دانشکده مهندسی مکانیک

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی

شبیه‌سازی عددی جریان دوفاز گاز-جامد در رژیم جریان لغزشی در مایکروکانال

استاد راهنما:

دکتر مهرزاد شمس

دکتر مجید قاسمی

دانشجو:

رضا بری شهواری

پاییز 91

تقدیم به پدر و مادربزرگوارم

گاه می‌گفتند تنگدستی در تمام مدت حال زندگی بود و نه تنها راه رفتن
را به من آموختند بلکه راه درست یافتن از این عزیزان یاد گرفتم

و همسر مهربانم

همراه همیشگی من است و با او قدم‌هایم را استوارتر از پیش بر می‌دارم

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی مکانیک

تائیدیه هیات داوران

هیئت داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان: **شبیه سازی عددی جریان دو فاز گاز- جامد در رژیم جریان لغزشی در مایکروکانال** توسط آقای **رضا بری شهواری** صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد در رشته: مهندسی مکانیک، گرایش تبدیل انرژی مورد تائید قرار می‌دهند.

اعضای هیئت داوران	نام و نام خانوادگی	امضاء
1- استاد راهنما	**دکتر مهرزاد شمس**	
2- استاد راهنما	**دکتر مجید قاسمی**	
3- استاد ممتحن	**دکتر محمد حسین حامدی**	
4- استاد ممتحن	**دکتر علی اشرفی‌زاده**	

اظهار نامه دانشجو

موضوع پایان نامه: **شبیه‌سازی عددی جریان دوفاز گاز-جامد در رژیم جریان لغزشی در مایکروکانال**

اساتید راهنما: **دکتر مهرزاد شمس، دکتر مجید قاسمی**

نام دانشجو: **رضا بری شهواری**

شماره دانشجوئی: **8903054**

اینجانب ابوذر مشفق دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می نمایم که تحقیقات ارائه شده در این پایان نامه توسط شخص اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تائید می باشد، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. بعلاوه گواهی می نمایم که مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری درهیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را بطور کامل رعایت کرده ام.

نام و نام خانوادگی: **رضا بری شهواری**

امضا و تاریخ: **91/8/28**

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

1- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری بصورت کل پایان نامه یا بخشی از آن تنها باموافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.

ضمنا متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده وجود داشته باشد.

2- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از زحمات بی‌دریغ جناب آقای دکتر مهرزاد شمس که
من را در طول این پروژه راهنمایی کردند.

چکیده

کاهش قطر هیدرودینامیکی کانال تا حدی که قابل مقایسه با مسافت پویش آزاد میانگین مولکول‌های گازی که در داخل کانال حرکت می‌نمایند باشد، منجر به پاره‌ای از اثرات ناپیوستگی و یا رقت می‌گردد. با در نظر گرفتن پیچیدگی و هزینه‌های ناشی از مدل‌سازی عددی معادلات بولتزمان، معادلات ناویراستوکس با توجه به مفاهیم موجود در زمینه جریان‌های لغزشی حل می‌شود. از این‌رو شرط مرزی سرعت ماکسول و پرش دمایی اسملچوسکی به عنوان شروط مرزی به معادلات مومنتوم و انرژی اعمال می‌شوند. تحقیق حاضر بیان کننده روشی در راستای بررسی انتقال حرارت با استفاده از تزریق نانو ذرات در مایکرو کانال می‌باشد، با توجه به ابعاد مایکرو کانال معادلات حاکم بر جریان در محدوده جریان لغزشی قرار می‌گیرند. در تحقیق انجام گرفته، پخش ذرات نانو در داخل مایکروکانال از طریق روش جریان دو فاز مورد بررسی قرار گرفته و روش اویلر-لاگرانژی به منظور مدل‌سازی حضور ذرات نانو در مایکروکانال افقی در هندسه‌های مختلف تحت جریان لامینار استفاده شده است. همچنین بیان این نکته ضروری به نظر می‌رسد که نیروهای در نظر گرفته شده در طول این مدل سازی شامل نیروهای درگ، جاذبه و برآونی می‌باشند. علاوه بر آن، به منظور اعمال تأثیرات لغزشی در مایکروکانال‌ها، فاکتور اصلاح لغزش کانینگهام ، در اصلاح تأثیر نیروی درگ استفاده شده است. مایکروکانال‌های مورد مطالعه به دو دسته زبر و سینوسی تقسیم می‌شوند، دسته اول به منظور بررسی اثرات زبری بر انتقال حرارت جریان دوفاز گاز جامد صورت گرفت و تابع هدف در دسته دوم بر افزایش بازده حرارتی مایکروکانال در جریان دوفاز استوار بود.

کلمات کلیدی: مایکروکانال، انتقال حرارت، جریان لغزشی، پرش دمایی، جریان دوفاز، نانوذرات

فهرست

فصل 1- مقدمه

مقدمه 2

1-1- مایکروکانال ها 3

1-2-مایکروکانال‌های گرماگیر 4

1-3- نانوسیال 5

1-4- اثر کوچک شدن سیستم‌ها 7

1-5- مدل سازی جریان‌های رقیق گازی در مایکروکانال‌ها 9

1-6- مدل‌سازی جریان دو فاز گاز- جامد 11

1-7- مدل‌های دو سیاله 13

الف) مدل‌های دو سیاله اویلری-لاگرانژی 13

ب) مدل‌های دو سیاله اویلری-اویلری 14

1-8- خلاصه فصول 15

فصل 2- پیشینه تحقیق

مقدمه 17

2-1- انتقال حرارت در رژیم جریان لغزشی 17

2-2- جریان دو فازی و نانوسیال 21

2-3- اثر زبری و هندسه در مایکروکانال 24

فصل 3- جریان لغزشی

مقدمه 28

3-1- فرضیات محیط پیوسته و تعادل ترمودینامیکی 28

3-2- رژیم‌های جریان گازی در مایکروکانال‌ها 31

3-3- رژیم جریان لغزشی 32

3-3-1- شرایط مرزی لغزش مرتبه‌ی اول 33

3-3-2- شرایط مرزی از مراتب بالاتر 37

فصل 4- جریان دو فاز گاز جامد

مقدمه 41

4-1- جریان دو فاز گاز-جامد 42

4-2- روش مدل‌سازی فاز گسسته 43

4-2-1- معادلات فاز پیوسته 43

4-2-2- تئوری حرکت ذرات 45

4-3- محاسبه مسیر حرکت نانوذرات 49

4-5- محاسبه انتقال حرارت نانوذرات 52

فصل 5 تعریف مسئله و مدل‌سازی

مقدمه 54

5-1- مایکروکانال‌ها زبر 55

5-2- مایکروکانال‌های سینوسی شکل 57

5-3- مدل عددی و اعتبار سنجی 58

فصل 6 -بررسی نتایج

مقدمه 63
6-1- نتایج مایکروکانال‌های زبر 63
6-1-1- جریان تکفاز 63
6-1-2- جریان دو فاز گاز-جامد 65
6-1-2-1- بررسی اثرات زبری بر انتقال حرارت در چگالی پیک 10 درصد 65
6-1-2-2- بررسی کسر حجمی نانو ذرات بر انتقال حرارت در چگالی پیک 10 درصد..... 70
6-1-2-3- مقایسه انتقال حرارت کانال‌ها زبر در چگالی پیک 10 درصد با کانال صاف 72
6-1-2-4- بررسی اثرات زبری بر انتقال حرارت در چگالی پیک 50 درصد..... 74
6-1-2-5- بررسی کسر حجمی نانو ذرات بر انتقال حرارت در چگالی پیک 50 درصد..... 75
6-2- نتایج مایکروکانال‌های سینوسی 76
6-2-1- جریان تکفاز 76
6-2-2- جریان دو فاز گاز-جامد..... 80
6-2-2-2- بررسی کسر حجمی نانو ذرات بر انتقال حرارت مایکروکانال‌های سینوسی 82

فصل 7 نتیجه‌گیری و پیشنهادات

7-1- نتیجه‌گیری 86
7-2- پیشنهادات..... 87

مراجع 88

فهرست اشکال

شکل(1-1)- نمایی از یک شبکه مایکروکانال 3

شکل (1-2)- نمایی از مایکروکانال‌های گرماگیر که بر روی چیپ کامپیوتری قرار می‌گیرند..... 5

شکل(1-3)- نمونه از نانوسیال‌ها 6

شکل (1-4) - محدوده کاربرد سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی و نانوتکنولوژی در شرایط اتمسفری استاندارد 8

شکل(1-5)- تقسیم بندی رژیم‌های جریان بر مبنای عدد نادسون 9

شکل (1-6) - مقایسه دیدگاه اویلری و لاگرانژی.....13

شکل (3-1)- حجم مبنا با شرایط مطلوب (سطح تیره شده) برای اعتبار فرض پیوستگی محیط 29

شکل (3-2)- رژیم‌های مختلف در جریان‌های گازی و مدل‌های لازم برای مطالعه آن‌ها 32

شکل (4-1)- انتقال مومنتوم و انرژی بین فاز گسسته و پیوسته 48

شکل(5-1)- کانال واقعی با ابعاد میکرو که در آن زبری در اثر فرآیند ساخت ایجاد شده است 54

شکل(5-2)- شماتیک مایکروکانال زبر مورد بررسی 55

شکل(5-3)- نمایش زبری‌های مورد مطالعه و چگالی پیک زبری‌ها در مایکروکانال 56

شکل(5-4)- شماتیک مایکروکانال سینوسی مورد بررسی 57

شکل(5-5)- اعتبارسنجی نتایج حل عددی با نتایج ارائه شده توسط هادجیکنسانتینو و سیمک 61

شکل(6-1)- تغییرات عدد ناسلت جریان تکفاز هوا در مایکروکانال‌هایی با زبری 0/025، 0/05، 0/075 و 0/1 در چگالی پیک 10 و 50 درصد 65

شکل(6-2)- خطوط جریان در زبری یکسان و چگال یک 10 و 50 درصد 65

شکل(6-3)- تغییرات عدد ناسلت با تزریق 0/5 درصدی نانوذرات در زبرهای مختلف 66

شکل(6-4)- مقایسه تغییرات عدد ناسلت در حالت بدون تزریق با تزریق 0/5 درصدی نانوذرات در زبرهای مختلف 67

شکل(6-5)- تغییرات عدد ناسلت با تزریق 3 درصدی نانوذرات در زبرهای مختلف.....68

شکل(6-6)- تغییرات عدد ناسلت با تزریق 5 درصدی نانوذرات در زبرهای مختلف 68

شکل(6-7)- تغییرات عدد ناسلت با تزریق 5 درصدی نانوذرات با قطر 10 نانومتر در زبرهای مختلف 68

شکل(6-8)- تغییرات عدد ناسلت با تزریق 10 درصدی نانوذرات در زبرهای مختلف 69

شکل(6-9)- تغییرات عدد ناسلت در کسر حجمی‌های مختلف نانوذرات در زبری نسبی 0/025 70

شکل(6-10)- تغییرات عدد ناسلت در کسر حجمی‌های مختلف نانوذرات در زبری نسبی 0/05 71

شکل(6-11)- تغییرات عدد ناسلت در کسر حجمی‌های مختلف نانوذرات در زبری نسبی 0/075 71

شکل(6-12)- تغییرات عدد ناسلت در کسر حجمی‌های مختلف نانوذرات در زبری نسبی 0/1 72
شکل(6-13)-مقایسه تغییرات عدد ناسلت در کسر حجمی‌های مختلف در مایکروکانال با سطح صاف با مایکروکانال با زبری 0/05 73
شکل(6-14)- تغییرات عدد ناسلت در کسر حجمی‌های مختلف نانوذرات در کانال صاف 73
شکل(6-15)- تغییرات عدد ناسلت با تزریق 5 درصدی نانوذرات 50 نانومتری در زبرهای مختلف.....74
شکل(6-16)- تغییرات عدد ناسلت با تزریق 5 درصدی نانوذرات10 نانومتری در زبرهای مختلف 75
شکل(6-17)- تغییرات عدد ناسلت در کسر حجمی‌های مختلف نانوذرات در کانال با زبری 0/025 و چگالی پیک 50% 75
شکل(6-18)- تغییرات عدد ناسلت نسبت به طول موج‌ها و دامنه‌های مختلف.....76
شکل(6-19)- خطوط جریان برای مایکروکانال‌های سینوسی به ترتیب از بالا به پایین برای طول موج 1، 1/5 و 2/2 برای دامنه موج 0/1(a) و 0/3(b).....78
شکل(6-20)- نمونه از گردابه‌های تشکیل شده در طول موج کوتاه و دامنه بلند در مقایسه با دامنه موج کوچک ..78
شکل(6-21)- تغییرات عدد ناسلت نسبت به طول موج‌ها در دامنه‌ی 0/3 79
شکل(6-22)- تغییرات عدد ناسلت با تزریق 0/5 درصدی نانوذرات در مایکروکانال‌ها مختلف 80
شکل(6-23)- تغییرات عدد ناسلت با تزریق 3 درصدی نانوذرات در مایکروکانال‌ها مختلف 81
شکل(6-24)- تغییرات عدد ناسلت با تزریق 5 درصدی نانوذرات در مایکروکانال‌ها مختلف 81
شکل(6-25)- تغییرات عدد ناسلت نسبت به طول موج‌ها و دامنه‌های مختلف با تزریق نانوذرات 10 نانومتری.....82
شکل(6-26)- تغییرات عدد ناسلت در کسر حجمی‌های مختلف برای مایکرو کانال سینوسی با طول موج 1 و دامنه موج 0/1 83
شکل(6-27)- تغییرات عدد ناسلت در کسر حجمی‌های مختلف برای مایکرو کانال سینوسی با طول موج 2/2 و دامنه موج 0/3 83
شکل(6-28)- تغییرات عدد ناسلت در کسر حجمی‌های مختلف برای مایکرو کانال سینوسی با طول موج 2/8 و دامنه موج 0/3 83
شکل(6-29)- تغییرات عدد ناسلت در کسر حجمی‌های مختلف برای مایکرو کانال سینوسی با طول موج 3/4 و دامنه موج 0/3 84

فهرست جداول

جدول (3-1)- ضرایب مدل‌های اصلی برای شرایط مرزی لغزش مرتبه‌ی دوم با $\sigma = 1$ 38

جدول (4-1)- فاکتور اصلاح لغزش برای قطرهای مختلف ذرات کروی 47

فهرست علائم اختصاری

علائم لاتین		علائم انگلیسی	
مسیر پویش آزاد مولکولی(m)	λ	دامنه بی‌بعد موج سینوسی(A/(H))	α
چگالی	ρ	گرمای ویژه ($Jkg^{-1}K^{-1}$)	C_p
ضریب همسازی انرژی	σ_T	قطر هیدرولیک(m)	D_H
ضریب همسازی مومنتوم	σ_v	ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی	h_x
نسبت گرمای ویژه	γ	ضریب انتقال حرارت جابجایی متوسط	$\bar{h}$
ثابت زمانی ذره	τ_p	ارتفاع کانال(m)	H
ضریب صدور تشعشعی	ε_p	ضریب رسانندگی حرارت($wkg^{-1}K^{-1}$)	k
		عدد نادسون	Kn
		طول کانال (m)	L
		عدد ماخ	Ma
		عدد ناسلت محلی	Nu_x
		عدد ناسلت متوسط	$\overline{Nu}$
		فشار(Pa)	P
		شار حرارتی از سطح	$q"_x$
		ثابت عمومی گازها	R
		عدد رینولدز	Re
		دمای سیال	T
		دمای دیواره	T_w
		دمای بالک	T_b
		عدد بی بعد پرنتل	Pr
		سرعت سیال در راستای جریان	u
		سرعت سیال در راستای عمود بر جریان	v
		اندیس سیال	f
		اندیس نانوذره	np
		فکتور اصلاح لغزش	C_C

فصل 1

مقدمه

مقدمه

با توجه به پیشرفت سریع ابزارها و سیستم‌های مایکرو در دو دهه اخیر، نیاز به فهم دانش خواص جریان سیال و مکانیزم انتقال حرارت در مایکروکانال‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. توسعه سیستم‌های مایکرو الکترومکانیکال[1] و تجهیزات مایکروجریان[2] نیاز به سیستم‌های با ابعاد بسیار کوچک برای دفع حرارت را ایجاب می‌کند تا در مقیاس مایکرو بتواند حرارت تولید شده در این تجهیزات را منتقل کند، همچنین پیشرفت‌ها در مهندسی پزشکی و ژنتیک نیاز به کنترل انتقال سیال و دقت در کنترل دما در گذرگاه‌هایی با ابعاد مایکرو را ایجاد کرده است. از این‌رو مایکروکانال‌ها در بسیاری از تجهیزات برای انتقال سیال به صورت تکفاز و یا چند فاز مشارکت دارند، کاربردهای اولیه مایکروکانال‌ها در مایکروماشین‌ها مثل مایکروپمپ‌ها، مایکروشیرها و مایکروسنسورها می‌باشد.

از مزایای سیستم‌های مایکروفلوئیدیک عبارتند از:

- اندازه کوچک‌تر دستگاه‌ها (باعث نزدیکی آنالیز به فرایند واقعی می‌شود).
- هزینه ساخت پایین‌تر (به علت حجم کمتر تولیدات).
- انرژی مصرفی کمتر (حجم کوچک‌تر دستگاه).
- حجم کمتر رآکتورهای گران (یا مناسب بودن برای نمونه‌هایی که نمی‌توان از آن‌ها در حجم‌های بالا استفاده کرد).
- عملکرد بهتر
- ورودی بالا

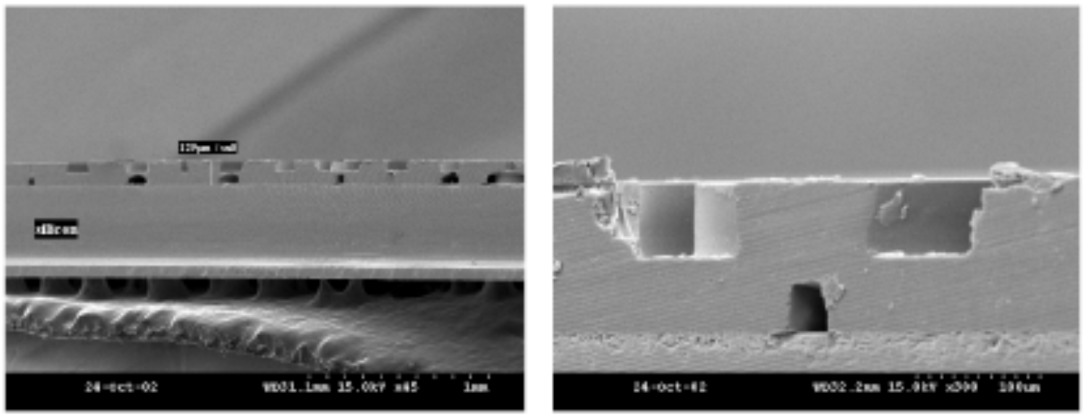
از شناخته‌شده‌ترین ابزارهای مایکرو، مایکروکانال‌های چاه حرارتی[3] است که به دلیل نرخ بالای انتقال حرارت بسیار مورد توجه محققین قرار گرفته است. از مزیت‌های مایکروکانال‌های چاه

[1] MEMS(Micro- Electro-Mechanical Systems)
[2] MFD(Micro- Flow Devices)
[3] Microchannel Heat Sink

حرارتی کوچک بودن مقطع عبور سیال نسبت به سطح جانبی بزرگ آن‌ها می‌باشد که باعث دستیابی به نرخ انتقال حرارت بالا در این ابزارها می‌شود.

1-1- مایکروکانال ها

یکی از اجزای مهم در میکروفلوئیدیک[1]، شبکه مایکروکانال‌ها است. مایکروکانال‌ها، عضوهای عبوری هستند که مسیرهای مختلف سیال را به هم متصل می‌کند و می‌تواند به صورت باز یا بسته باشد. البته با توجه به اینکه اکثر سیستم‌ها نیازمند سقف می‌باشند، این ساختارها معمولاً بسته هستند. پهنای مایکروکانال‌ها، با توجه به کاربرد و عملگر استفاده شده از صدها میکرومتر تا صدها نانو متر تغییر می‌کند (مثلاً پمپ‌های الکتروسینتیک کانال باریک‌تری نسبت به پمپ‌های مکانیکی نیاز دارند).



شکل(1-1)- نمایی از یک شبکه مایکروکانال.

یکی از کاربردهای مایکروکانال‌های چاه گرمایی یا مایکروکانال‌های گرماگیر در خنک کار وسایلی مانند تراشه‌های الکترونیکی است که نرخ انتقال حرارت در این‌گونه وسایل قابل توجه است، به

[1] Microfluidic

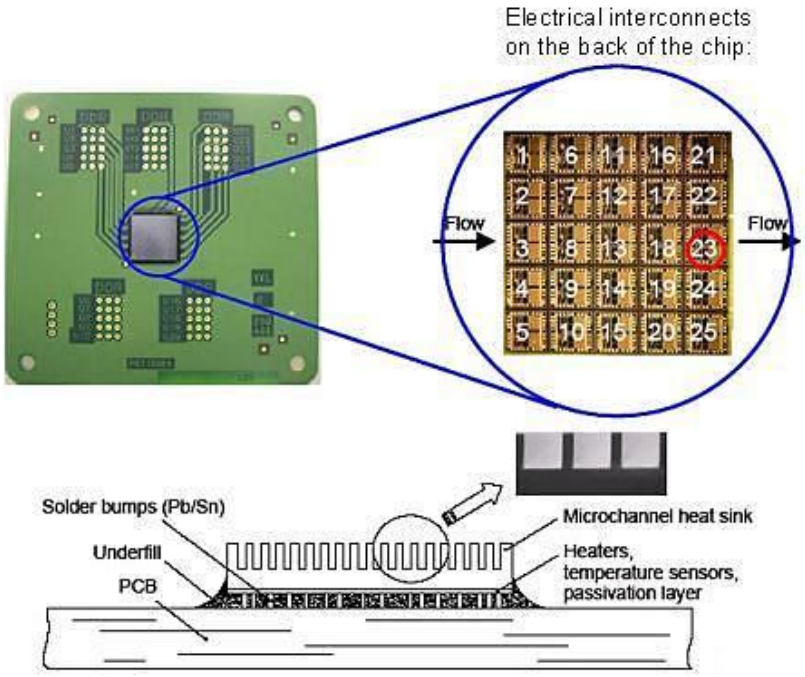
طور کلی برای انتقال حرارت‌های بیش از $100\ W/CM^2$ دیگر خنک‌کننده‌های معمولی قابل استفاده نمی‌باشند و برای این منظور از مایکرو خنک‌کننده‌ها استفاده می‌گردد[1و2].

1-2- مایکروکانال‌های گرماگیر

توسعه تکنولوژی ساخت قطعات مایکرو منجر به تولید محصولات و ابزارهای الکترونیکی با ابعاد بسیار کوچک شده است. دمای مجاز برای این دستگاه‌ها باید در یک محدوده معین باشد تا عملکرد مطمئن داشته باشند. مایکروکانال گرماگیر که توسط تاکرمن و پیس[1] معرفی شد یک انتخاب مناسب برای خنک کار قطعات الکترونیکی می‌باشد[3]. اما، با توجه به توسعه در تکنولوژی ساخت قطعات مایکرو، قطعات کوچک‌تر و کوچک‌تر شدند در حالی که شار حرارت در آن‌ها افزایش پیدا کرده است.

تاکرمن و پیس در سال 1981 از اولین افرادی بودند که یک مایکروکانال گرماگیر جهت خنک کاری یک تراشه الکترونیکی در دانشگاه استنفورد مورد آزمایش قرار دادند. آن‌ها برای آزمایش خود از یک کانال سیلیکونی که در آن آب جریان داشت استفاده کردند و نشان دادند که این مایکروکانال می‌تواند شار حرارتی حدود $100\ w/cm^2$ منتقل کند که این مقدار در مقایسه با ظرفیت خنک‌کننده‌های رایج در تراشه‌ها بیش از 100 برابر می‌باشد. بنابراین یک سیستم خنک کاری مناسب برای اینکه دما را در یک محدوده‌ی امن قرار دهد مورد نیاز است. پیشرفت‌های اخیر در نانو تکنولوژی نشان می‌دهد که نانوسیال‌ها سردکننده مناسب برای وسایل الکترونیکی هستند.

[1] Tuckerman and Pease



شکل (1-2)- نمایی از مایکروکانال‌های گرماگیر که بر روی چیپ کامپیوتری قرار می‌گیرند.

1-3- نانوسیال

نانوسیالات[1]، سیالاتی هستند که دارای ذرات جامد معلق در حد نانو می‌باشند. مواد نانوذرات و سیال پایه نانوسیالات می‌تواند متفاوت و شامل مواد گوناگونی باشند. سیال پایه نانوسیالات می‌تواند هوا، آب، اتیلین گلیکول یا تری اتیلن گلیکول و دیگر مبردها، روغن یا روان کننده‌ها، سیال زیستی و محلول‌های پلیمری باشد. مواد نانوذرات شامل فلزات مانند طلا، مس، آلومینیم، تیتانیوم، اکسید فلزات مانند اکسید مس، آلومینا، اکسید زیرکونیم، سیلیکا، اکسید تیتانیوم، انواع کربن مانند فلورین، الماس، کاربید فلزی مانند کاربید، سیلیسیم، نیتریدها مانند نیترید سیلیسیم، نیترید آلومینیوم، نانوتیوب کربنی، اکسیدهای سرامیکی مانند اکسید آلومینیوم، اکسید مس، مواد تغییر فاز دهنده جامد/جامد و نانوذرات با وظیفه مشخص می‌باشند. ابعاد نانوذرات معمولاً بین یک تا چهل نانومتر و شکل آن‌ها کره‌ای یا استوانه ای می‌باشد. این ذرات می‌توانند دارای بار مثبت، منفی و یا خنثی باشند. درصد حجمی آن‌ها بین 0/1 تا

[1] Nanofluid