. در شکل به یکدیگر می رساند، در داخل کانال ذکر شده، مشاهده می شود. طبق این شکل مقادیر بی بعد (۱۴–۱۴) میدان جریان در داخل کانال ذکر شده، مشاهده می شود. طبق این شکل مقادیر بی بعد

و $L_r = \overline{L}_r / A$ و $W_r = \overline{W}_r / A$ به ترتیب ۱٬۴۹ و ۱٬۴۹ محاسبه گردید که با مقادیر گزارش شده $L_r = \overline{L}_r / A$ توسط ترکی و همکاران [66] کمتر از ٪۱ خطا دارد.



شکل(۳-۱۴) میدان جریان در کانال حاوی یک مانع مربعی در سیال نیوتنی در Re=40.

ب– اعتبار سنجی با نتایج دیمان [67]

جهت بررسی صحت کد عددی در حالت غیر نیوتنی، نتایج دیمان [67] برای جریان اطراف یک مانع مربعی با درصد انسداد $\beta = 1/8$ ، در عدد رینولدز دیمان [67] برابر ۳۰ و ضریب توانی ۱٫۵، مطابق شکل (۳–۱۳) شبیه سازی شد. فاصلهٔ مکان قرار گیری مانع تا ابتدای کانال نیز 8.5 $x_u = x/A = 8.5$ در نظر گرفته شد.

۳-۳-۳ شرایط مرزی

در ورودی کانال مطابق شکل (۳–۱۳) یک پروفیل سرعت سهموی غیرنیوتنی اعمال شد. در دیواره های بالایی و پایینی و دیوارهٔ مانع مربعی از شرط مرزی سرعت صفر استفاده گردید. تعداد m = 96 و m = 313 و m = 96

۳-۳- ۴- نتایج بدست آمده

در شکل (۳–۱۵) میدان جریان در داخل کانال ذکر شده مشاهده می شود. طبق این شکل مقادیر بی بعد L_r و W_r به ترتیب ۳٫۳۵ و ۳٫۳۵ محاسبه گردید که با مقادیر گزارش شده توسط دیمان [67] به ترتیب ٪۱٫۱۷ و ٪۲٫۰۵ خطا دارد.



شکل(۳-۱۵) میدان جریان در کانال حاوی یک مانع مربعی در سیال غیر نیوتنی در Re=30.

ج- اعتبار سنجى با نتايج پاليوال و همكاران [70]

صحت کد عددی در حالت غیر نیوتنی، با نتایج پالیوال و همکاران [70] نیز برای جریان اطراف یک مانع مربعی با درصد انسداد $\beta = 1/15$ ، در عدد رینولدز پالیوال و همکارن [70] برابر 20 و ضریب توانی مربعی با درصد انسداد $x_u = x/A = 6$ در نظر $x_u = x/A = 6$ کرفته شد.

۳–۳–۵– شرایط مرزی

در ورودی کانال شرط سرعت ثابت اعمال شد. در دیواره های بالایی و پایینی شرط لغزش آزاد و در دیواره مانع مربعی از شرط مرزی سرعت صفر استفاده گردید. تعداد m = 91 و n = 115 گره به ترتیب در راستای i, j در نظر گرفته شد.

۳-۳- ۶- نتایج بدست آمده

در شکل (۳–۱۶) میدان جریان در داخل کانال ذکر شده مشاهده می شود. طبق این شکل مقدار بی بعد L_r برابر ۰٫۶۰ محاسبه گردید که با مقادیر گزارش شده توسط پالیوال و همکاران [70] ۱٫۶۹٪ خطا دارد.



شکل(۳-۱۶) میدان جریان در کانال حاوی یک مانع مربعی در سیال غیر نیوتنی در Re=20.

۳-۴- جریان اطراف تک مانع مربعی

در این قسمت، یک مانع مربعی در داخل کانال اشاره شده در بخش ۳-۲ در درصدهای انسداد مختلف ۱/۸، ۱/۴ و ۱/۲ و اعداد رینولدز مختلف ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ مطابق شکل (۳–۱۳) بررسی شده و نتایج با نرم افزار کمسول مقایسه گردید.

۳-۴-۱ - شرایط مرزی

ورودی سرعت یکنواخت یکنواخت 0.00 = 0.0 و 0 = 0.0 و 0 = 0.0 و 0 = 0.0 و شرط عدم لغزش در دیواره های بالایی و پایینی و دیوارهٔ مانع مربعی از شرایط مرزی این بخش است. همچنین مطابق شکل (۳-۲)، تعداد m = 97 و 3001 = n گره به ترتیب در راستای i, j در نظر گرفته شد. گره های موجود در دیوارهٔ های کانال و مانع، به عنوان گره های جامد و مابقی گره ها موجود در کانال به عنوان گرهٔ سیال فرض شده است. یک شبکهٔ مناسب و تا حد امکان یکنواخت، در دقت جواب ها و همچنین پایداری حل عددی اهمیت زیادی دارد. عموماً برای حصول جواب دقیق، شبکه را ریز می نمایند، از طرف دیگر برای کم کردن حجم محاسبات، شبکه بندی مورد استفاده نباید بیش از حد مورد نیاز ریز باشد. بنابراین در یک حل عددی لازم است بین دو پارامتر دست یابی به نتایج با دقت خوب و سرعت انجام محاسبات، توافق منطقی ایجاد گردد. به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج به تعداد و اندازه مش، شبکه بندی انجام گرفته دو برابر گردید و کد نوشته شده به زبان فرترن با آنها اجرا گردید. مطالعهٔ نتایج در دو عدد رینولدز ۱۰۰ و ۳۰۰ بررسی شد و بیشترین اختلاف ٪۱ مشاهده شد. در نتیجه از همان تعداد ۳۰۰۱ *۹۷ گره استفاده شده است.

۳-۴-۲ نتایج بدست آمده

میدان جریان داخل کانال در رینولدزهای ۱۰۰ تا ۳۰۰ در درصد انسداد β=1/8، به ازای ضرایب توانی ۱٫۰، ۰٫۷ و ۱٫۳ در شکل های (۳–۱۷) تا (۳–۱۹) نشان داده شده است.



شکل(۳–۱۷) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در $\beta = 1/8$ ، Re=100 و ضرایب توانی مختلف.

در این شکل ها تشکیل دو گردابه در پشت مانع مربعی دیده می شود. مقادیر بی بعد L_r و W_r در هر حالت با مقادیر بدست آمده با استفاده از نرم افزار کمسول مقایسه گردید و اختلاف اندکی بین نتایج به دست آمده مشاهده شد. بررسی میدان های جریان نشان می دهد که جریان نزدیک به مانع در سیال نازک شونده سریعتر از سیال دایلاتنت است. این پدیده به علت وابستگی ویسکوزیته سیال به

نرخ برش است. آشکار است که با دور شدن از سیلندر، این اثر نیز کمرنگ می شود. با افزایش عدد رینولدز، ناحیهٔ گردابه نیز رشد می کند. قابل ذکر است یک لایهٔ خیلی لزج از سیال، اطراف مانع مربعی را احاطه می کند و به این علت جریان سیال نزدیک شونده به مانع، از مسیر خود تغییر جهت داده و این موضوع به نوبهٔ خود منجر به ایجاد گردابه های طویل تر در جریان دایلاتنت نسبت به نیوتنی و نازک شونده خواهد شد. مطابق شکل (۳–۱۷) در درصد انسداد ۱/۸، رینولدز ۱۰۰ و ضریب توانی ۲٫۷ گردابه ای تشکیل نشده است.

میدان جریان در درصد های انسداد ۱/۴ و ۱/۲ نیز در رینولدزهای مختلف و ضرایب توانی مختلف در شکل های (۳–۲۰) تا (۳–۲۵) قابل مشاهده است. مطابق این شکل ها با افزایش درصد انسداد گردابه های تشکیل شده در پشت مانع مربعی بزرگتر می شود.



شکل(۳–۱۸) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در $\beta = 1/8$ ، Re=200 و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳-۱۹) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در Re=300، B=1/8 و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۲۰-۲۰) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در Re=100، $\beta = 1/4$ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۲۱-۲) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در Re=200، $\beta = 1/4$ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۲۲-۲۲) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در Re=300، $\beta = 1/4$ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۲۳-۳) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در Re=100، $\beta = 1/2$ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳-۲۴) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در Re=200، $\beta = 1/2$ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳–۲۵) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در m Re=300، m R=1/2 و ضرایب توانی مختلف.

مطابق شکل (۳–۲۵)، برداشتن گردابه ^۱ مشاهده می شود. نکته ای که از این شکل استنباط می شود این است که افزایش درصد انبساط با افزایش عدد رینولدز باعث تسریع مرحلهٔ گذر به حالت نوسانی می گردد. قابل ذکر است که روش شبکهٔ بولتزمن از توانایی بالایی در شبیه سازی جریان های تناوبی برخوردار است. قابل ذکر است که با بررسی های انجام شده، شروع ناپایداری گردابه تشکیل شده در پشت مانع مربعی برای ضرایب توانی n=1.0 و n=1 به ترتیب در اعداد رینولدز ۲۸۴ و ۲۱۳ مشاهده گردید. در شکل (۳–۲۶) شروع حالت نوسانی برای دو ضریب توانی اشاره شده، نشان داده شده است.

در شکل (۳–۲۷) مقایسهٔ بین بردارهای سرعت بی بعد روش شبکهٔ بولتزمن و نرم افزار کمسول در موقعیت های مختلف، در درصد انسداد $\beta = 1/4$ ، در رینولدز ۱۰۰ و ضرایب توانی ۰٫۷ و ۱٫۳ نشان

¹ Vortex shedding

داده شده است. نتایج هر دو روش با دقت بالایی بر هم منطبق هستند. این شکل نشان می دهد که الگوی جریان تحت تاثیر مانع قرار می گیرد.



شکل(۳-۲۶) میدان جریان در کانال حاوی مانع مربعی در رینولدز بحرانی، $\beta = 1/2$ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳-۲۷) نمودارهای سرعت بی بعد عرضی در جهت x داخل کانال در مقاطع مختلف به ازای Re=100 و ضرایب

توانی مختلف.

با افزایش ضریب توانی n، مقدار بیشترین سرعت منفی، افزایش می یابد که این پدیده به علت بزرگ شدن طول گردابه ها می باشد.

۳–۵– جریان در محیط متخلخل

پس از اطمینان از صحت کد عددی نوشته شده و بررسی های موردی مختلف، جریان داخل محیط متخلخل مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور محیط متخلخل با دو روش بررسی گردید. حالت اول با نصب موانع مربعی منظم به صورت موضعی با چیدمان های مختلف در اعداد رینولدز مختلف و ضرایب توانی متعدد و حالت دوم با در نظر گرفتن یک بلوک متخلخل با چیدمان موانع مربعی منظم و نامنظم در اعداد رینولدز، ضرایب توانی، درصد انسداد و نسبت تخلخل متفاوت در داخل کانال انجام گرفت.

۳–۵–۱– جریان در محیط متخلخل موضعی منظم

با توجه به مطالعات گذشته، تا کنون در زمینهٔ استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن در شبیه سازی میدان جریان بین دو صفحه موازی بی نهایت که به صورت موضعی دارای محیط متخلخل منظم باشد، تحقیقاتی انجام نگرفته است، لذا در این بخش جریان سیال جابجایی اجباری بین دو صفحه شبیه سازی شده، سپس به منظور بررسی محیط متخلخل، آرایشی از موانع مربعی جامد بین دو صفحه قرار گرفته و میدان جریان در اعداد رینولدز مختلف با استفاده از مدل توانی در ضرایب توانی مهر ۱٫۰ م٫۰ و ۱٫۲ بررسی گردیده است که در نتیجه نوآوری این بخش با توجه به عدم وجود مطالعه ای در حل عددی جریان سیال در مقیاس حفره آشکار می گردد.

به منظور بررسی مسأله اشاره شده در بالا، دامنهٔ محاسباتی دو بعدی در جریان سیال تراکم ناپذیر بین دو صفحه موازی مطابق بخش (۳–۲) تعریف شد. به منظور بررسی محیط متخلخل، موانع مربعی عایق با آرایش ۴×۴، ۷×۷ و ۱۰×۱۰ در موقعیت x/L=0.067 بین دو صفحه قرار گرفته است. طرح کلی



محیط متخلخل مورد استفاده در شکل (۳–۲۸) نشان داده شده است.

شكل (۳-۲۸) طرح كلى محيط متخلخل مورد استفاده.

۳-۵- ۱-۱ شرایط مرزی

در ورودی میدان جریان با فرض سرعت یکنواخت 0.05 = 0 و 0 = 0، از مدل زو و هی [54] استفاده گردید. در خروجی نیز از طرح برونیابی می و دیگران [61] برای مقادیر مجهول استفاده شد. برای دیواره های بالا و پایین با فرض عدم لغزش سرعت، از طرح بازگشت به عقب [9] استفاده شد. میزان سرعت در داخل محیط متخلخل نیز به علت عدم نفوذ جریان، صفر خواهد بود، لذا جهت

برقراری این شرط از روش تغییر مقادیر توابع توزیع چگالی در کل محیط جامد استفاده گردید. در شبیه سازی انجام شده از ضخامت صفحات صرفنظر گردیده و به منظور رسیدن به حالت توسعه یافتگی، طول صفحات به اندازهٔ کافی طویل در نظر گرفته شد. در نتیجه تعداد 97 و m = 97 و m = 97 و m = 97 و m = 97 و ماول صفحات به اندازهٔ کافی طویل در نظر گرفته شد. در نتیجه تعداد 97 و موانع، به عنوان گره های جامد و مابقی گره ها موجود در کانال به عنوان گرهٔ سیال فرض شد. به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج به تعداد و اندازه مش، شبکه بندی انجام گرفته دو برابر گردید و کد نوشته شده به زبان فرترن با آنها اجرا گردید. مطالعهٔ نتایج در دو عدد رینولدز ۱۰۰ و ۳۰۰ بررسی شد و بیشترین اختلاف ٪۱٫۲ مشاهده شد. در نتیجه از همان تعداد ۳۰۰۱*۹۷ گره استفاده شد.

۳-۵-۱-۲- نتایج بدست آمده

خطوط هم تراز موضعی سرعت در محیط متخلخل در اعداد رینولدز مختلف به ازای ضرایب توانی متعدد در آرایش های ۴ تا ۱۰ تایی در شکل های (۳–۲۹) تا (۳–۳۴) نشان داده شده است.



شکل(۳-۲۹) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در Re=100، آرایش 4*4 و ضرایب توانی

مطابق این شکل ها، با افزایش عدد رینولدز، نمودار سرعت در محیط متخلخل تغییر کرده و مقدار سرعت افزایش مییابد. همچنین با افزایش ضریب توانی، میزان سرعت جریان افزایش یافته و الگوی حرکت جریان از داخل محیط متخلخل تغییر می کند. آشکار است که در آرایش 4*4 به دلیل بزرگ بودن موانع و افزایش مقاومت در مسیر حرکت سیال داخل کانال، تمرکز جریان سیال در فضای آزاد بین موانع بیشتر شده و در نتیجه سرعت سیال عبوری از داخل محیط متخلخل افزایش می یابد. روش عددی استفاده شده، به خوبی حرکت سیال در بین موانع جامد تعبیه شده را نشان می دهد



شکل(۳-۳۰) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در Re=300، آرایش 4*4 و ضرایب توانی



شکل(۳-۳)) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در Re=100، آرایش 7*7 و ضرایب توانی



شکل(۳-۳۲) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در Re=300، آرایش 7*7 و ضرایب توانی



شکل(۳-۳۳) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در Re=100، آرایش 10*10 در ضرایب توانی





قابل ذکر است که موانع مربعی با مسدود کردن قسمتی از دامنهٔ محاسباتی، الگوی حرکت سیال را تغییر میدهند و روش شبکهٔ بولتزمن به راحتی حرکت سیال از داخل موانع را شبیه سازی می کند و در نتیجه کارایی این روش را در شبیه سازی هندسه های پیچیده نمایان می سازد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، خطوط سرعت ثابت در ردیف انتهایی موانع طویل تر شده و در امتداد دو صفحه گسترش می یابد. در شکل های (۳–۳۵) و (۳–۳۶) میدان جریان در محیط متخلخل در اعداد رینولدز ۱۰۰ و ۳۰۰ در آرایش ۴*۴ و ضرایب توانی مختلف نشان داده شده است. در اثر تماس بین سیال و موانع، گردابه های جریان تشکیل می شوند.

با بررسی دقیق این شکل ها مشخص می شود که افزایش ضریب توانی منجر به بزرگ شدن گردابه های ایجاد شده در آخرین ردیف موانع می گردد. . این پدیده به دلیل تشکیل لایه لزج سیال در اطراف موانع و گرادیان فشار معکوس در سیال دایلاتنت می باشد.





شکل(۳-۳۵) میدان جریان در آرایش 4*4 در Re=100 و ضرایب توانی مختلف.

مطابق این شکل ها در آرایش ۴*۴ گردابه های بزرگ تر و قوی تر ایجاد می شوند اما در سایر آرایش ها به دلیل نفوذ راحت تر سیال داخل محیط متخلخل، گردابه های کوچکتر و ضعیف تری ایجاد می شوند. قابل ذکر است که قدرت گردابه ها به عدد رینولدز نیز وابسته است. در اعداد رینولدز پایین گردابه های ضعیف تری تشکیل می شوند.



شکل(۳-۳۶) میدان جریان در آرایش 4*4 در Re=300 و ضرایب توانی مختلف.

در شکل (۳–۳۷) سرعت بی بعد طولی در موقعیت y/H=0.5 به ازای Re=300 و در آرایش 4*4 ترسیم گردیده است. مطابق این شکل با افزایش ضریب توانی، سرعت عبوری از داخل محیط متخلخل افزایش می یابد. همچنین سرعت داخل محیط متخلخل تحت تاثیر موانع مربعی قرار گرفته و با یک جهش کلی مواجه می شود و در نهایت کاهش می یابد.



. $y \,/\, H = 0.5$ مقایسه بین نمودار سرعت بی بعد طولی در Re=300 و آرایش 4*4 در موقعیت . $y \,/\, H = 0.5$

نمودار سرعت بیبعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در Re=300 و x/L=0.083 در شکل (۳–۳۸) نشان داده شده است. با افزایش تعداد موانع، سرعت داخل محیط متخلخل کاهش می یابد. همچنین آشکار است که در سیالات دایلاتنت سرعت داخل محیط متخلخل بیشتر است.



شکل (۳–۳۸) نمودار سرعت بیبعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در Re=300 و x / L = 0.083 .

نمودار سرعت بیبعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در Re=300 در موقعیت های مختلف در شکل (π - π) نشان داده شده است. مطابق این شکل، با نزدیک شدن به موانع مربعی، نمودار سرعت از حالت سهموی خود خارج می شود. در موقعیت x/L=0.084 که مرتبط با مقطع داخل محیط متخلخل است، نمودار سرعت بیبعد به علت تاثیر موانع مربعی و گردابه های تشکیلی حالت نوسانی به خود می گیرد و به تدریج با دور شدن از محیط متخلخل از حالت نوسانی خارج می شود. ور شدن از محیط متخلخل از حالت نوسانی خارج می شود. قابل ذکر است که روش شبکهٔ بولتزمن به خوبی حرکت سیال در میان محیط متخلخل را



شکل (۳–۳۹) نمودار سرعت بیبعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در Re=300 در موقعیت های

۲-۵-۳ جریان در کانال حاوی بلوک متخلخل

در این قسمت جریان سیال داخل کانال حاوی بلوک متخلخل بررسی شده است. بلوک متخلخل حاوی موانع مربعی می باشد که هر دو حالت آرایش قرارگیری منظم و نامنظم در آن بررسی گردیده است. نتایج شبیه سازی در اعداد رینولدز مختلف، آرایش موانع متفاوت، درصد انسداد های ۱/۴، ۸/۱ و ۲/۱ و نسبت تخلخل های ۵٫۹۲۵، ۸۸٫۹ و ۹٫۹۳۷۵ در داخل ناحیهٔ تخلخل در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی موجود می باشد. به منظور بررسی مسأله اشاره شده در بالا، دامنهٔ محاسباتی دو بعدی در جریان سیال تراکم ناپذیر بین دو صفحه موازی مطابق بخش (۳–۲) تعریف شد. طرح کلی مسألهٔ مورد بررسی که دارای بلوک متخلخل است در شکل (۳–۴۰) نشان داده شده است. این بلوک در موقعیت $X_{\mu} = 10$

شماتیک آرایش موانع مربعی داخل بلوک متخلخل در شکل (۳–۴۱) نشان داده شده است. این شکل که در حالت درصد انسداد ۱/۴ ترسیم شده است، شش حالت مختلف موانع مربعی را در نسبت تخلخل ۸۸,۰ نشان می دهد. حالت ۱ مربوط به آرایش منظم با نسبت 3=s/d بوده و و بقیهٔ حالت ها مرتبط با حالت های نامنظم است. قابل ذکر است آرایش موانع مربعی در سایر درصدهای انسداد و ضرایب تخلخل در ادامه نشان داده خواهد شد.



شكل (۳-۴۰) طرح كلى مسألة مورد بررسى.



شکل (۳-۴۱) شماتیک آرایش قرارگیری موانع مربعی الف) حالت ۱ ب) حالت ۲ ج) حالت ۳ د) حالت ۴ ح) حالت ۵ خ) حالت ۶

۳-۵- ۲-۱- شرایط مرزی

در ورودی میدان جریان با فرض سرعت یکنواخت 0.05 = 0 و 0 = 0، از مدل زو و هی [54] استفاده گردیده است. در خروجی نیز از طرح برونیابی می و دیگران [61] برای مقادیر مجهول استفاده شد. برای دیواره های بالا و پایین با فرض عدم لغزش سرعت، از طرح بازگشت به عقب [9] استفاده شد. میزان سرعت در داخل محیط متخلخل نیز به علت عدم نفوذ جریان، صفر خواهد بود، لذا جهت برقراری این شرط از روش تغییر مقادیر توابع توزیع چگالی در کل محیط جامد استفاده گردید. در شبیه سازی انجام شده از ضخامت صفحات صرفنظر گردیده و به منظور رسیدن به حالت توسعه یافتگی، طول صفحات به اندازهٔ کافی طویل در نظر گرفته شد. به منظور بررسی عدم وابستگی نتایج به تعداد و اندازهٔ مش و انتخاب شبکهٔ مناسب در دامنهٔ محاسباتی، سه شبکه بندی ۱۵۰۱*۴۹، ۹۷۰۳۰۰۱ و ۲۰۰۹*۱۹۳ به ترتیب در جهات Y و X بررسی شد. مقایسهٔ بین نمودارهای سرعت در شکل (۳–۴۲) نشان داده شده است. طبق این شکل که در حالت نیوتنی بدست آمده، اختلاف اندکی بین نتایج وجود دارد. زمان محاسباتی در همگرا شدن نتایج در حالت شبکه بندی ۳۰۰۱ ۹۷۰۶۰۰۱ به ترتیب تقریباً برابر ۵۰ و ۱۴۲ ساعت می باشد. در نتیجه شبکهٔ یکنواخت ۳۰۰۱ ۱۹۷۰۶۰۰۱ در کل محاسبات با توجه به دقت محاسبات و زمان سپری شده، در نظر گرفته شد. گره های موجود در کل محاسبات با توجه به دقت محاسبات و زمان سپری شده، در نظر گرفته شد. گره های موجود در علی موابرهٔ های کانال و موانع، به عنوان گره های جامد و مابقی گره ها موجود در کانال به عنوان گرهٔ



شکل (۳-۴۲) بردارهای سرعت بی بعد در شبکه بندی های مختلف برای حالت ۱، A/H=1/4 ، ٤ = 0.88 و شکل (۳-۴۲) بردارهای سرعت بی بعد در موقعیت x/L=0.086667 ب) در موقعیت x/L=0.086667
۳-۵- ۲-۲- نتایج بدست آمده

خطوط هم تراز موضعی سرعت در آرایش های مختلف محیط متخلخل، درصد انسداد ۱/۴، ۱/۲ و ۱/۸ و به ازای ضرایب توانی متعدد، در ۵.88 = ٤ در شکل های (۳-۴۳) تا (۳-۵۲) نشان داده شده است.





با تغییر چیدمان موانع مربعی و درصد انسداد، الگوی جریان تغییر می کند. همچنین حرکت جریان تحت تاثیر ضریب توانی نیز تغییر می یابد. مطابق این شکل ها، با بزرگ شدن درصد انسداد بلوک متخلخل به علت کوچک شدن فاصله بین دیوارهٔ کانال و محیط متخلخل، سرعت عبوری از این فضای خالی، افزایش می یابد.



شکل(۴۴-۳) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، β=1/4، ε=0.88، re=100، حالت ۲و ضرایب

مختلف.



شکل(β--۴۵) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، β=1/4،ε=0.88، re=109، حالت ۳و ضرایب توانی



شکل(β-۳) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، β=1/4،ε=0.88، re=100، حالت ۴و ضرایب توانی







شکل(۳-۴۷) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، Re=1/2، ε=0.88، حالت ۱ و ضرایب توانی



شکل(۴۸-۴۸) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، Re=1/2، ε=0.88، حالت ۲ و ضرایب توانی





شکل(۴۹-۴۹) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، Re=1/2، ε=0.88، حالت ۳ و ضرایب توانی



شکل(۳-۵۰) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، β=1/8، ε=0.88، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.















شکل(۵۲-۵۲) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، β=1/8، ε=0.88، ree، حالت ۳ و ضرایب توانی مختلف.

در شکل های (۳–۵۳) تا (۳–۶۱) خطوط هم تراز موضعی داخل کانال در عدد رینولدز ۳۰۰، 88.0=ع، درصدهای انسداد ۱/۴، ۱/۲ و ۱/۸ و همچنین آرایش ها و ضرایب توانی مختلف نشان داده شده است. با افزایش عدد رینولدز و افزایش ضریب توانی، خطوط هم تراز در امتداد کانال طویل تر می گردد. این خطوط بسیار متأثر از آرایش موانع هستند. با افزایش درصد انسداد و افزایش عدد رینولدز، پدیدهٔ برداشتن گردابه قابل مشاهده است، به گونه ای که این پدیده مطابق شکل های (۳-۵۶) تا (۳–۵۸) در آرایش منظم در ضریب توانی ۱٫۲ و در آرایش های نامنظم در ضرایب توانی ۱ و ۱٫۲ قابل مشاهده است. آشکار است که با تغییر آرایش موانع مربعی از منظم به نا منظم به علت تغییر الگوی جریان، این پدیده در ضرایب توانی کوچکتری نمایان می گردد.



شکل(α-۵۳) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=300، Re=1/4، ε=0.88، حالت ۱ و ضرایب توانی

مختلف.



شکل(β-۳۵) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=300، Re=3، β=1/4، حالت ۲ و ضرایب توانی



شکل(۳-۵۵) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=300، Re=3، β=1/4، حالت ۳ و ضرایب توانی



شکل(β-۳۵) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=300، Re=1/2، ε=0.88، حالت ۱ و ضرایب توانی



شکل(۵۲-۵۷) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=300، Re=3، حالت ۲ و ضرایب توانی شکل(۵۷-۵۲) معلوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در ا



شکل(۳-۵۸) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=300، Re=1/2، ε=0.88، حالت ۳ و ضرایب توانی























تابع جریان از جمله متغیرهای مناسب در آشکار نمودن نحوهٔ تغییر میدان جریان با حضور بلوک متخلخل می باشد. بدین منظور خطوط جریان در ضرایب توانی مختلف، آرایش ها، درصدهای انسداد متفاوت در دامنهٔ محاسباتی، در شکل های (۳–۹۲) تا (۳–۷۱) نشان داده شده است. این شکل ها خطوط جریان داخل بلوک متخلخل در عدد رینولدز ۱۰۰ را نشان می دهد. بررسی دقیق این شکل ها، الگو و رفتار مشخص جریان عبوری از محیط متخلخل را بازگو می کند. کاهش میزان فضای عبوری جریان باعث می شود که جریان اصلی در فضای خالی فی مابین دیوارهٔ کانال و محیط متخلخل، متمرکز شده و مقدار جریان اندکی به داخل بلوک متخلخل نفوذ کند که این امر منجر به تشدید اثرات جابجایی می شود. در اثر تعامل بین جریان و بلوک متخلخل، گردابه های جریان شکل می گیرد. دو ناحیهٔ گردشی جریان در پشت بلوک متخلخل قابل رؤیت است. البته در ضریب توانی پایین، جدایی جریان رخ نمی دهد که به علت نبود قدرت کافی جریان در تشکیل جریان گردابی است. اشاره دقیق به عدد رینولدزی که در آن گردابه ها تشکیل می شوند، کار مشکلی است اما آنچه مسلم است، در ضرایب توانی پایین تر، گردابه ها در اعداد رینولدز بالاتری تشکیل می شوند.

گردابه های تشکیلی در پشت بلوک متخلخل، باعث چرخش جریان و تغییر جهت بردار سرعت می شود. وسعت و شدت ناحیهٔ چرخشی پشت بلوک متخلخل، با تغییر ضریب توانی تغییر می یابد. قابل مشاهده است که نفوذ جریان به داخل محیط متخلخل و گردابه های تشکیلی پشت بلوک متخلخل، با افزایش ضریب توانی سیال، افزایش می یابد. قابل ذکر است که در برگرفتن لایهٔ لزج سیال پیرامون محیط متخلخل و گرادیان فشار مخالف در پشت بلوک، منجر به تغییر مسیر دادن جریان سیال از مسیر اصلی خود شده و ناحیهٔ گردابی بزرگتری در سیالات ضخیم شونده نسبت به سیالات نیوتنی و نازک شونده را تشکیل می دهد.

هندسه و ابعاد گردابه ها نیز تحت تاثیر آرایش موانع است. در حالت آرایش منظم موانع، گردابه های متشکله کاملاً متقارن می باشند، این تقارن با تغییر آرایش موانع از حالت منظم به نامنظم، از بین می رود. همچنین با افزایش درصد انسداد نیز گردابه های تشکیلی بزرگتر می شوند.









شکل(۳-۶۲) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، Re=1/4، $\varepsilon=0.88$ ، $\beta=1/4$ ، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.









شکل(۶۳-۳) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، m Re=1/4، m e=0.88، Re=100) میدان جریان در محیط متخلخل در









شکل(۶۴-۳) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، m Re=1/4، m e=0.88، Re=100) میدان جریان در محیط متخلخل در









شکل(۳–۶۵) میدان جریان در محیط متخلخل در m Re=100، m Re=1/4، $m \beta=1/4$ ، حالت ۴ و ضرایب توانی مختلف.









شکل(۳-۶۶) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، m Re=1/2، m e=0.88، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.









شکل(۳-۶۷) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، Re=1/2، =0.88، محالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.









شکل(۳-۶۸) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، Re=1/2، $\beta=1/2$ ، حالت ۳ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳-۶۹) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، Re=1/8، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۲-۷۰) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β =1/8، ε =0.88، ا β =1/8، حالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۲–۷۱) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β =1/8، β =1/8، حالت ۳ و ضرایب توانی مختلف.

در شکل های (۳–۷۲) تا (۳–۸۱) خطوط جریان در ضرایب توانی، آرایش ها و درصدهای انسداد متفاوت داخل بلوک متخلخل در عدد رینولدز ۳۰۰ نشان داده شده است.



شکل(۲-۲۲) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، Re=308، محالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.

همانگونه که مشخص است، قدرت گردابه های متشکله در پشت بلوک متخلخل، ارتباط مستقیمی با عدد رینولدز دارد. ناحیهٔ گردابه با افزایش عدد رینولدز در جهت جریان رشد کرده و منطقهٔ گسترده تری را پوشش می دهد. در شکل های (۳–۷۶) تا (۳–۷۸) نیز برداشتن گردابه مشاهده می شود.



شکل(۲۳-۳) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، Re=308، حالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳-۷۴) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، Re=308، حالت ۳ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳-۷۵) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، m Re=1/4، m e=1/4، حالت ۴ و ضرایب توانی مختلف.









شکل(۳-۷۶) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، Re=308، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.









شکل(۳-۷۷) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، Re=300، حالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.


شکل(۳-۷۸) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، Re=308، حالت ۳ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳-۷۹) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، Re=308، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.









شکل(۲-۸۰) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، m Re=1/8، m e=1/8، حالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۵۱-۳) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، Re=1/8، حالت ۳ و ضرایب توانی مختلف.

ارتباط بین طول بی بعد گردابه، L_r، نسبت به تغییرات عدد رینولدز و ضریب توانی n در آرایش قرارگیری منظم موانع مربعی در نسبت تخلخلل ۰٫۸۸ و در صد انسداد ۱/۴ در شکل (۳–۸۲) نشان داده شده است.

مطابق این شکل، تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی طول بی بعد گردابه بیشتر از تاثیر تغییرات ضریب توانی n بر روی این طول می باشد. طول گردابه در عدد رینولدز ثابت در سیال نازک شونده کوچکتر از سیال نیوتنی و سیال ضخیم شونده می باشد.

در توضیح این پدیده می توان گفت که نرخ تغییر شکل سیال در نزدیکی سطح بیشترین بوده که در نتیجه ویسکوزیته در این ناحیه در سیال نازک شونده کمترین مقدار را داشته بود و یک لایهٔ نازک از سیال با ویسکوزیتهٔ پایین، بلوک متخلخل را احاطه می کند. این امر منجر به دور شدن سریعتر میدان جریان از اطراف بلوک متخلخل، کاهش شدید در نرخ برش و در نهایت بالا رفتن ویسکوزیتهٔ سیال می گردد.

این پدیده همچون یک مرز جامد موثر عمل می نماید که مانع از تمایل سیال به جدایش شده و تولید گردابه در سیال نازک شونده را به تاخیر می اندازد. در مقابل، نرخ برشی بالا در مجاورت بلوک متخلخل منجر به ویسکوزیتهٔ بالا در سیالات ضخیم شونده در نزدیکی سطح بلوک گشته و سیال لزج که با سرعت کم حرکت می کند، بلوک را در بر می گیرد. این سیال لزج به سیال دور شونده از بلوک متخلخل با ویسکوزیتهٔ پایین می پیوندد. به عبارت دیگر در سیالات با 1<n، بیشترین ویسکوزیته در نزدیکی سطح بلوک می می اندازد. در مقابل، نرخ برشی بالا در مجاورت بلوک متخلخل منجر به ویسکوزیتهٔ بالا در سیالات ضخیم شونده در نزدیکی سطح بلوک گشته و سیال لزج که با سرعت کم حرکت می کند، بلوک را در بر می گیرد. این سیال لزج به سیال دور شونده از بلوک متخلخل با ویسکوزیتهٔ پایین می پیوندد. به عبارت دیگر در سیالات با 1<n، بیشترین ویسکوزیته در نزدیکی سطح بلوک متخلخل حادث شده و جدایش جریان سریعتر رخ می دهد.

با توجه به شکل (۳–۸۲)، طول گردابه در سیالات نیوتنی ارتباط خطی با عدد رینولدز دارد. همچنین این ارتباط خطی در سیالات ضخیم شونده قابل رؤیت بوده ولی در سیالات نازک شونده این اثر ضعیف تر شده که مرتبط با تاخیر تشکیل گردابه ذکر شده در بالا در این سیالات می باشد.



شکل(۳-۸۲) تغییرات طول بی بعد گردابه (L_r) با عدد رینولدز برای ضرایب توانی مختلف در β =1/8 ε و مکل(۳-۸۲) تغییرات طول بی بعد گردابه (L_r) با عدد رینولدز ا

موقعیت و اندازهٔ گردابه های ایجاد شده در پشت موانع مربعی، در نسبت تخلخل های مختلف، متفاوت است. بدین منظور شکل های (۳–۸۳) تا (۳– ۱۱۸) به ازای حالت های مختلف، درصدهای انسداد و اعداد رینولدز متفاوت، در ضرایب توانی ۱٫۰، ۰٫۸ و ۱٫۲ به ازای نسبت های تخلخل ۰٫۹۳۷ و ۰٫۹۳۷۵ ترسیم گردید. نتایج به دست آمده نشان دهندهٔ این مطلب است که گردابه ها با کاهش نسبت تخلخل بلوک متخلخل، بزرگتر می گردد.



شکل(۵۳-۸۳) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، $\beta=1/4$ ، $\varepsilon=0.75$ ، Re=100) میدان جریان در محیط متخلف.



شکل(۲-۸۴) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، $\beta=1/4$ ، $\varepsilon=0.75$ ، Re=100) میدان جریان در محیط متخلف.



شکل(۳–۸۵) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، $\beta=1/4$ ، $\varepsilon=0.75$ ، Re=100) میدان جریان در محیط متخلف.



شکل(۳-۸۶) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، $\beta=1/2$ ، $\beta=1/2$ ، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۵۲–۸۷) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، ho = 1/2، ho = 1/2، حالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۵۳-۸۷) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، $\epsilon=0.75$ ، Re=1/2، حالت ۳ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳-۸۹) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، Re=1/8، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳-۹۰) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، Re=1/8، حالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۵۱-۹) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β =1/8، ε =0.75، Re=100) میدان جریان در محیط متخلف.



شکل(۲-۹۲) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، $\beta=1/4$ ، $\beta=1/4$ ، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.







شکل(۳–۹۳) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، $\beta=1/4$ ، $\beta=1/4$ ، حالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.







شکل(۳-۹۴) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، $\beta=1/4$ ، $\beta=1/4$ ، حالت ۳ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳–۹۵) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، Re=303، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳–۹۶) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، Re=1/2، حالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳-۹۷) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، $\epsilon=0.75$ ، Re=300) میدان جریان در محیط متخلف.



شکل(۳-۹۸) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، Re=1/8، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳-۹۹) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β =1/8، β =1/8، حالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳-۱۰۰) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/8، β=1/8، حالت ۳ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۵۰-۱۰۱) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، ε=0.9375، حالت ۱ و ضرایب توانی



شکل(β-۱۰۲) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/4، ε=0.9375، حالت ۲ و ضرایب توانی



شکل(۳-۱۰۳) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/4 ،ε=0.9375، تالت ۳ و ضرایب توانی



شکل(β=1/2 ،ε=0.9375، Re=100، میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/2،ε=0.9375، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳-۱۰۵) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/2، ε=0.9375، حالت ۲ و ضرایب توانی



شکل(۳-۱۰۶) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/2، ε=0.9375، حالت ۳ و ضرایب توانی



شکل(۳-۱۰۷) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، ε=0.9375، حالت ۱ و ضرایب توانی



شکل(۳-۱۰۸) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/8، ε=0.9375، re=100، حالت ۲ و ضرایب توانی



شکل(۳-۱۰۹) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=100، β=1/8، ε=0.9375، حالت ۳ و ضرایب توانی



شکل(۳-۱۱۰) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/4، ε=0.9375، او ضرایب توانی



شکل(۳-۱۱۱) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/4، ε=0.9375، حالت ۲ و ضرایب توانی



شکل(۳-۱۱۲) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/4، ε=0.9375، حالت ۳ و ضرایب توانی






شکل(۳-۱۱۳) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، Re=302، حالت ۱ و ضرایب توانی







شکل(β=1/2 ،ε=0.9375 ،Re=300 میدان جریان در محیط متخلخل در β=1/2 ،ε=0.9375 مالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۳–۱۱۵) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، $\beta=1/2$ ، $\varepsilon=0.9375$ ، حالت ۳ و ضرایب توانی



شکل(۳-۱۱۶) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β=1/8، ε=0.9375، reelis. مختلف.



شکل(۳-۱۱۷) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β =1/8، ε =0.9375، حالت ۲ و ضرایب توانی



شکل(۳–۱۱۸) میدان جریان در محیط متخلخل در Re=300، β =1/8، ε =0.9375، مالت ۳ و ضرایب توانی

تغییرات سرعت بیبعد طولی در موقعیت y/H=0.5 در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در y/H=0.5 در شکل های ($\gamma-100$) تا ($\gamma-100$) نشان داده شده است. نتایج $\beta=1/4$ و $\epsilon=0.88$ Re=100 نشان دهندهٔ این است که سرعت جریان داخل بلوک متخلخل تحت تاثیر آرایش موانع مربعی و ضریب توانی می باشد. همچنین نمای نزدیکتری از این اشکال نیز نشان داده شده است.



، y/H = 0.5، Re=100 ،n=0.8 شكل (۳–۱۱۹) الف) نمودار سرعت بی بعد طولی در آرایش های مختلف در محتلف الف (۱۹–۳) الف) نمودار سرعت $\beta = 1/4$ و $\epsilon = 0.88$



شکل (۳-۱۲۰) الف) نمودار سرعت بی بعد طولی در آرایش های مختلف در n=1.0، Re=100، n=1.0، سکل (۲۰-۳)



.A و 1/4 و $\beta=1/4$ ب) نمای نزدیکتر در نقطه $\varepsilon=0.88$

، y/H = 0.5، Re=100 ،n=1.2 شكل (۱۲۱–۳) الف) نمودار سرعت بی بعد طولی در آرایش های مختلف در (۱۲۱–۱۲) الف) نمودار سرعت $\beta = 1/4$ و $\epsilon = 0.88$

 $\beta=1/4$ و 2008، Re=100 نمودار سرعت بیبعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در Re=100، Re=3 و x/L=0.88 ها یک کاهش در موقعیت x/L=0.08 در شکل (۳–۱۲۲) نشان داده شده است. مطابق این شکل ها یک کاهش قابل ملاحظه در سرعت جریان داخل بلوک متخلل مشاهده می شود. با این وجود، سرعت جریان بعد از بلوک متخلخل مشاهده می شود. با این وجود، سرعت جریان بعد از بلوک متخلخل افزایش می یابد. قابل ذکر است که اندازهٔ بردار سرعت در بلوک متخلخل بسیار کمتر از مقدار آن در خارج از این ناحیه است. موابق می شود. با این وجود، سرعت جریان بعد از بلوک متخلل مشاهده می شود. با این وجود، سرعت جریان بعد از بلوک متخلخل افزایش می یابد. قابل ذکر است که اندازهٔ بردار سرعت در بلوک متخلخل بسیار بعد از مقدار آن در خارج از این ناحیه است. در نتیجه مادهٔ متخلخل مقاومت بالایی در مقابل جریان بوجود آورده و منجر به فرار سیال به ناحیهٔ فاقد مادهٔ متخلخل می شود. در نتیجه نرخ جریان جرمی در ناحیهٔ متخلخل می شود. در نتیجه نرخ جریان جرمی در ناحیهٔ متخلخل کاهش یافته و در خارج از این ناحیه اور این ناحیه افزایش می یابد.



شکل (۳–۱۲۲) نمودار سرعت بی بعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در Re=100، Re=0.08، Re=100 شکل (۳–۱۲۲) نمودار سرعت بی بعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در

در شکل (۳–۱۲۳) نیز نمودار سرعت بی بعد عرضی در موقعیت ها و ضرایب توانی مختلف در حالت $\beta=1/4$ و $\epsilon=0.88$ ،Re=100 ،۱ داده شده است. مطابق این شکل با نزدیک شدن به بلوک متخلخل، بردار سرعت متاثر از آرایش موانع مربعی از حالت سهموی خود خارج می شود.



شکل (۳-۱۲۳) نمودار سرعت بیبعد عرضی در موقعیت ها و ضرایب توانی مختلف در حالت ۱، Re=100 ،n=0.8، شکل (۳-۳). ε=0.88

تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی نمودار سرعت بی بعد عرضی در موقعیت ها و ضرایب توانی و اعداد رینولدز مختلف در حالت ۱، $\beta=1/4$ و $\beta=1/4$ در شکل (۳–۱۲۴) نشان داده شده است. آشکار است که با افزایش عدد رینولدز، سرعت عبوری از داخل بلوک متخلخل افزایش می یابد.



شکل (۳-۱۲۴) نمودار سرعت بیبعد عرضی در موقعیت و ضرایب توانی و اعداد رینولدز مختلف در حالت۱، 8.0=ع و

 $\beta = 1/4$

جهت بررسی نحوهٔ تغییر نسبت تخلخل بر روی نمودار سرعت بیبعد عرضی، شکل های (۳–۱۲۵) و (۳–۱۲۵) در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در Re=100 و β=1/4 در درصدهای انسداد ۲۵,۰۰ و (۳–۱۲۶) در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در ۹۵۰-۹۰ و در ۹۰۵-۹۰ در درصدهای انسداد ۹۰٫۰۵ و ۰٫۹۳۷ در میزان پروفیل سرعت با افزایش درصد انسداد کاهش می یابد.



شکل (۳-۱۲۵) نمودار سرعت بیبعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در Re=100، Re=100، x/L=0.08

.β=1/4 , ε=0.75



.β=1/4 ,ε=0.9375

خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در Re=100، Re=3 و β-14 در شکل (۳-۱۲۷) در ضرایب توانی مختلف برای حالت اول نشان داده شده است. با بررسی دقیق این شکل به نظر می رسد که جریان نزدیک بلوک متخلخل در سیالات نازک شونده نسبت به سیالات نیوتنی و ضخیم شونده، سرعت بیشتری دارند که نتیجه منطقی ارتباط بین ویسکوزیته سیال و نرخ برش است. با دور شدن از بلوک متخلخل، این اثر به تدریج کاهش می یابد.



شکل(۳-۱۲۷) خطوط هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در Re=100، Re=0.88 هم تراز موضعی سرعت داخل کانال در جهت x در r

و ضرایب توانی مختلف.

فصل چهارم

بررسى نتايج انتقال حرارت

۴–۱– مقدمه

در این فصل نتایج انتقال حرارت بدست آمده با استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن ارائه شده است. ابتدا نتایج جریان بین دو صفحه موازی برای کانال فاقد مانع و کانال حاوی تک مانع جهت بررسی صحت و دقت روش مورد استفاده انجام شده و سپس محیط متخلخل داخل کانال با نصب موانع داخلی با حالت ها و آرایش های مختلف شبیه سازی گردیده است.

۲-۴- انتقال حرارت بین دو صفحهٔ موازی بینهایت

در این بخش، پدیده انتقال حرارت در هندسهٔ ذکر شده در بخش (۳–۲)، علاوه بر حل های تحلیلی با روش های مختلف شبیه سازی شده است.

۲-۴- ۱- شرایط مرزی

جهت شبیه سازی انتقال حرارت، با در نظر گرفتن کلیهٔ شرایط مرزی اشاره شده در فصل قبل، مطابق شکل (۴–۲)، شرط مرزی دما ثابت $0 = T_0$ در ورودی و $1 = T_w$ در دیواره های بالا و پایین کانال با شکل (۴–۲)، شرط مرزی دما ثابت استفاده از روش محمد [47] در نظر گرفته شده است. در خروجی نیز از شرط مرزی دمای خروجی [47] استفاده شده است.

به منظور رسیدن به حالت توسعه یافتگی در حالت دما نیز، طول صفحات به اندازهٔ کافی طویل در نظر گرفته شده و شبکه بندی انجام گرفته نیز دقیقاً همان شبکه بندی ذکر شده در فصل قبل می باشد. عدد پرانتل نیز ۰٫۷ ثابت در نظر گرفته شده است.



شکل(۴-۱) شماتیک انتقال حرارت بین دو صفحهٔ موازی

۲-۲-۲ نتایج بدست آمده

به منظور بررسی صحت مدل حرارتی شبکهٔ بولتزمن، عدد ناسلت محلی در دیوارهٔ پایینی با استفاده از رابطه (۶–۱۹) محاسبه گردید.

نمودار عدد ناسلت بر حسب پارامتر بیبعد (RePr)/(RePr) در عدد رینولدز ۴۰۰ در شکل (۴-۲) در ضرایب توانی مختلف نشان داده شده است. مطابق این شکل، عدد ناسلت محاسبه شده در ناحیهٔ توسعه یافته حرارتی در حالت نیوتنی، ۷٫۵۳۶ می باشد که با مقدار گزارش شده از حل دقیق، ۹٫۵۴ [68]، ۰٫۰۵۳ درصد خطا دارد.



شکل (۴-۲) عدد ناسلت بر حسب مختصات طولی بی بعد در ضرایب توانی مختلف و Re=400.

در شکل (۴–۳) نیز مقایسه ای بین نتایج حل عددی و نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار کمسول برای عدد ناسلت محلی در دیوارهٔ پایینی در Re=100 و ضرایب توانی مختلف ترسیم گردیده است. نتایج حاصل از روش شبکهٔ بولتزمن با دقت کمتر از ۲٪ با نتایج نرم افزار کمسول منطبق می باشد که نشانهٔ دقت بالای کد نوشته شده می باشد.



شکل(۴–۳) مقایسه بین نتایج حل عددی و نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار کمسول برای عدد ناسلت محلی در دیوارهٔ پایینی در Re=100 و ضرایب توانی مختلف

در کدهای عددی، اعتبار سنجی بیشتر نشانه ای از قدرت روش مورد استفاده و کد نوشته شده در شبیه سازی های پیچیده خواهد بود. بدین منظور روش شبکهٔ بولتزمن با مطالعات انجام گرفته توسط شبیه سازی های پیچیده خواهد بود. بدین منظور روش شبکهٔ بولتزمن با مطالعات انجام گرفته توسط تانگ و همکاران [64]، با شرایط دمایی $10 = T_w$ و $20 = T_w$ و سایر شرایط اشاره شده در فصل قبل سنجیده شده و نتایج بدست آمده با نمودار های بیعد دما در مقاطع مختلف دامنهٔ فصل قبل سنجیده شده در مقاطع مختلف دامنهٔ محاسباتی در حالت نیوتنی مقایسه گردیده است. نتایج در شکل (۴–۴) نشان داده شده است. مطابق این شکلها، نتایج انتقال حرارت اختلاف بسیار اندکی با یکدیگر دارد.



شكل(۴-۴) مقايسه بين نمودار دماي بيبعد تانك [64] با نتايج بدست آمده از روش شبكهٔ بولتزمن.

در شکل (۴–۵) خطوط هم تراز موضعی دما در Re=100 و به ازای ضرایب توانی مختلف نشان داده شده است. مطابق این شکل، با افزایش ضریب توانی، توسعه یافتگی حرارتی به تعویق می افتد. همچنین نمودارهای دمای بی بعد عرضی داخل کانال در مقاطع مختلف به ازای Re=100 و ضرایب توانی مختلف نیز در شکل (۴–۶) نشان داده شده است. مطابق این شکل ها، دما نیز همچون نمودار سرعت با فاصله گرفتن از مقطع ورودی به شکل سهموی در می آید. به منظور بررسی نمودار دمای بی بعد در مرکز کانال، شکل (۴–۲) ترسیم گردید. در این شکل که در Re=100 و به ازای ضرایب توانی مختلف ترسیم شده است، نتایج شبیه سازی با نرم افزار کمسول را

نیز شامل می شود، مطابق شکل، روش شبکهٔ بولتزمن کاملاً منطبق بر نتایج نرم افزار کمسول می باشد.

طول توسعه یافتگی حرارتی نیز از این شکل قابل محاسبه است. طبق تعریف فصل قبل و با استفاده از رابطهٔ (۴–۱) [65]

$$\frac{l_T}{D_H} = 0.008 \, Re \, Pr \tag{1-f}$$

طول توسعه یافتگی حرارتی در حالت نیوتنی برابر $l_T = 0.56 D_H$ می باشد در حالی که در شبیه سازی انجام گرفته مقدار $l_T = 0.515 D_H$ به دست آمده است. نتیجهٔ بدست آمده با نتیجهٔ تحلیلی ٪۸٫۰۳ خطا دارد.



شکل(۴–۵) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100 و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۴-۴) نمودارهای دمای بی بعد عرضی داخل کانال در مقاطع مختلف به ازای Re=100 و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۴-۷) نمودارهای دمای بی بعد طولی در موقعیت y/H=0.5 به ازای Re=100 و ضرایب توانی مختلف و

مقايسه آن با نرم افزار كمسول.

۴-۳- بررسی موردی انتقال حرارت اطراف تک مانع مربعی

مطابق بخش ۳–۳، بررسی صحت کد عددی انتقال حرارت در حالت وجود مانع نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. بدین منظور انتقال حرارت در کانال حاوی تک مانع مربعی نیز بررسی گردیده است.

الف- اعتبار سنجي با نتايج تركي و همكاران [66]

مطابق شکل (۴–۸)، انتقال حرارت داخل کانال حاوی یک مانع مربعی داغ با هندسهٔ ذکر شده در بخش (۳–۳) در محدودهٔ اعداد رینولدز ۵۰ تا ۲۰۰ و با ثابت نگه داشتن Pr = 0.71، جهت مقایسه با نتایج ترکی و همکاران [66] شبیه سازی شده است.



شکل(۴-۸) شماتیک مانع مربعی داغ داخل کانال.

۴–۳–۱– شرایط مرزی

با در نظر گرفتن شرایط مرزی سرعت بخش ۳–۳–۱۰، دیوارهٔ بالایی و پایینی کانال آدیاباتیک و مانع مربعی داغ با دمای کلی T_H و دمای سیال سرد اطراف T_c در نظر گرفته شد.

۴-۳-۲ نتایج بدست آمده

جهت مقایسهٔ بین نتایج حاصل با نتایج ترکی و همکاران [66]، عدد ناسلت متوسط زمانی در کلیهٔ وجوه مانع (با متوسط گیری از عدد ناسلت متوسط به دست آمده در وجوه مختلف مانع مربعی نسبت به زمان) ، $< \overline{\mathrm{Nu}}$ ، محاسبه گردیده و در اعداد رینولدز مختلف ترسیم گردید که نتیجهٔ این مقایسه در شکل (۴–۹) نشان داده شده است. نتایج حاصل اختلاف اندکی با یکدیگر دارند که نشانهٔ دقت کد عددی می باشد.



شکل(۴–۹) مقایسهٔ بین عدد ناسلت متوسط زمانی بدست آمده با نتایج ترکی و همکاران [66] *در* اعداد رینولدز مختلف.

ب– اعتبار سنجی با نتایج دیمان [67]

جهت بررسی صحت کد عددی در حالت غیر نیوتنی، نتایج دیمان [67] برای جریان اطراف یک مانع مربعی با درصد انسداد $\beta = 1/8$ ، در اعداد رینولدز مختلف دیمان [67] و ضریب توانی ۱٫۵ و عدد پرانتل ۱، مطابق شکل (۴–۸) شبیه سازی شد. فاصلهٔ مکان قرار گیری مانع تا ابتدای کانال نیز $x_u = x/A = 8.5$

۴-۳- ۳- شرایط مرزی

با در نظر گرفتن شرایط مرزی سرعت بخش ۳–۳–۳، دیوارهٔ بالایی و پایینی کانال آدیاباتیک و مانع مربعی داغ با دمای کلی T_H و دمای سیال سرد اطراف T_c ، در نظر گرفته شد.

۴-۳-۴ نتایج بدست آمده

جهت مقایسهٔ بین نتایج حاصل با نتایج دیمان [67]، عدد ناسلت میانگین در کلیهٔ وجوه مانع، $Nu_t < Nu_t > 0$ ، محاسبه گردیده و سپس میانگین ها در اعداد رینولدز مختلف ترسیم گردید که نتیجهٔ این مقایسه در شکل (۴–۱۰) نشان داده شده است. نتایج حاصل از انطباق بالایی برخوردار هستند که نشانهٔ دقت کد عددی در حالت غیرنیوتنی می باشد.



شکل(۴–۱۰) مقایسهٔ بین عدد ناسلت متوسط بدست آمده با نتایج دیمان [67] در اعداد رینولدز مختلف و ضریب توانی ۱٫۵.

ج- اعتبار سنجى با نتايج پاليوال و همكاران [70]

جهت بررسی صحت کد حرارتی در حالت غیر نیوتنی، نتایج پالیوال و همکاران [70] برای جریان اطراف یک مانع مربعی با درصد انسداد β-1/15، در رینولدز ۴۰ و ضرایب توانی مختلف و عدد پرانتل ۱ شبیه سازی شد.

۴-۳-۳ شرایط مرزی

با در نظر گرفتن شرایط مرزی سرعت بخش ۳–۳–۴، دیوارهٔ بالایی و پایینی کانال آدیاباتیک و مانع مربعی داغ با دمای کلی T_H و دمای سیال سرد اطراف T_c ، در نظر گرفته شد.

۴-۳-۴ نتایج بدست آمده

جهت مقایسهٔ بین نتایج حاصل با نتایج پالیوال و همکاران [70]، عدد ناسلت میانگین در کلیهٔ وجوه مانع، < *Nu_t* »، محاسبه گردیده و سپس میانگین ها در اعداد رینولدز مختلف ترسیم گردید که نتیجهٔ این مقایسه در شکل (۴–۱۱) نشان داده شده است. نتایج حاصل با دقت کمتر از ۱٫۵٪ با نتایج مرجع منطبق است.



شکل (۴–۱۱) مقایسهٔ بین عدد ناسلت متوسط بدست آمده با نتایج پالیوال و همکاران [70] در رینولدز ۴۰ و ضرایب

توانی مختلف.

۴-۴ بررسی انتقال حرارت اطراف تک مانع مربعی

در این بخش انتقال حرارت تک مانع مربعی اشاره شده در بخش ۳–۳، در درصدهای انسداد مختلف ۱/۸، ۱/۴ و ۱/۲ و اعداد رینولدز مختلف ۱۰۰، ۲۰۰ و ۳۰۰ و عدد پرانتل ثابت ۰٫۷، مطابق شکل (۳–

۴-۴-۱-۱ شرایط مرزی

با در نظر گرفتن شرایط جریان اشاره شده در بخش ۳–۴، دمای کل مانع T_H فرض شد که یک سیال سرد اطراف آن را احاطه کرده است. در ورودی جریان نیز دمای یکنواخت T_c در نظر گرفته شد. جهت شرط مرزی دما ثابت T_w برای دیواره های بالا و پایین، از روش محمد [47] استفاده گردیده است. در خروجی نیز از شرط مرزی دمای خروجی [47] استفاده شده است.

به منظور رسیدن به حالت توسعه یافتگی در حالت دما نیز، طول صفحات به اندازهٔ کافی طویل در نظر گرفته شده است. شبکه بندی انجام گرفته نیز دقیقاً همان شبکه بندی ذکر شده در فصل قبل می باشد.

۴-۴- ۲- نتایج بدست آمده

بدون شک، تغییر میدان جریان ناشی از مقدار ضریب توانی n، مستقیماً بر روی میدان دمای اطراف مانع مربعی تاثیر می گذارد و در نتیجه باعث تغییر انتقال حرارت می گردد. بدین منظور خطوط هم دمای موضعی دما در داخل کانال مطابق شکل های (۴–۱۲) تا (۴–۲۰) در ضرایب توانی و اعداد رینولدز مختلف و در درصد انسداد های متفاوت ترسیم گردید. با توجه به اینکه سیال ورودی سرد بوده و سیلندر مربعی گرم می باشد، با عبور جریان سیال از روی مانع، حرارت به میدان جریان انتقال می یابد. همچنین به دلیل اختلاف دمای بین سیال سرد و سطح گرم مانع، لایهٔ مرزی گرمایی بر روی سیلندر تشکیل شده است. با افزایش ضریب توانی و افزایش عدد رینولدز، نفوذ لایه سرد سیال به داخل کانال افزایش می یابد. تغییر درصد انسداد بر میزان توزیع دمای داخل کانال نیز تاثیر گذاشته و افزایش درصد انسداد منجر به پخش بیشتر گرما در پشت مانع می گردد. با توجه به اینکه سیال سرد به صفحه گرم برخورد می کند، لذا بیشترین مقدار انتقال حرارت در سطح جلویی رخ می دهد. این سطح لایه مرزی گرمایی نازک تر و گرادیان دمایی بیشتری دارد. کمترین مقدار انتقال حرارت نیز مربوط به سطح پشت سیلندر است. در این سطح گردابه های تشکیل شده، گرمای سیلندر را در خود نگه داشته و اختلاف دمای بین سیال و صفحات را کاهش می دهد. در صفحات بالا و پایین نیز همزمان با افزایش ضخامت لایه مرزی گرمایی، گرادیان دما کاهش یافته و انتقال حرارت نیز کاهش می یابد.



شکل(۴-۱۲) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد $\beta = 1/8$ ، $\beta = 100$ و ضرایب توانی مختلف



شکل(۴–۱۳) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد $\beta = 1/8$ ، Re=200 و ضرایب توانی مختلف



شکل(۴-۴) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد $\beta = 1/8$ ، Re=300 و ضرایب توانی مختلف



شکل(۴–۱۵) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد $\beta = 1/4$ ، Re=100 و ضرایب توانی مختلف



شکل(۴–۱۶) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد $\beta = 1/4$ ، Re=200 و ضرایب توانی مختلف



شکل(۴-۱۷) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد $\beta = 1/4$ ، $\beta = 300$ و ضرایب توانی مختلف



شکل(۴-۱۸) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد $\beta = 1/2$ ، $\beta = 100$ و ضرایب توانی مختلف



شکل(۴-۱۹) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد $\beta = 1/2$ ، $\beta = 200$ و ضرایب توانی مختلف



شکل($\beta = 1/2$) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در درصد انسداد $\beta = 1/2$ ، $\beta = 1/2$ و ضرایب توانی مختلف



می گردد. آشکار است که برداشتن گردابه جریان بر روی میدان دما نیز تاثیر می گذارد.

در شکل (۴–۲۱) نیز خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در اعداد رینولدز بحرانی مشاهده

در شکل (۴-۲۲) مقایسهٔ بین توزیع دمای داخل کانال در روش شبکهٔ بولتزمن و نرم افزار کمسول در عدد β=1/4 ،Re=100 و دو ضریب توانی ۲٫۷ و ۱٫۳ نشان داده شده است. مطابق این شکل، افت دمای بیشتری با افزایش ضریب توانی مشاهده می شود. همچنین بیشینه مقدار پروفیل دما، در پشت مانع بیشتر از جلوی مانع است.

شکل(۴–۲۱) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در رینولدز بحرانی، درصد انسداد $\beta = 1/2$ و ضرایب توانی مختلف



شکل(۴-۲۲) نمودارهای دمای عرضی داخل کانال در مقاطع مختلف به ازای $\beta = 1/4$ ، Re=100 و ضرایب توانی

در شکل (۴–۲۳) تا (۴–۲۵)، عدد ناسلت موضعی برای اعداد رینولدز ۱۰۰ تا ۳۰۰، ضرایب توانی مختلف و درصد انسداد $\beta = 1/4$ نشان داده شده است. مطابق این شکل مقدار، عدد ناسلت موضعی در طول کانال با افزایش عدد رینولدز در ضریب توانی ثابت، افزایش می یابد. قابل توجه است که با نزدیک شدن به مانع مربعی به علت گرادیان دمای بالا، مقدار عدد ناسلت موضعی افزایش می یابد. همچنین با افزایش ضریب توانی n در عدد رینولدز ثابت، میزان عدد ناسلت موضعی کاهش می یابد. تطابق بالای بین دو روش نیز قابل مشاهده است.



شکل(۴-۲۳) مقایسه بین نتایج حل عددی و نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار کمسول برای عدد ناسلت محلی در دیوارهٔ پایینی در اعداد رینولدز مختلف و ضریب توانی ۰٫۷.



شکل(۴-۲۴) مقایسه بین نتایج حل عددی و نتایج حاصل از شبیه سازی با نرم افزار کمسول برای عدد ناسلت محلی در دیوارهٔ پایینی در اعداد رینولدز مختلف و ضریب توانی ۱٫۳.

جهت بررسی نحوهٔ تاثیر تغییرات عدد رینولدز، درصد انسداد و ضریب توانی، از مقادیر عدد ناسلت موضعی بدست آمده در بازهٔ x/L=۰,۰۴۷ تا ۰٫۱۲۱۶ میانگین گیری شده و نمودار شکل (۴–۲۵) بدست آمد.



عدد ناسلت میانگین بدست آمده وابستگی شدیدی به درصد انسداد و ضریب توانی دارد. با افزایش در در در انسداد، میزان نرخ انتقال حرارت به طور قابل ملاحظه ای افزایش می یابد. به طور کلی در $\beta = 1/2$ و ضریب توانی n=0.7، میزان عدد ناسلت میانگین، بیشترین مقدار خود را دارد. قابل ذکر است که نرخ انتقال حرارت با افزایش درصد انسداد و عدد رینولدز افزایش یافته اما با افزایش ضریب توانی کاهش می یابد.

۴–۵– انتقال حرارت در محیط متخلخل

مطابق بخش ۳–۵، در این بخش به بررسی پدیدهٔ انتقال حرارت در کانال حاوی مادهٔ متخلخل بررس. در حالت اول با شده است. پدیدهٔ انتقال حرارت در حالت اول با نصب موانع مربعی منظم به صورت موضعی با چیدمان های مختلف، در اعداد رینولدز مختلف و ضرایب توانی متعدد و در حالت دوم با در نظر گرفتن یک بلوک متخلخل با چیدمان بلوک های مربعی منظم و نامنظم، در اعداد رینولدز، ضرایب توانی، درصد انسداد و نسبت تخلخل متفاوت در داخل کانال، پدیدهٔ انتقال حرارت بررسی می گردد.

۴-۵-۱ انتقال حرارت در محیط متخلخل موضعی منظم

با توجه به عدم وجود مطالعات، در زمینهٔ استفاده از روش شبکهٔ بولتزمن در شبیه سازی میدان دما بین دو صفحه موازی بی نهایت که به صورت موضعی دارای محیط متخلخل منظم باشد، در این بخش انتقال حرارت بین دو صفحه موازی با حل همزمان تابع جریان و دمای مربوطه شبیه سازی شده، سپس به منظور بررسی محیط متخلخل، آرایشی از بلوک های جامد عایق بین دو صفحه قرار گرفته و انتقال حرارت در اعداد رینولدز مختلف با استفاده از مدل توانی در ضرایب توانی ۸٫۰۰ و ۱٫۲ و دری بررسی گردیده است که در نتیجه نوآوری این بخش با توجه به عدم وجود مطالعه ای در حل عددی انتقال حرارت در مقیاس حفره آشکار می گردد. هندسهٔ مورد بررسی در شکل (۳–۲۷) نشان داده شده است.

۴–۵– ۱–۱– شرایط مرزی

در ورودی از شرط سرعت ثابت $0 = T_c$ و در دیواره های کانال از شرط دمای ثابت $T_H = 1$ استفاده گردیده است. در این مطالعه از روش معرفی شده توسط محمد [47] جهت اعمال شرط مرزی دما ثابت و شرط مرزی حرارتی خروجی استفاده شد. به منظور محاسبهٔ تابع توزیع دما در محیط متخلخل عایق، فرض می شود که گرادیان تابع توزیع احتمال در جهت عمود بر دیواره برابر صفر است که مشابه اعمال شرط بونس بک برای سرعت است. در شبیه سازی انجام شده از ضخامت صفحات صرفنظر گردیده و به منظور رسیدن به حالت توسعه یافتگی، طول صفحات به اندازهٔ کافی طویل در نظر گرفته شد. تعداد گره ها نیز دقیقاً مشابه بخش ۳–۵–۲ می باشد.

۴-۵-۱-۲- نتایج بدست آمده

همان گونه که انتظار می رود، تغییر در مسیر حرکت جریان ناشی از حضور محیط متخلخل، بر روی رفتار حرارتی کانال تاثیر می گذارد. بدین منظور شکل های (۴–۳۱) تا (۴–۳۱) جهت بررسی خطوط هم تراز دما در اعداد رینولدز مختلف و به ازای آرایش ها و ضرایب توانی متفاوت ترسیم گردیده است. مطابق این شکل ها با افزایش تعداد موانع که با کوچک شدن ابعاد آنها همراه است، در ضریب توانی ثابت، توسعه یافتگی حرارتی تسریع شده و همچنین افزایش ضریب توانی نیز در یک آرایش معین، باعث به تعویق انداختن توسعهیافتگی حرارتی می گردد. اثر مشابه با افزایش عدد رینولدز نیز قابل رویت است. قابل ذکر است که سرعت انتقال دمای دیواره ها به مرکز کانال، با افزایش ضریب توانی و کاهش تعداد موانع مربعی، کاهش می یابد که به علت افزایش سرعت داخل محیط متخلخل است.



شکل(۴-۲۶) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در آرایش 4*4، Re=100 و ضرایب توانی مختلف



شکل(۴-۲۷) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در آرایش 4*4، Re=300 و ضرایب توانی مختلف


شکل(۴–۲۸) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در آرایش 7*7، Re=100 و ضرایب توانی مختلف



شکل(۴–۲۹) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در آرایش Re=300 ،7*7 و ضرایب توانی مختلف



شکل(۴-۳۰) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در آرایش 10*10، Re=100 و ضرایب توانی مختلف



شکل(۴-۳۱) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در آرایش 10*10، Re=300 و ضرایب توانی مختلف

نمودار دمای بیبعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در Re=300 در موقعیت های مختلف در شکل (۴-۳۲) نشان داده شده است. این شکل به خوبی نمودار دمای بیبعد را در قبل از محیط متخلخل نشان می دهد.



شکل (۴-۳۲) نمودار دمای بیبعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در Re=300 در موقعیت های مختلف.

نحوهٔ تاثیر محیط متخلخل و عدد رینولدز بر روی عدد ناسلت متوسط در شکل (۴–۳۳) نشان داده x/L=0.33 تا 3.20 x/L=0.033 شده است. این شکل با متوسط گیری عدد ناسلت محلی در فاصلهٔ x/L=0.033 تا در فرد. بدست آمده است. مطابق این شکل کاهش ضریب توانی، باعث افزایش عدد ناسلت متوسط می شود. افزایش تعداد موانع مربعی نیز تاثیر مثبت بر بهبود نرخ انتقال حرارت دارد. همچنین افزایش عدد رینولدز و استفاده از محیط متخلخل باعث افزایش عدد ناسلت متوسط می گردد.



شکل (۴–۳۳) نمودار عدد ناسلت متوسط بر حسب عدد رینولدز در آرایش های مختلف.

۴-۵-۲ انتقال حرارت در کانال حاوی بلوک متخلخل

در این بخش انتقال حرارت در کانال حاوی بلوک متخلخل حاوی موانع مربعی عایق با دمای دیوارهٔ کانال ثابت که در بسیاری از مبدل های حرارتی صنعتی کاربرد دارد، مطابق بخش ۳–۵–۲ بررسی گردیده است. هندسهٔ مورد بررسی در شکل (۳–۳۹) و (۳–۴۰) نشان داده شده است.

۴–۵– ۲–۱– شرایط مرزی

در ورودی از شرط دما ثابت $0 = T_c$ و در دیواره های کانال از شرط دمای ثابت $T_H = 1$ استفاده گردیده است. در این مطالعه از روش معرفی شده توسط محمد [47] جهت اعمال شرط مرزی دما ثابت و شرط مرزی حرارتی خروجی استفاده شده و به منظور محاسبهٔ تابع توزیع دما در محیط متخلخل عایق، فرض می شود که گرادیان تابع توزیع احتمال در جهت عمود بر دیواره برابر صفر است که مشابه اعمال شرط بونس بک برای سرعت است. در شبیه سازی انجام شده از ضخامت صفحات صرفنظر گردیده و به منظور رسیدن به حالت توسعه یافتگی، طول صفحات به اندازهٔ کافی طویل در نظر گرفته شده است. عدد پرانتل نیز ۲,۰ فرض شده است.

مطابق بخش ۳–۵–۲ استقلال شبکه در حالت گرمایی نیز با سه شبکه بندی اشاره شده در فصل قبلی بررسی گردیده است. بدین منظور عدد ناسلت متوسط بر روی دیوارهٔ پایینی کانال در محدودهٔ بلوک متخلخل در سیال نیوتنی به ازای رینولدزهای مختلف، برای نسبت تخلخل ۸۸,۰ و درصد انسداد ۱/۴، در هر شبکه بندی محاسبه و جدول (۴–۱) به دست آمده است. نتایج بدست آمده حاکی از این است که اختلاف کمتر از ٪۱ بین نتایج شبکه بندی های ۳۰۰۱ «۹۷ و ۶۰۰۹ هو ۱۹۳۶ وجود دارد.

عدد رينولدز	تعداد گره ها	عدد ناسلت متوسط	درصد خطا $\left rac{\mathrm{Nu}_{\mathrm{new}} - \mathrm{Nu}_{\mathrm{old}}}{\mathrm{Nu}_{\mathrm{new}}} imes 100 ight $
	49 ×1501	11.76770	
100	97 ×3001	11.75223	0.131635
	193 × 6001	11.65693	0.817539
	49 ×1501	11.78792	
200	97 ×3001	12.03859	2.082221
	193 × 6001	12.02232	0.135332
	49 ×1501	12.27883	
300	97 × 3001	12.67682	3.13951
	193 × 6001	12.78350	0.834513
	49 ×1501	12.89510	
400	97 × 3001	13.52252	4.639816
	193 × 6001	13.63607	0.832718

A/H=1/4 جدول (۴–۱) تاثیر اندازهٔ شبکه بر روی عدد ناسلت متوسط در سیال نیوتنی در حالت ۱، $\varepsilon = 0.88$ و

همچنین تاثیر شبکه بندی بر روی عدد ناسلت متوسط در دیوارهٔ پایینی کانال در محدودهٔ بلوک متخلخل در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی به ازای رینولدزهای مختلف، برای نسبت تخلخل ۸۸,۰ و درصد انسداد ۱/۴، محاسبه گردیده که نتایج مقایسه در شکل (۴–۳۴) مشاهده می شود که نشان دهندهٔ اختلاف کمتر از ٪۱٫۵ بین نتایج شبکه بندی دوم و سوم است. با توجه به اینکه در حالت شبکه بندی سوم مدت زمان سپری شده تا رسیدن به نتایج کمتر از سه برابر مدت زمان شبکه بندی دوم است، لذا شبکهٔ ۲۰۰۱* ۹۷ بهترین انتخاب ممکن خواهد بود.



شکل (۴–۳۴) تاثیر اندازهٔ شبکه بر روی عدد ناسلت متوسط در سیالات نیوتنی و غیرنیوتنی در حالت ۱، 0.88=3 و

.A/H=1/4

در شکل (۴–۳۵) همگرایی و پایداری حل عددی مورد استفاده با بررسی عدد ناسلت متوسط در دیوارهٔ پایینی کانال در محدودهٔ بلوک متخلخل در سیال نیوتنی به ازای Re=100، برای نسبت تخلخل ۰٫۸۸ و درصد انسداد ۱/۴ نشان داده شده است.



شکل (۴–۳۵) تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب تعداد تکرارها در سیال در حالت ۱، A/H=1/4 و

.Re=100

۴-۵-۲-۲-۱ نتایج بدست آمده

خطوط هم تراز موضعی دما در آرایش های مختلف محیط متخلخل، درصد انسداد ۱/۴، ۱/۲ و ۱/۸ به ازای ضرایب توانی متعدد در شکل های (۴–۳۶) تا (۴–۴۵) نشان داده شده است.



شکل(۴-۳۶) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، Re=1/4 ، β =1/4 هم تراز موضعی دما داخل کانال در

آشکار است که توزیع دما داخل کانال با تغییر چیدمان موانع مربعی، درصد انسداد و ضرایب توانی تغییر می کند. با افزایش ضریب توانی، رشد ناحیهٔ سرد ورودی به داخل کانال افزایش می یابد و با بزرگ شدن درصد انسداد بلوک متخلخل، لایه مرزی گرمایی تشکیل شده بر روی دیوارهٔ کانال نازک تر می شود.











شکل(۴-۳۹) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، β=1/4، ε=0.88، حالت ۴و ضرایب توانی



شکل(۴-۴۰) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، β=1/2، ε=0.88، ree)، حالت 1 و ضرایب توانی







شکل(۴۱-۴) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، β=1/2، ε=0.88، re=100، حالت ۲ و ضرایب توانی





شکل(۴۲-۴) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، β=1/2، ε=0.88، re=100، حالت ۳ و ضرایب توانی





شکل(۴–۴۳) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=100، Re=1/8، β =1/8، β =1/8) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در







مختلف.









در شکل های (۴–۴۶) تا (۴–۵۴) خطوط هم تراز موضعی داخل کانال در عدد رینولدز ۳۰۰، در شکل های (۴–۴۶) تا (۵۴–۵۴) خطوط هم تراز موضعی داخل کانال در عدد رینولدز ۱/۴ و ۵۰۰ و ۵۰

شده است. با افزایش عدد رینولدز و افزایش ضریب توانی n، سرعت انتقال ناحیهٔ سرد ورودی به داخل کانال با افزایش چشمگیری همراه است. برداشتن گردابه مشاهده شده در بخش ۳–۵–۲–۲ نیز تاثیر خود را در پروفیل حرارتی می گذارد که در شکل های (۴–۴۹) تا (۴–۵۱) نشان داده شده است.





شکل(۴-۴۷) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، β=1/4، ε=0.88، Re=300، حالت ۲ و ضرایب توانی







شکل(۴۹-۴۹) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، Re=1/2، ε=0.88، حالت 1 و ضرایب توانی



شکل(۴-۵۰) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، Re=1/2، ε=0.88، حالت ۲ و ضرایب توانی



شکل(β-۵۱-۴) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، Re=3، حالت ۳ و ضرایب توانی









شکل(۴-۵۲) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، β=1/8، ε=0.88، حالت ۱ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۴-۵۳) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، β=1/8، حالت ۲ و ضرایب توانی مختلف.



شکل(۴-۴) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در Re=300، Re=3، حالت ۳ و ضرایب توانی شکل(۴-۵۴) خطوط هم تراز موضعی دما داخل کانال در

بدون شک تغییرات در میدان جریان ناشی از تغییرات ضریب توانی و آرایش موانع، مستقیماً بر میدان جریان و نرخ انتقال حرارت تاثیر می گذارد. با تغییر ساختار بلوک متخلخل و ضریب توانی، نمودار دمای بی بعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی دمای بی بعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در مای بی بعد عرضی در آرایش ها و ضرایب توانی مختلف در 100–48، Re=0.88, x/L = 0.084 ، Re=100 و خانه شده است. همچنین نمای نزدیکتری از این اشکال نیز مشاهده می شود. مطابق این شکل ها، محیط متخلخل باعث افزایش توزیع دما داخل بلوک متخلخل شده و بیشترین مقدار دمای بی بعد در محال های (۴–۵۵) تا (۴–۵۵) نشان مختلف در مات. همچنین نمای نزدیکتری از این اشکال نیز مشاهده می شود. مطابق این شکل ها، محیط متخلخل باعث افزایش توزیع دما داخل بلوک متخلخل شده و بیشترین مقدار دمای بی بعد در حالت سوم مرتبط با آرایش چیدمان تصادفی موانع مربعی مشاهده می گردد. در این آرایش، بیشترین مقدار دمای بی بعد در حالت اول با آرایش مقدار در حالت های (۱۰–۹۷) برابر مقدار به دست آمده در حالت اول با آرایش مقدار در حالت های (۱۰–۹۷) برابر مقدار به دست آمده در حالت اول با آرایش مقدار در حالت های (۱۰–۹۷) برابر مقدار به دست آمده در حالت اول با آرایش مقدار در حالت های (۱۰–۹۷) برابر مقدار به دست آمده در حالت اول با آرایش مقدار در حالت های (۱۰–۹۷) برابر مقدار به دست آمده در حالت اول با آرایش مقدار در حالت های (۱۰–۹۷) برابر مقدار به دست آمده در حالت اول با آرایش منظم است. همچنین این مقدار در حالت های (۱۰–۹۱ و 10) به به برتیب برابر باز این می برایز می باشد. با افزایش می یابد که به علت منظم است. همچنین این مقدار در حالت های (۱۰–۹۱ و 20) می باشد.



،x / L = 0.084 ،Re=100 ،n=0.8 شکل (۴–۵۵) الف) نمودار دمای بی بعد عرضی در آرایش های مختلف در β =1/4 و ϵ =0.88



، $x \, / \, L = 0.084$ ،Re=100 ،n=1.0 شکل (۴-۵۶) الف) نمودار دمای بی بعد عرضی در آرایش های مختلف در (۵۶-۴ مال) الف



.A و $\beta=1/4$ و $\varepsilon=0.88$ ب) نمای نزدیکتر در نقطه $\varepsilon=0.88$

،x / L = 0.084 ،Re=100 ،n=1.2 شکل (۴–۵۷) الف) نمودار دمای بیبعد عرضی در آرایش های مختلف در (-4-4) شکل (۴–۵۷) الف) نمودار دمای $\beta = 1/4$ و $\epsilon = 0.88$

در شکل (۴–۵۸) تا (۴–۹۱) تغییرات عدد ناسلت محلی بر حسب عدد بی بعد (Re.Pr) در (α -۴) در اعداد رینولدز و ضرایب توانی مختلف در $\beta=1/4$ و $\beta=1/4$ برای حالت های مختلف قرارگیری موانع مربعی، در دیوارهٔ پایین کانال نشان داده شده است.

مطابق این شکل ها، عدد ناسلت با تغییر ضریب توانی n و عدد رینولدز تغییر می کند. افزایش درجهٔ نازک شوندگی (کاهش مقدار n)، نرخ انتقال حرارت را افزایش می دهد که این امر به علت پایین آمدن ویسکوزیته موثر سیال ناشی از گرادیان تند نزدیک بلوک متخلخل است. در نتیجه این نوع سیالات (n<1) بهترین انتقال حرارت را میسر می سازند و جهت افزایش انتقال حرارت، بیشتر مورد توجه هستند.

مطابق شکل بالا، مقدار عدد ناسلت محلی به طور ناگهانی به بیشترین مقدار خود در موقعیت بلوک متخلخل می رسد. این امر متاثر از این حقیقت است که در این موقعیت، سیال متمرکز شده و شتاب سیال نزدیک دیوارهٔ کانال افزایش می یابد. بیشترین مقدار عدد ناسلت تقریباً در قسمت انتهایی بلوک متخلخل رخ می دهد. پس از این قسمت، عدد ناسلت به صورت پیوسته کاهش می یابد. قابل ذکر است که عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز افزایش می یابد که این امر ناشی از میزان سرعت بالاتر در نزدیکی دیوارهٔ کانال در اعداد رینولدز بالاتر است.







شکل (۴–۵۸) نمودار تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی عدد ناسلت محلی در ضرایب توانی مختلف برای حالت اول،

ε=0.88 و β=1/4 در ديوارهٔ پايين کانال.





شکل (۴–۵۹) نمودار تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی عدد ناسلت محلی در ضرایب توانی مختلف برای حالت دوم،

ε=0.88 و β=1/4 در ديوارهٔ پايين کانال.





شکل (۴-۶۰) نمودار تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی عدد ناسلت محلی در ضرایب توانی مختلف برای حالت سوم،

```
ε=0.88 و β=1/4 در ديوارهٔ پايين کانال.
```





شکل (۴–۶۱) نمودار تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی عدد ناسلت محلی در ضرایب توانی مختلف برای حالت چهارم، ε=0.88 و β=1/4 در دیوارهٔ پایین کانال.

در شکل (۴–۶۲) و (۴–۶۳) نمودار عدد ناسلت در دیواره بالایی و پایینی کانال به ازای ضرایب توانی و حالت های مختلف در عدد رینولدز ۱۰۰، درصد تخلخل ۰٫۸۸ و درصد انسداد ۱/۴ و ۱/۲ محاسبه گردیده است. مطابق این شکل ها در حالت آرایش منظم تفاوتی بین نتایج وجود ندارد اما با تغییر از حالت منظم به نامنظم به علت چیدمان متفاوت موانع مربعی، عدد ناسلت دیواره بالا متفاوت از پایین است.




شکل (۴-۶۲) نمودار تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی عدد ناسلت محلی در ضرایب توانی مختلف برای حالت اول،

ε=0.88 و β=1/4 ور دیواره بالایی و پایینی کانال.





شکل (۴- ۶۳) نمودار تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی عدد ناسلت محلی در ضرایب توانی مختلف برای حالت اول، ε=0.88 و β=1/2 در دیواره بالایی و پایینی کانال.

با بررسی حالت های مختلف از آرایش موانع مربعی، محدودهٔ اطمینان^۱ عدد ناسلت محلی مطابق شکل های (۴–۶۴) تا (۴–۵۵) در اعداد رینولدز ۱۰۰ و ۳۰۰ و ضرایب توانی مختلف در 8.0=ع و β=1/4 مشخص گردید. مطابق این شکلها، آرایش نامنظم از موانع مربعی، بهترین تاثیر را در میزان انتقال حرارت دارد. همچنین با افزایش ضریب توانی n، میزان عدد ناسلت کاهش می یابد. تاثیر معکوس با افزایش عدد رینولدز مشاهده می گردد.

¹ Confidence interval



شکل (۴-۴) نمودار مقایسهٔ عدد ناسلت محلی در حالت های مختلف در $\beta=1/4$ و $\beta=1/4$ در دیوارهٔ پایین

كانال الف) Re=300 ب) Re=300.





شکل (۴–۶۵) نمودار مقایسهٔ عدد ناسلت محلی در حالت های مختلف در $\beta=1.0$ ، $\beta=1/4$ و $\beta=1/4$ در دیوارهٔ پایین



شکل (۴-۶۶) نمودار مقایسهٔ عدد ناسلت محلی در حالت های مختلف در β =1.2 و β =1/4 و در دیوارهٔ پایین

كانال الف) Re=300 ب) Re=300.

بیشترین مقدار مشاهده شده عدد ناسلت محلی در حالت سوم، ضریب توانی ۰٫۲ و عدد رینولدز ۳۰۰ برابر ۶۰٫۱۲۴۳ می باشد که نشانگر قابلیت به کارگیری بلوک متخلخل با ضریب توانی پایین در افزایش انتقال حرارت در کانال است.

شکل های (۴–۶۷) تا (۴–۷۱) تغییرات عدد ناسلت متوسط در محدودهٔ بلوک متخلخل در برابر عدد رینولدز در درصدهای انسداد مختلف ۱/۸، ۱/۴ و ۱/۲ و ضرایب توانی متفاوت را در آرایش های مختلف موانع مربعی نشان می دهد که در برگیرندهٔ محدودهٔ اطمینان نیز هست. این شکل ها با متوسط گیری از عدد ناسلت محلی از x/L=0.08033 تا ۲۰۸۸۳۳ محاسبه گردیده است. مطابق این شکل ها رفتار گرمایی با نصب بلوک متخلخل داخل کانال برای هر سه نوع سیال مورد استفاده، بهتر گردیده است. همچنین آشکار است که حالت آرایش نامنظم بهترین تاثیر را دارد.





شکل (۴-۶۷) نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط در حالت و درصدهای انسداد مختلف بر حسب عدد رینولدز در

.e=0.88 .n=0.2





شکل (۴-۶۸) نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط در حالت و درصدهای انسداد مختلف بر حسب عدد رینولدز در

.e=0.88 .n=0.4





شکل (۴-۶۹) نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط در حالت و درصدهای انسداد مختلف بر حسب عدد رینولدز در



.e=0.88 .n=0.8



شکل (۴-۷۰) نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط در حالت و درصدهای انسداد مختلف بر حسب عدد رینولدز در

.e=0.88 .n=1.0





شکل (۴–۷۱) نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط در حالت و درصدهای انسداد مختلف بر حسب عدد رینولدز در ε=0.88 n=1.2.

با توجه به جنبه های رئولوژیکی و در نظر گرفتن شکل های قبل، مساله ای که به چشم می خورد کاهش عدد ناسلت متوسط با کاهش درصد انسداد (به علت کاهش ناحیهٔ تخلخل در درصدهای انسداد پایین تر) می باشد. در نتیجه در درصد انسداد ۲/۱ بهترین میزان انتقال حرارت (به علت تعداد بیشتر موانع مربعی در مقابل سایر درصدهای انسداد) به دست آمد و در درصد انسداد ۸/۱ کمترین تاثیر در افزایش انتقال حرارت مشاهده گردید. همچنین افزایش عدد ناسلت متوسط با افزایش عدد رینولدز نیز آشکار است. سیالات نازک شونده نیز بهترین انتقال حرارت را در مقابل سیالات نیوتنی و ضخیم شونده ارائه می دهند. بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط در ضریب توانی ۲٫۰، عدد رینولدز و شریر در درصد انسداد ۲/۱ در حالت آرایش نامنظم موانع مربعی گزارش شد.

به منظور بررسی میزان افزایش نرخ انتقال حرارت در سیالات نازک شونده و مقدار متناظر کاهش آن در سیالات ضخیم شونده در اعداد رینولدز مختلف، شکل (۴–۷۲) ترسیم گردید. این شکل با بی بعد سازی عدد ناسلت متوسط در سیالات نازک شونده و ضخیم شونده بر مقدار متناظر آنها در سیال نیوتنی و در عدد رینولدز یکسان در درصد انسداد ۱/۴ و نسبت تخلخل ۰۸۸ در حالت های مختلف به دست آمده است که بیان کننده این مطلب است که رفتار سیال نازک شونده نسبت به نیوتنی منجر به بهبود نرخ انتقال حرارت در شرایط یکسان شده، در حالیکه سیال ضخیم شونده رفتار معکوسی از خود نشان می دهد.



شکل (۴-۷۲) نمودار تاثیر ضریب توانی n بر روی عدد ناسلت بی بعد در اعداد رینولدز مختلف و A/H=1/4.

درصد افزایش عدد ناسلت متوسط در آرایش نامنظم در مقایسه با منظم در جدول (۴–۲) به ازای نسبت های تخلخل متفاوت و درصدهای انسداد مختلف در حالت سیال نیوتنی نشان داده شده است. با شبیه سازی حالت های مختلف، بیشترین درصد افزایش عدد ناسلت متوسط (از آرایش منظم به نامنظم) در ۲٫۹۵۳–٤، ۸۸٫۰ و ۹۳۸٫۹۰ به ترتیب برابر ۴٫۶۷۴۹٪، ۹٫۸۴۹۶٪ و ۴٫۹۰۸۷٪ و ۴٫۹۰۸٪ در درصد انسداد ۱/۱ ۳٫۳۱۳۹٪، ۵٫۸۰۵۱٪ و ۳٫۱۲۶۶٪ در درصد انسداد ۱/۴ و همچنین ۳٫۴۴۲۷٪، ۲٫۳۲۸۶٪ و ۳٫۰۹۵۱٪ در درصد انسداد ۱/۸ می باشد.

در جدول (۴–۳) مقایسهٔ بین عدد ناسلت متوسط کانال حاوی بلوک متخلخل و کانال فاقد بلوک متخلخل در سیال نیوتنی ارائه شده است. قابل مشاهده است که با افزایش درصد انسداد، عدد ناسلت متوسط (در هر دو حالت آرایش منظم و نامنظم) افزایش می یابد. بیشترین درصد افزایش عدد ناسلت برای درصدهای انسداد ۱/۸، ۱/۴ و ۱/۲ به ترتیب برابر ۳۲,۰۹۳۲٪، ۶۷,۹۸۰۶٪ و ۱۸۱,۷۳۳۱ در نسبت تخلخل ۲۸٫۷۵، ۲۸٫۶۴۰٬۳، ۶۴٫۱۹۸۴٪ و ۱۶۳٫۳۰۵٪ در نسبت تخلخل ۸۸٫۷ و همچنین (۲۷٫۸۰۳ در نسبت تخلخل ۲۹٫۱۵۴۰ می باشد.

جدول (۴-۲) درصد افزایش عدد ناسلت متوسط (از حالت آرایش منظم به نامنظم) در سیال نیوتنی،

Porosity		Blockage ratio			
	Re —	1/8	1/4	1/2	
0.75	100	2.8102	3.1852	4.6749	
	200	3.2506	3.2998	4.3161	
	300	3.3127	3.4439	4.3456	
	400	3.2962	3.3763	4.5384	
0.88	100	2.3286	5.3865	4.8352	
	200	2.3160	5.8051	5.8496	
	300	2.0057	5.0960	5.3460	
	400	1.5778	4.0154	4.8037	
0.9375	100	3.0951	3.1227	4.9087	
	200	2.7741	3.1266	2.3316	
	300	2.1930	2.0192	0.5255	
	400	1.7699	1.1104	0.0047	

(Nu_{Random}-Nu_{Regular})/ Nu_{Regular}

این نتایج نشان می دهد که انتقال حرارت جابجایی سیال به طور قابل ملاحظه ای با افزایش درصد انسداد بویژه در نسبت های تخلخل پایین افزایش می یابد. همچنین بلوک متخلخل با نسبت تخلخل بالا (همچون 0.9375=ع) کمترین تاثیر را در افزایش عدد ناسلت متوسط دارد. در نتیجه می توان گفت که انتقال حرارت کمترین نقش را با افزایش نسبت تخلخل بلوک متخلخل ایفا می کند. مقادیر متوسط عدد ناسلت بر حسب عدد رینولدز در ضرایب توانی مختلف و در درصدهای انسداد متفاوت در شکل (۴–۷۲) نشان داده شده است. جدول (۴–۳) افزایش عدد ناسلت متوسط در کانال حاوی بلوک متخلخل نسبت به کانال فاقد بلوک متخلخل در سیال

	Re	Blockage ratio					
Porosity		1/8		1/4			1/2
		Regular	Random	Regular	Random	Regular	Random
		case	case	case	Case	case	Case
0.75	100	28.9240	32.0932	62.7952	67.9806	159.3365	171.4604
	200	27.1886	30.4731	61.6366	66.9057	162.1167	173.4299
	300	26.1592	29.3016	60.9269	66.2599	164.6277	176.1275
	400	25.4802	28.4000	60.7455	66.0443	169.5018	181.7331
0.88	100	23.5497	28.6403	55.6779	64.1984	144.3542	161.7176
	200	21.8908	26.9694	54.6291	62.5104	148.2456	163.3053
	300	20.8737	25.2652	53.5782	59.6378	150.0120	160.7798
	400	20.1476	23.6805	52.5833	56.2893	150.6423	157.8546
0.9375	100	23.9663	27.8033	48.2003	54.1548	127.0505	138.1958
	200	22.1285	25.5162	46.6299	49.4822	129.4731	134.8236
	300	20.6682	23.3145	44.3348	44.4037	125.7043	126.3410
	400	19.3108	21.4225	41.7209	40.4296	120.2472	120.2482

(Nu-Nu_Channel)/ Nu_Channel ، نيوتنى ،





شکل (۴–۷۳) نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط در حالت و درصدهای انسداد مختلف بر حسب عدد رینولدز در ε=0.88.

بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط برابر ۶۰٬۱۲۴۳ (مشابه مقدار عدد ناسلت گزارش شده توسط محمد [69]) در حالت آرایش نامنظم، A/H=1/2 و عدد رینولدز ۳۰۰ به دست آمد. مقایسهٔ بین تمام حالت ها بیانگر این است که درصد انسداد ۱/۲ بهترین تاثیر در بهبود انتقال حرارت را دارد. به منظور بررسی تاثیر نسبت تخلخل بر روی میزان انتقال حرارت، شکل (۴–۷۴) در عدد رینولدز ۳۰۰ و ۲/۲=A/H ترسیم گردید. مطابق این شکل، میزان نرخ انتقال حرارت ارتباط مستقیمی با آرایش موانع، درصد انسداد، عدد رینولدز و نسبت تخلخل دارد. به هر حال نسبت تخلخل ۰٫۷۵ بهترین انتقال حرارت را به ارمغان می آورد. بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط برابر ۲۸٬۱۱۵۰ در حالت آرایش نامنظم، نسبت تخلخل ۰٫۷۵ و درصد انسداد ۱/۲ مشاهده گردید. همچنین نسبت تخلخل ۵٫۹۳۵ و درصد انسداد ۱/۲ مشاهده انتیر در افزایش نرخ مخلخل ۰٫۹۳۷۵ و درصد انسداد ۱/۸ در هر سه حالت ضریب توانی n کمترین تاثیر در افزایش نرخ انتقال حرارت به علت کاهش سطح تماس بین سیال و محیط متخلخل را دارد.

کاهش نفوذپذیری به معنی کمترین حجم خالی در بلوک متخلخل برای عبور جریان سیال بوده و به معنی افزایش تعداد موانع مربعی است. این امر باعث افزایش سطح تماس بین سیال و محیط متخلخل و افزایش اصطکاک بین آنها می گردد. کاهش نفوذپذیری باعث می شود که سیال به فضای خالی بین بلوک متخلخل و دیوارهٔ کانال هدایت شده، گرادیان سرعت در دیواره کانال بالا رفته، تنش برشی افزایش یافته و در نهایت افت فشار ازدیاد گردد.



شکل (۴-۷۴) نمودار تغییرات عدد ناسلت متوسط بر حسب نسبت تخلخل در حالت ها و ضرایب توانی مختلف در Re=300 و A/H=1/2.

از نقطه نظر کاربردهای مهندسی، به دست آوردن یک رابطه مبتنی بر نتایج اشاره شده، بسیار مناسب است. بدین منظور با بررسی درصدهای انسداد مختلف با آرایش موانع مربعی متفاوت، روابطی برای پیش بینی عدد ناسلت در آرایش های منظم و نامنظم به دست آمد.

√ در حالت آرایش منظم، عدد ناسلت متوسط تابعی از Re^{0.098} ،R^{-0.38} و ε^{-0.38}
 ∞ می باشد.

 $e^{1.8627(A/H)}$ و $\varepsilon^{-0.38}$ ، $n^{-0.8}$ ، $Re^{0.098}$ از $e^{0.098}$ و $\varepsilon^{-0.38}$ و $e^{-0.38}$ ، $Re^{0.098}$ از v در حالت آرایش نامنظم، عدد ناسلت متوسط تابعی از م

مطابق این دو رابطه، در هر دو حالت آرایش منظم و نامنظم، عدد ناسلت متوسط تابعی از عدد رینولدز، ضریب توانی n، نسبت تخلخل و درصد انسداد است. قابل ذکر است که این دو رابطه برای محدودهٔ عدد رینولدز ۱۰۰ تا ۱۰۲، درصد انسداد ۱/۸ تا ۱/۲، ضریب توانی ۰٫۸ تا ۱٫۲ و نسبت تخلخل ۵٫۰ تا ۰٫۲۵ و نسبت.

فصل پنجم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵–۱– نتیجه گیری

در این رساله، مطالعهٔ عددی در بررسی جریان و انتقال حرارت سیال نیوتنی و غیر نیوتنی بین دو صفحه موازی که به صورت جزئی با محیط متخلخل پر شده، استفاده شده است. روش شبکهٔ بولتزمن در شبیه سازی جریان سیال و انتقال حرارت داخل محیط متخلخل با موانع مربعی، با آرایش های منظم و نامنظم، به کار گرفته شد. دقت روش و کد عددی مورد استفاده با بررسی های موردی متفاوتی در هر مرحله تصدیق گردید و تطابق بالای بین نتایج به دست آمده، دقت بالای روش مورد استفاده را نشان داد. نتایج حاکی از قدرت بالای این روش در شبیه سازی محیطهای پیچیده بود. سه سیال توانی مختلف نازک شونده، نیوتنی و ضخیم شونده، با آرایش های متفاوت از بلوک های مربعی بین دو صفحه بررسی شد و تاثیر عدد رینولدز، ضرایب توانی، درصدهای انسداد و نسبت های تخلخل های متفاوت بر روی الگوی جریان و انتقال حرارت بررسی گردید.

- از جمله نكات برجستهٔ این مطالعه عبارتند از:
- اندازه و شدت گردابه های تشکیلی در پشت موانع مربعی تحت تاثیر ضریب توانی، عدد رینولدز و آرایش موانع مربعی است.
- ✓ وجود موانع ثابت در دامنه محاسباتی به عنوان محیط متخلخل باعث افزایش عـدد ناسـلت و بهبود انتقال حرارت می گردد.
- ✓ سیالات با (n<1) انتقال حرارت بیشتری تولید نموده و به منظور افزایش انتقال حرارت، مورد
 ۲ توجه بیشتری قرار دارند.

- ✓ عدد ناسلت تحت تاثیر عدد رینولدز، ضریب توانی، درصد انسداد و تخلخ ل قرار داشته و با
 افزایش ضریب توانی و نسبت تخلخل، کاهش می یابد.
 - بیشترین مقدار عدد ناسلت متوسط در آرایش نامنظم مشاهده گردید.
- ✓ با بررسی حالت های مختلف از آرایش موانع مربعی، مقدار عدد ناسلت با محدودهٔ اطمینان
 گزارش شد.
- ✓ در هر دو حالت آرایش قرارگیری موانع مربعی به صورت منظم و نامنظم، دو رابطه در آرایش منظم و نامنظم موانع مربعی بین عدد ناسلت، عدد رینولدز، ضریب توانی، درصد انسداد و نسبت تخلخل ارائه گردید.

۲-۵- پیشنهادات

با توجه به مراحل انجام شده در این رساله، در نهایت ایده هایی در راستای مطالعهٔ انجام گرفته، ذیلاً ارائه می گردد:

- ✓ در این رساله از روش شبکه بولتزمن با زمان آسودگی منفرد استفاده گردید، پیشنهاد می شود که از روش آسودگی چندگانه به منظور همگرایی سریعتر در رسیدن به نتایج، استفاده گردد.
- ✓ با توجه به استفاده از موانع مربعی در شبیه سازی محیط متخلخل در این رساله، استفاده از موانع دایروی به منظور تولید محیط متخلخل و مقایسهٔ نتایج به دست آمده با نتایج این رساله پیشنهاد می گردد.
- ✓ استفاده از مدل های دیگر سیالات غیرنیوتنی و مقایسهٔ نتایج به دست آمده با نتایج موجود
 در مطالعات بعدی پیشنهاد می گردد.
- ✓ پیشنهاد می گردد در مطالعات بعدی کل دامنهٔ محاسباتی با محیط متخلخل پر شده و با
 نتایج این رساله مقایسه گردد.

✓ در این رساله، جریان سیال و انتقال حرارت داخل محیط متخلخل به صورت دوبعدی با مدل
 D2Q9 شبیه سازی شد، پیشنهاد می گردد که در مطالعات آتی از مدل های سه بعدی نیز
 استفاده گردد.

منابع

[1]- Vafayi K., (2011), "Porous Media: Applications in Biological Systems and Biotechnology". Taylor & Francis Group.

[2] Mattila K., (2010), graduate thesis, "Implementation Techniques for the Lattice Boltzmann Method", Department of Mathematical Information Technology, Jyvaskyla University.

[3]- Chen S. & Doolen G. D., (1998), "Lattice Boltzmann Method for fluid flows". *Annular Rev. Fluid Mech.*, Vol 30, pp: 329-364.

[4]- Succi S., (2001), "The Lattice Boltzmann Equation for Fluid Dynamics and Beyond", Clarendon Press. Oxford.

[5]- Sukop M. C., Thorne D. T. (2006), "The Lattice Boltzmann Modeling". Springer.

[6]- He X. and Luo L.S. (1997), "Theory of the Lattice Boltzmann Method: From the Boltzmann Equation to the Lattice Boltzmann Equation", *Phys. Rev.*, E 56, pp. 6811–6817.

[7]- McNamara, G. and Zanetti, G., (1988), "Use of the Boltzmann Equation to Simulate Lattice Gas Automata", *Phys. Rev.*, Lett. 61, pp. 2332–2335.

[8]- Frisch U., Hasslacher B. and Pomeau Y., (1986), "Lattice-Gas Automata for the Navier-Stokes Equation", *Physical Review Letters*. Vol. 56. Num. 14. pp. 1505-1508.

[9]- Wolf-Gladrow D. A., (2000), "Lattice Gas Cellular Automata & Lattice Boltzmann Models", Springer.

[10]- Raabe D., (2004), "Overview on the Lattice Boltzmann Method for Nano- and Microscale Fluid Dynamics in Materials Science and Engineering", *Modelling & Simulation in Materials Science & Engineering*. Vol 12. Num 6.

[11]- Zhang, D., Zhang, R., Chen, S. and Soll, W.E., (2000), "Pore Scale Study of Flow in Porous Media: Scale Dependency REV, and Statistical REV", *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 27, No. 8, pp. 1195–1198.

[12]- Pan, C., Prins, J. F. and Miller, C. T., (2004), "A high-performance lattice Boltzmann implementation to model flow in porous media", Int. *J. Computer Physics Communications*, Vol. 158, pp. 89-105.

[13]- Pan, C., Luo, L. S. and Miller, C. T., (2006), "An Evaluation of Lattice Boltzmann Schemes for Porous", *Int. J. Computers & Fluids*, Vol. 35, pp. 898–909.

[14]- Inamuro, T., (2006), "Lattice Boltzmann Methods for Viscous Fluid Flows and for Two-Phase Fluid Flows", *In. J. Fluid Dynamics Research*, Vol. 38, pp. 641–659.

[15]- Yoshino, M. and Mizutani, Y., (2006), "Lattice Boltzmann Simulation of Liquid– Gas Flows Through Solid Bodies in a Square Duct", *In. J. Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 72, pp. 264–269.

[16]- Seta, T. Takegoshi, E. and Okui, K., (2006), "Lattice Boltzmann Simulation of Natural Convection in Porous Media", *In. J. Mathematics and Computers in Simulation*, Vol. 72, pp. 95–200.

[17]- Yiotis, A. G., Psihogios, J., Kainourgiakis, M. E., Papaioannou, A. and Stubos, A. K., (2007), "A Lattice Boltzmann Study of Viscous Coupling Effects in Immiscible Two-Phase Flow in Porous Media", *In. J. Colloids and Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, Ver. 300, pp. 35–49.

[18]- Kao, P.H., Ren, T. F. and Yang, R. J., (2007), "An Investigation Into Fixed-Bed Microreactors Using Lattice Boltzmann Method Simulations", *In. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 4243–4255.

[19]- Jeong, N., Choi, D. H. and Lin, C. L., (2008), "Estimation of Thermal and Mass Diffusivity in a Porous Medium of Complex Structure Using a Lattice Boltzmann Method", *In. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, pp. 3913–3923.

[20]- Lehmann, P.,Berchtold, M., Ahrenholz, B., Tolke, J., Kaestner, A., Krafczyk, M., Fluhler, M. and Kunsch, H. R., (2008), "Impact of Geometrical Properties on Permeability and Fluid Phase Distribution in Porous Media", *In. J. Advances in Water Resources*, Vol. 31, pp. 1188–1204.

[21]- Shokouhmand, H., Jam, F. and. Salimpour, M.R., (2009), "Simulation of Laminar Flow and Convective Heat Transfer in Conduits Filled With Porous Media Using Lattice Boltzmann Method", *In. J. Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 378–384.

[22]- Rong, F., Guo, Z., Chai, Z. and Shi, B., (2010), "A Lattice Boltzmann Model for Axisymmetric Thermal Flows Through Porous Media", *In. J. Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, pp. 5519–5527.

[23]- Chai, Z., Shi, B., Lu, J. and Guo, Z., (2010), "Non-Darcy Flow in Disordered Porous Media: A Lattice Boltzmann Study", *In. J. Computers & Fluids*, Ver. 39, pp. 2069–2077.

[24]- Zhao, C.Y., Dai, L.N., Tang, G.H., Qu, Z.G. and Li, Z.Y., (2010), "Numerical Study of Natural Convection in Porous Media (Metals) Using Lattice Boltzmann Method (LBM)", *In. J. Heat and Fluid Flow*, Ver. 31, pp. 925–934.

[25]- Cai, J. and Huai, X., (2010), "Study on Fluid–Solid Coupling Heat Transfer in Fractal Porous Medium by Lattice Boltzmann Method", *In. J. Applied Thermal Engineering*, Ver. 30, pp. 715–723.

[26]- Hasert, M., Bernsdorf, J. and Roller, S., (2011), "Lattice Boltzmann Simulation of Non-Darcy Flow in Porous Media", *In. J. Procedia Computer Science*, Ver. 4, pp. 1048–1057.

[27]- Teamah, M. A., El-Maghlany, W. M. and Khairat Dawood, M. M., (2011), "Numerical Simulation of Laminar Forced Convection in Horizontal Pipe Partially or Completely Filled with Porous Material", *In. J. Thermal Sciences*. Ver. 50, pp. 1512-1522.

[28]- Ghassemi, A. and Pak, A., (2011), "Numerical Study of Factors Influencing Relative Permeabilities of Two Immiscible Fluids Flowing Through Pporous Media Using Lattice Boltzmann Method", *In. J. Petroleum Science and Engineering*, Ver. 77, pp. 135–145.

[29] Boek, E. S., Chin, J., Coveney, P. V. Lattice-Boltzmann simulation of the flow of non-Newtonian fluids in porous media, International Journal of Modern Physics B, 17 (1-2) (2003) 99–102.

[30]- Sullivan. S.P., Gladden. L.F., Johns, M.L. (2006), "Simulation of power-law fluid flow through porous media using lattice Boltzmann techniques", *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 133, pp. 91–98.

[31] Chen, Y. L., Cao, X. D., Zhu, K. Q., A gray lattice Boltzmann model for powerlaw fluid and its application in the study of slip velocity at porous interface, Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 159 (1-3) (2009) 130–136.

[32]- Ashrafizaadeh, M., Bakhshaei, H. (2009), "A comparison of non-Newtonian models for lattice Boltzmann blood flow simulations", *Journal Computers and Mathematics with Applications*, 58, pp.1045-1054.

[33]- Wang. D, Bernsdorf. J. (2009), "Lattice Boltzmann simulation of steady non-Newtonian blood flow in a 3D generic stenosis case", *Journal of Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 58, pp. 1030-1034.

[34]- Jahanshai Javaran, E., Gandjalikhan Nassab, S. A., Jafari, S., Thermal analysis of a 2-D heat recovery system using porous media including lattice Boltzmann simulation of fluid flow, International Journal of Thermal Sciences, 49 (6) (2010) 1031–1041.

[35]- Wang, C. H. and Ho, J. R. (2011), "A lattice Boltzmann approach for the non-Newtonian effect in the blood flow", *Journal of Computers and Mathematics with Applications*, Vol. 62, pp. 75–86.

[36] Chhabra R. P. and Richardson J. F. (2008) "*Non-Newtonian flow and applied rheology engineering applications*", Second Edition, Butterworth-Heinemann, Oxford, U. K.

[38] Bird, B. R., Armstrong, R. C., and Hassager, O. (1987). "Dynamics of Polymer Liquids", Vol. 1, Second Edition, John Wiley & Sons.

[39] Malkin, A.Y.(1994), "Rheology Fundamentals", First Edition, Chem. Tech. Publishing, Toronto.

[40] Phan-Thien, N. (2002), "Understanding Viscoelasticity", First Edition, Springer, Berlin.

[41]- Buick M., (1990), Ph.D Thesis, "Lattice Boltzmann Method in Interfacial Modeling", Edinburgh Univ.

[42]- Hou S., (1995), Ph.D Thesis, "Lattice Boltzmann Method for incompressible Viscous Flow", Kansas State Univ.

[43]- Chen H., Chen S., Mathaeus W. M, (1992), "Recovery of the Navier Stokes Equation using Lattice Gas Boltzmann Method", *Phys. Rev.*, Vol. 45, No. 8.

[44]- Hardy J., Pazis O. de, Pomeau Y., (1976), "Molecular dynamics of a classical lattice gas: Transport properties and time correlation functions", *Phys Rev*.A 13, pp. 1949-1961.

[45]- Qian Y. H., D'Humieres D., and Lallemand P., (1992), "Lattice BGK Models for Navier Stokes Equation", *Europhys. Lett.*, 17 (6), pp. 479-787.

[46] He X.Y., Chen S.Y. and Doolen G.D. (1998) "A Novel Thermal Model for the Lattice Boltzmann Method in Incompressible Limit", *Journal of Computational Physics*, Ver. 146, pp. 282–300.

[47] Mohamad A.A., 2011. Lattice Boltzmann Method: Fundamentals and Engineering Applications with Computer Codes, , Springer, London, England

[48] Wang J.K., Wang M.R. and Li Z.X. (2007) "A Lattice Boltzmann Algorithm for Fluid–Solid Conjugate Heat Transfer", *In. J. Thermal Sciences*, Vol. 46, pp 228–234.

[49] F. Delplace and J.C. Leuliet, Generalize Reynolds number for the flow of power law fluid incylinderical ducts of arbitrary cross-section. The Chemical Eng. Journal, 56 (1995) 33-37

[50] A. Quarteroni, T. M. Veneziani, Computational vascular fluid dynamics: problems, models and methods, Comput. Visual Sci. 2 (2000) 163–97.

[51]- Lai. Y. G., Lin C., Huang., (2001), "Accuracy and efficiency study of lattice Boltzmann method for steady-state flow simulations", *Numerical Heat Transfer*, Part B: Fundamentals, Vol 39, Num 1, 1, pp. 21-43(23).

[52]- Noble D.R., Chen S., Georgiadis J. G., Buckius (1995), "A consistent hydrodynamic boundary condition for the lattice Boltzmann method", *Phys. Fluids* 7, pp. 203-209.

[53]- Inamuro T., Masato Y., Fumimaru O., (1995), "A non slip. A non-slip boundary condition for lattice Boltzmann simulations", *Physics of Fluids*, in press.

[54]- Zou, Q.S. and He, X.Y. (1997), "On Pressure and Velocity Boundary Conditions for the Lattice Boltzmann BGK Model", *Physics of Fluids* 9 (6), pp. 1591–1598.

[55]- Chen. S., Marti'nez D., Mei. R., (1996), "On boundary conditions in lattice Boltzmann methods", *Phys. Fluids* 8, 2527-2536.

[56]- Yu D., Mei R., Luo L. S., Shyy W., (2003), "Viscous flow computations with the method of lattice Boltzmann equation", *Progress in Aerospace Sciences* Vol 39, Iss 5, pp. 329-367.

[57]- Bouzidi M.H., Firdaoss M, Lallemand P., (2001), "Momentum transfer of a Boltzmann-lattice fluid with boundaries", *Phys. Fluids* 13, pp. 3452-3459.

[58]- Yu D., Mei R., Shyy W., (2002), "A multi-block lattice Boltzmann method for viscous fluid flows", *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol 39, Iss 2, pp. 99-120.

[59]- Ziegler DP., (1993), "Boundary Condition for Lattice Boltzmann Simulation", J Statistical Phy, Vol 71, Num 5-6, pp: 1171-1177.

[60]- Al-Zoubi A. & Bernner G., (2004), "Comparative study of thermal flows with different finite volume and lattice Boltzmann schemes", *International Journal of Modern Physics*, Vol 15, Iss 2, pp. 307-319.

[61] R. Mei, L.S. Luo, W. Shyy, An accurate curved boundary treatment in the lattice Boltzmann method, Journal of Computational Physics 155 (1999) 307–330.

[62] R. B. Bird, Warren E. Stewart and Edwin N. Lightfoot. Transport Phenomena. J.Wiley and Sons, 1960.

[63] Chen R. Y. Flow in the entrance region at low Reynolds numbers, *Journal of Fluid Engineering*, Vol 95, 1973, 153-158.

[64] Tang, G. H., Tao, W. Q. and He, Y.L. "Simulation of Fluid Flow and Heat Transfer in a Plane Channel Using the Lattice Boltzmann Method", In. J. Modern Physics B, Vol. 17, pp. 183-187, 2003.

[65] White, F. W., "Fluid Mechanics", Fourth Edition, Mc Graw Hill, University of Rhode Island.

[66] Turki, S., Abbassi, H., Nasrallah, S.B., "Two–dimensional laminar fluid flow and heat transfer in a channel with a built–in heated square cylinder", *I. J. Thermal Sci.* 42, 1105–1113, 2003.

[67]- Dhiman, A., K., "Heat transfer to power-law dilatant fluids in a channel with a built-in square cylinder", *I. J. Thermal Sci.* 48, 1552–1563, 2009.

[68] Cengel, Y. A. "Heat and Mass Transfer Third Edition", Mc Graw Hill, Singapore, 2006.

[69] A.A. Mohamad, "Heat transfer enhancements in heat exchangers fitted with porous media. Part I: Constant wall temperature." I. J. Thermal Sci. 42, 385–395, 2003.
[70] B. Paliwala, Atul Sharmab, R.P. Chhabraa, V. Eswaranb, "Power law fluid flow past a square cylinder momentum and heat transfer characteristics." Chemical Eng. Sci. 58, 5315 – 5329, 2003.